

# Calorimetría

Arely Cortés González

Humboldt Universität zu Berlin



Latin American alliance for  
Capacity building in Advanced physics

LA-CoNGA physics



Cofinanciado por el  
programa Erasmus+  
de la Unión Europea





Algunas referencias:

Libros:

- Dan Green. *The physics of particle detectors*. Cambridge University Press.
- Richard Wigmans. *Calorimetry, Energy measurement in Particle Physics*. Oxford Science publication.
- Claus Grupen and Boris Shwartz. *Particle Detectors*. Cambridge Monographs.

En línea:

- EDIT 2011, Detectors School at CERN.
  - Richard Wigmans, Calorimetry: <https://indico.cern.ch/event/124299/>
- CERN Summer Student Lectures 2019.
  - Werner Riegler, Detector sessions: <https://indico.cern.ch/category/345/>
- CERN-Fermilab Hadron Collider Physics School 2021/
  - Daniela Bortoletto, Detector Technologies: <https://indico.cern.ch/event/1023573>
- Detectors for Particle Physics, Institute of High Energy Physics, Vienna, Austria.
  - Thomas Bergauer.

¿Qué son los calorímetros?



Un detector de partículas debe interactuar con el material del detector y transferir energía en alguna forma que se pueda detectar (señal).

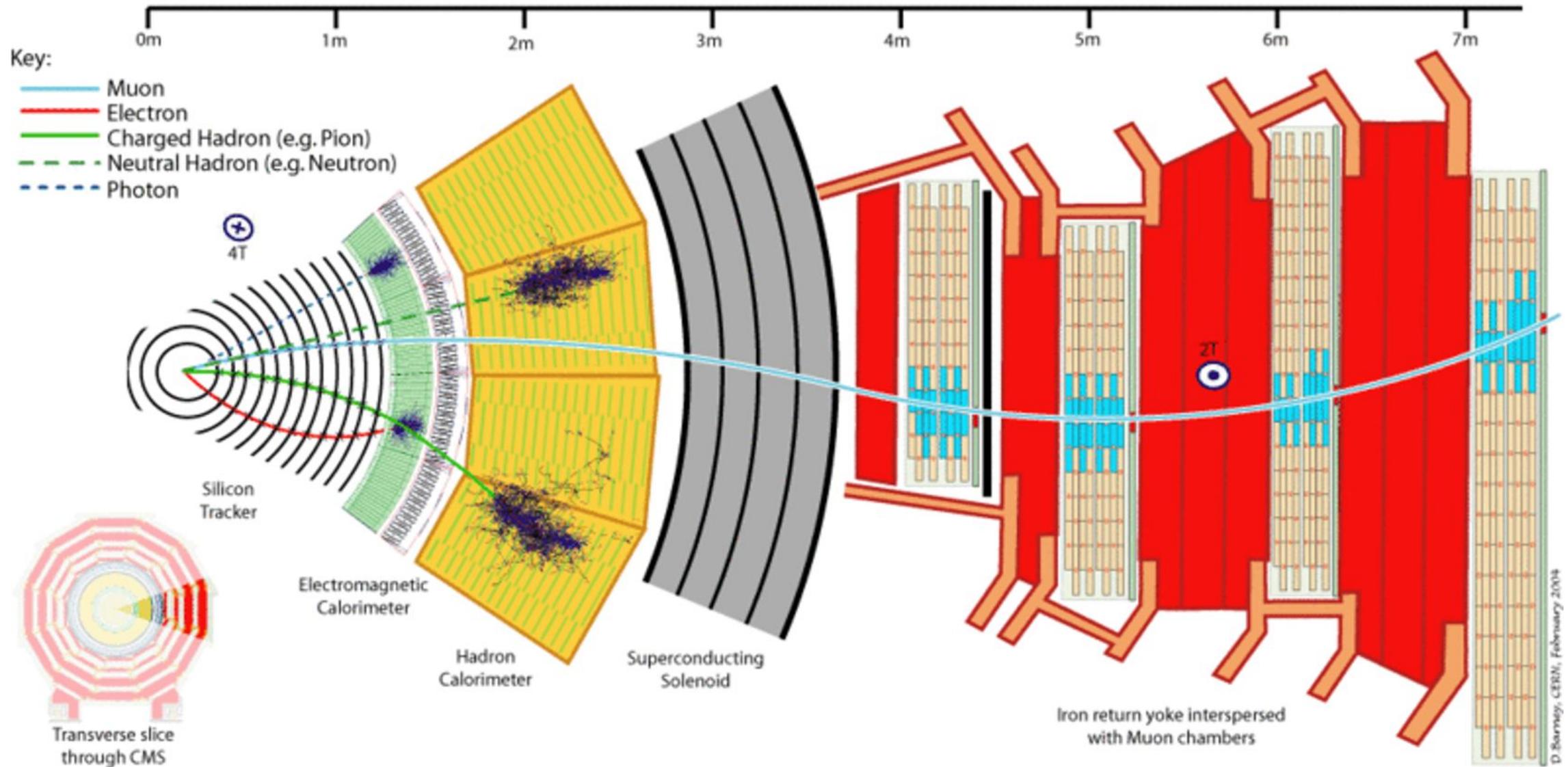
En física de partículas y física nuclear:

*Calorímetros son detectores de partículas diseñados para **absorber** la mayoría de partículas incidentes, forzándolas a depositar toda su energía para su medición.*

- Medición de la energía vía la absorción total de las partículas.
  - Este método es **destrutivo** para casi todas las partículas (hay excepciones).
- Componente esencial para la detección de partículas: pueden medir partículas cargadas y neutras.
- Su precisión mejora a mayores energías de la partícula incidente.
- Se complementa a otros detectores (e.g. *tracking detectors*).

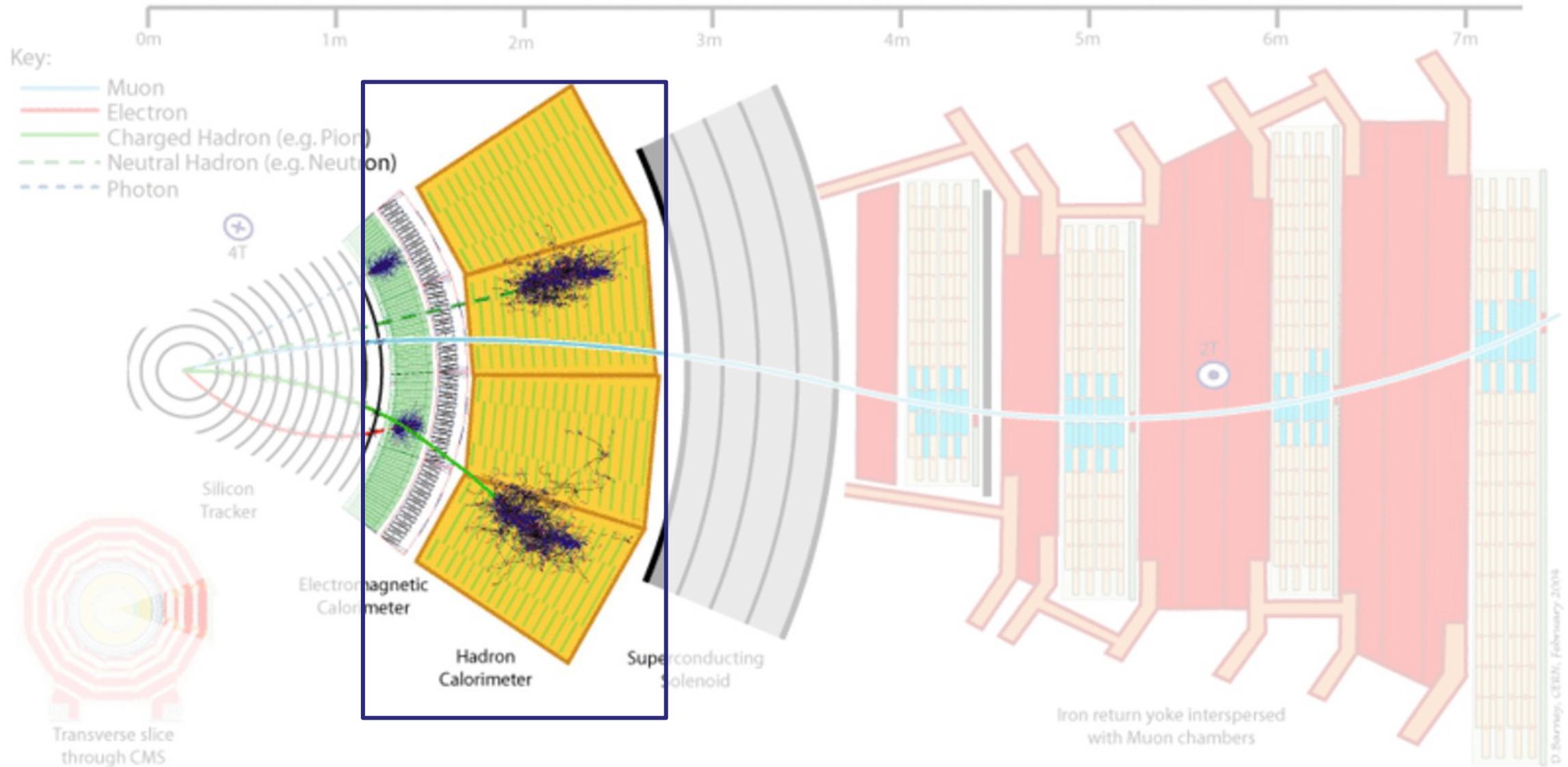


# Detector de partículas



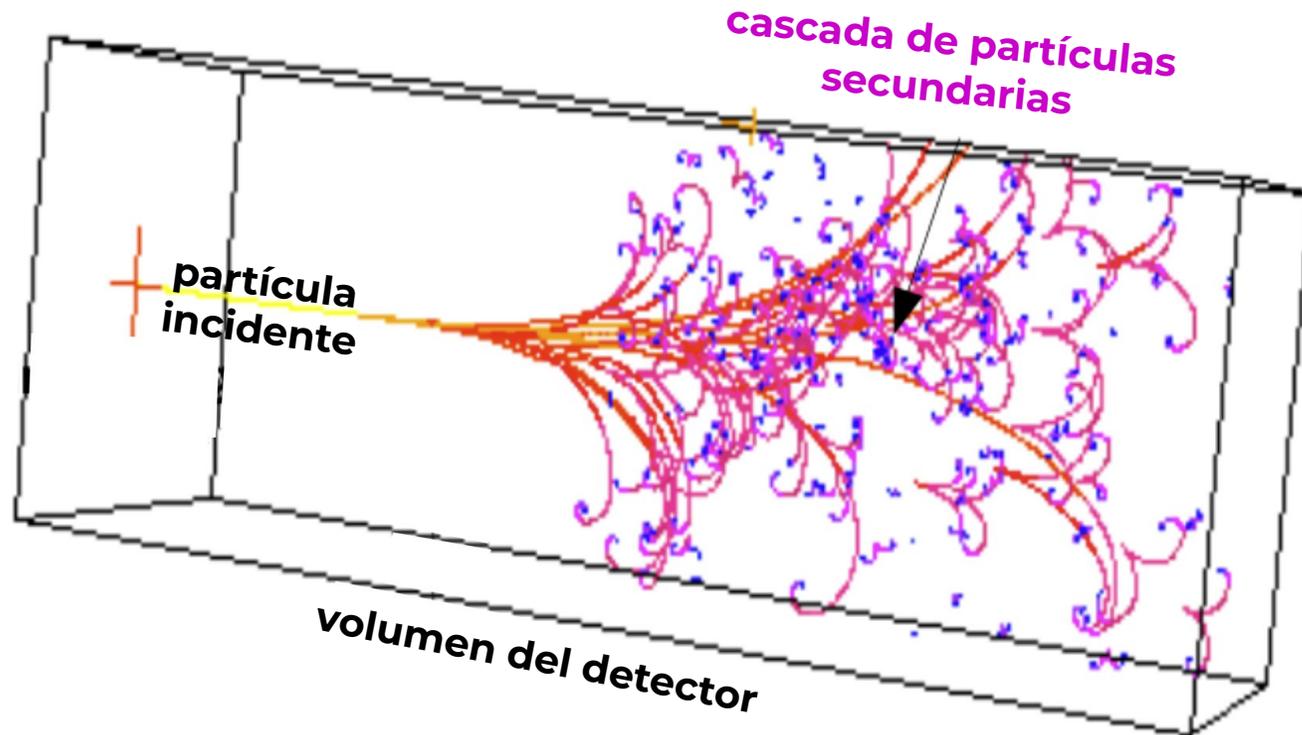


# Detector de partículas



# Clasificación de calorímetros





- La partícula incidente producirá una **cascada** de N-partículas secundarias (SHOWER). Cada partícula secundaria deposita energía y produce más partículas, hasta que la energía total ha sido absorbida por el calorímetro.
- La composición y dimensiones de la cascada depende del tipo y energía de la partícula incidente ( $e^\pm$ , fotón, hadrón, etc).

En práctica: la señal del calorímetro  $\propto$  energía depositada  $\propto$  energía de la partícula incidente



# Tipos de calorímetros

Tipos de  
cascadas  
(SHOWERS)

electromagnéticos

hadronicos

Por  
construcción

homogéneos

de muestreo  
(SAMPLING)

electromagnéticos



# Principales procesos de interacción

Partículas cargadas	Ionización, Bremsstrahlung, Dispersión múltiple,	efecto Cherenkov, radiación de transición, interacciones nucleares.
Partículas neutras	Fotones	Efecto fotoeléctrico, efecto Compton, producción de pares $e^+e^-$ .
	Hadrones	de alta energía: interacciones nucleares, de energía baja/moderada: dispersión, absorción, fisión.
	Neutrinos	Interacciones débiles

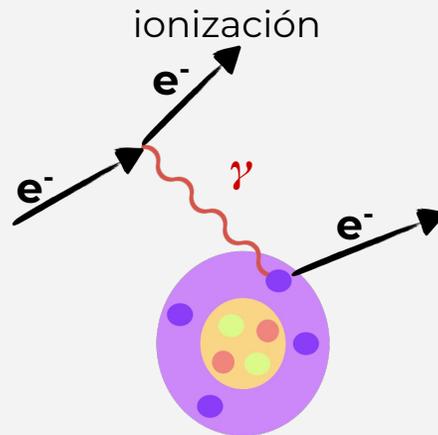




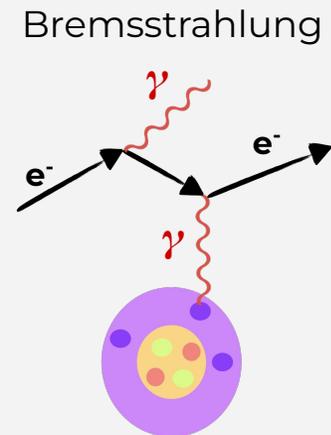
# Cascadas electromagnéticas

$e^+/e^-$

energías bajas

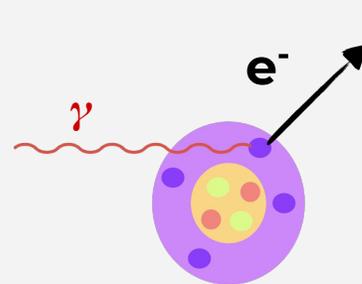


energías altas

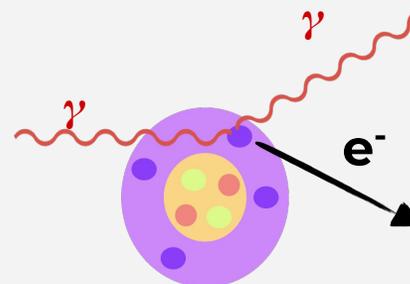


fotón

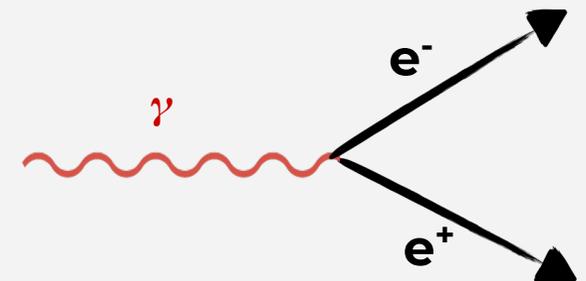
efecto fotoeléctrico



efecto Compton

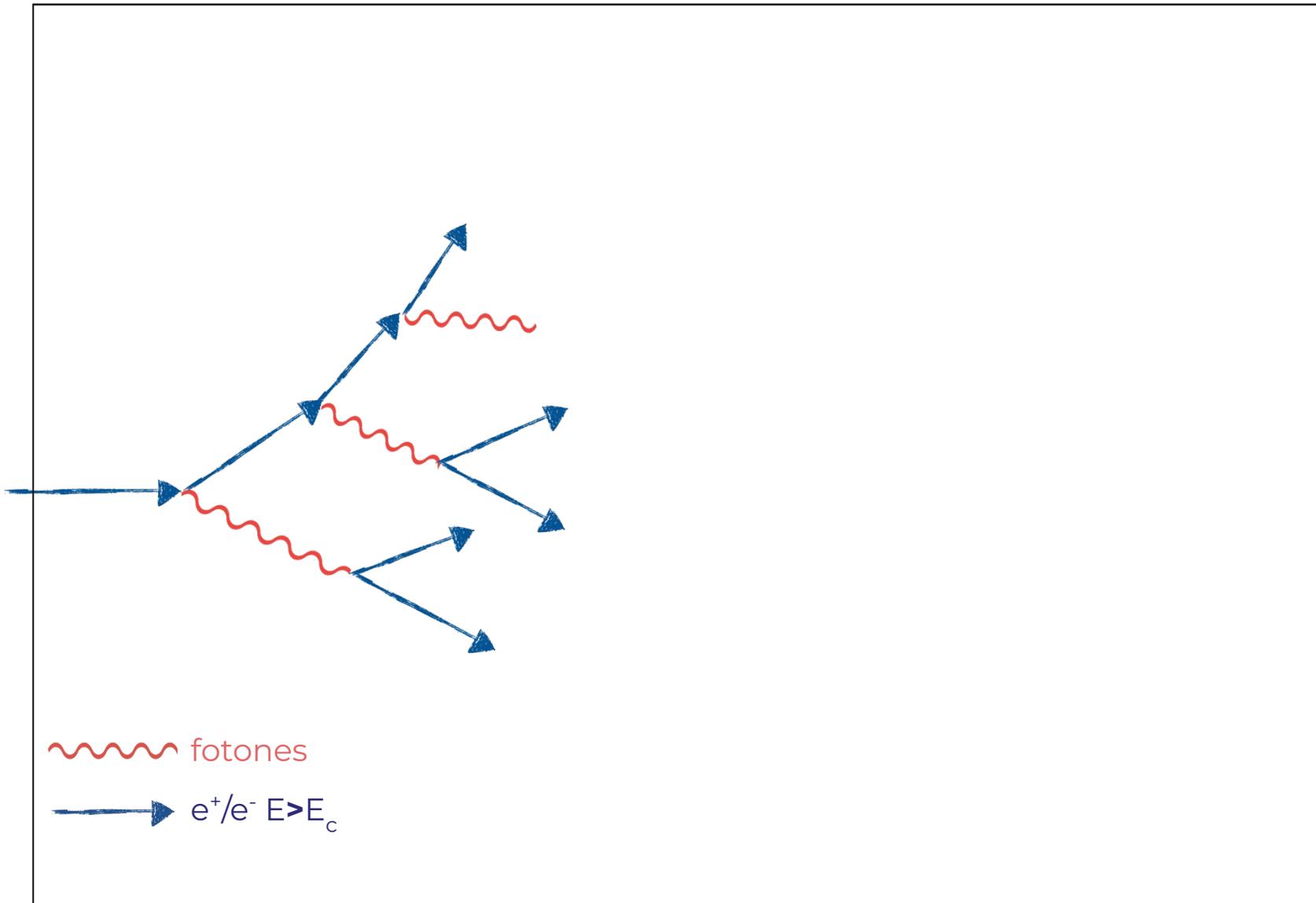


producción de pares





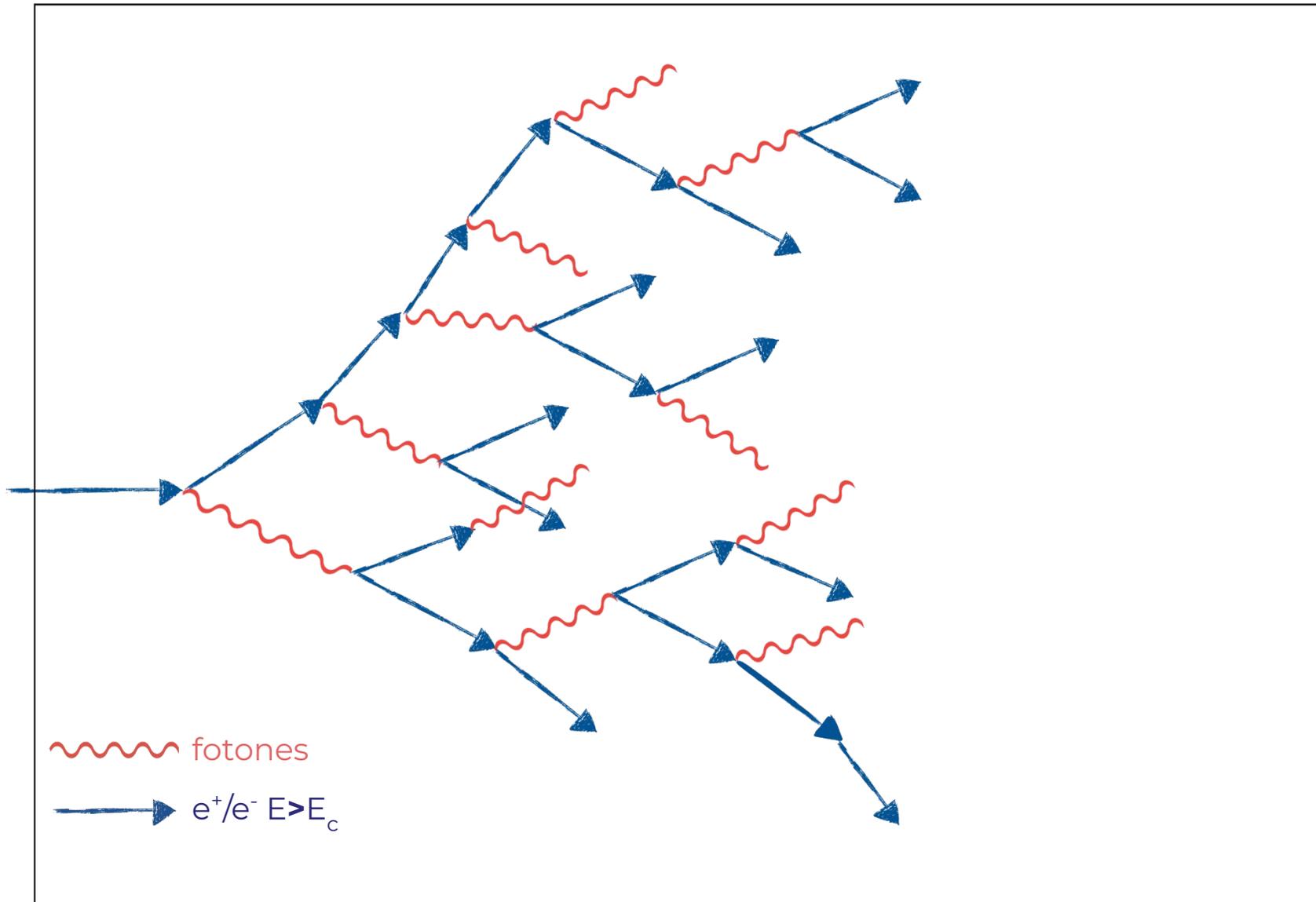
# Cascadas electromagnéticas



- Electrones/positrones incidentes emite un fotón por bremsstrahlung.
- El fotón produce un par  $e^+e^-$  (producción de pares).



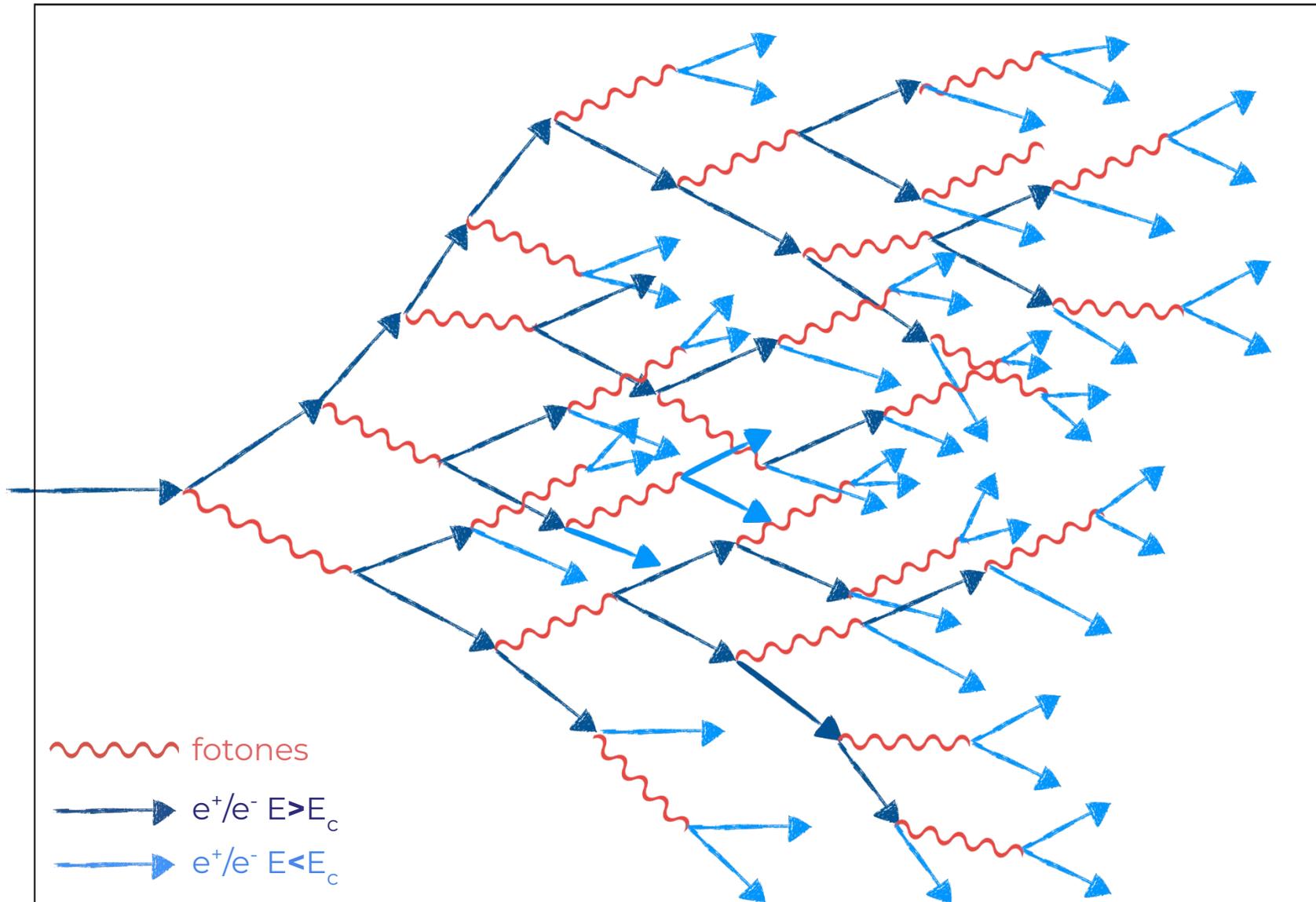
# Cascadas electromagnéticas



- Electrones/positrones incidentes emite un fotón por bremsstrahlung.
- El fotón produce un par e<sup>+</sup>e<sup>-</sup> (producción de pares).
- Así, sucesivamente...
- De este modo, la partícula incidente crea una cascada de electrones y fotones de menor energía.
  - Número de partículas es proporcional a la energía inicial.



# Cascadas electromagnéticas



- Electrones/positrones incidentes emite un fotón por bremsstrahlung.
- El fotón produce un par  $e^+e^-$  (producción de pares).
- Así, sucesivamente...
- De este modo, la partícula incidente crea una cascada de electrones y fotones de menor energía.
  - Número de partículas es proporcional a la energía inicial.
- Cuando la energía crítica,  $E_c$ , es alcanzada, las partículas secundarias son detenidas (electrones) o absorbidas (fotones).
  - electrones pierden energía via ionización; fotones via dispersión Compton y efecto fotoeléctrico.



# Modelo simplificado

$E_c$  = energía crítica

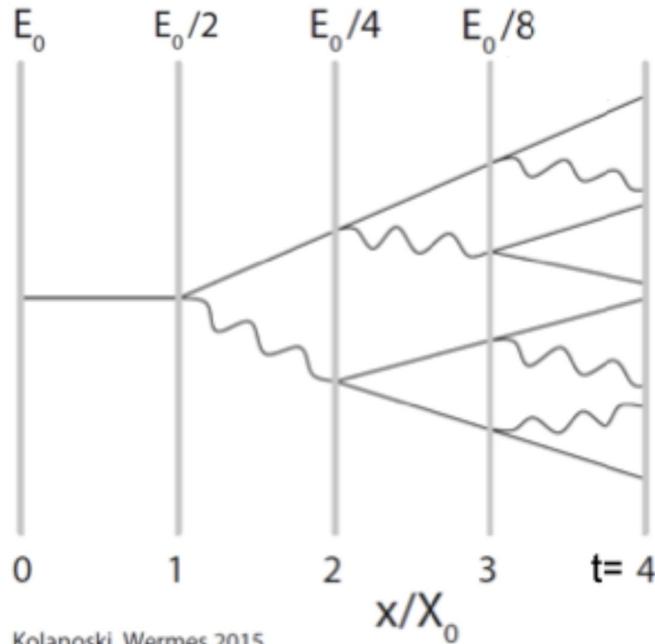
Asumimos:

- Para  $E > E_c$ , no hay pérdida de energía por ionización.
- Para  $E < E_c$ , la pérdida de energía es solo por ionización.

Un modelo de cascada simplificada:

- Después de  $t$  ( $x/X_0$ ), tenemos  $N=2^t$  partículas,
- cada una con energía  $E = E_0/2^t$ .
- La cascada se detiene si  $E < E_c$ ,
- Número máximo de partículas:  $N_{\max} = E_0 / E_c$

$$E_c = \frac{E_0}{2^{t_{\max}}} \qquad t_{\max} = \frac{\ln(E_0/E_c)}{\ln 2}$$



Kolanoski, Wermes 2015

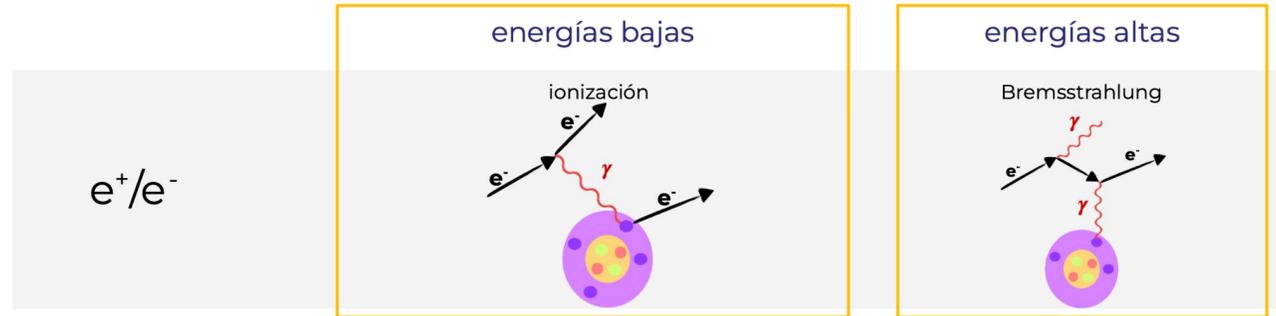
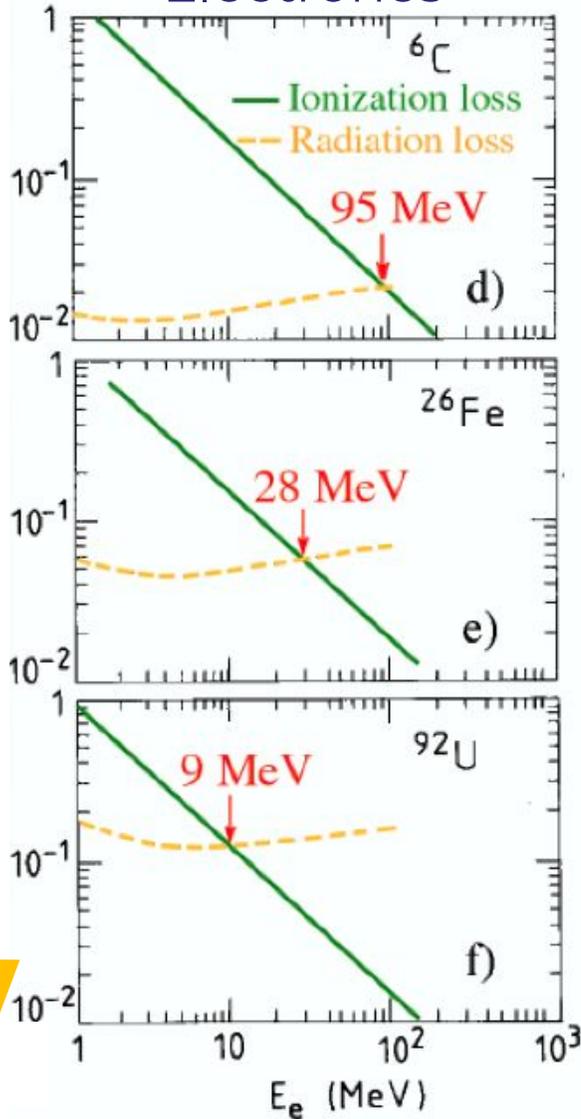
¿Qué aprendemos?

- $N_{\max}$ , el número de partículas, es lineal con respecto a la energía.
- $t_{\max}$ , la profundidad de la cascada, es logarítmica con respecto a la energía.



# Energía crítica

## Electrones



- **Energía crítica:** es la energía del electrón en la cual la pérdida de energía por ionización es igual a la pérdida de energía por Bremsstrahlung.

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ionización}} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{Bremsstrahlung}}$$

$$E_c^{\text{gas}} = \frac{710 \text{ MeV}}{Z + 0.92} \quad E_c^{\text{sol/liq}} = \frac{610 \text{ MeV}}{Z + 1.24}$$

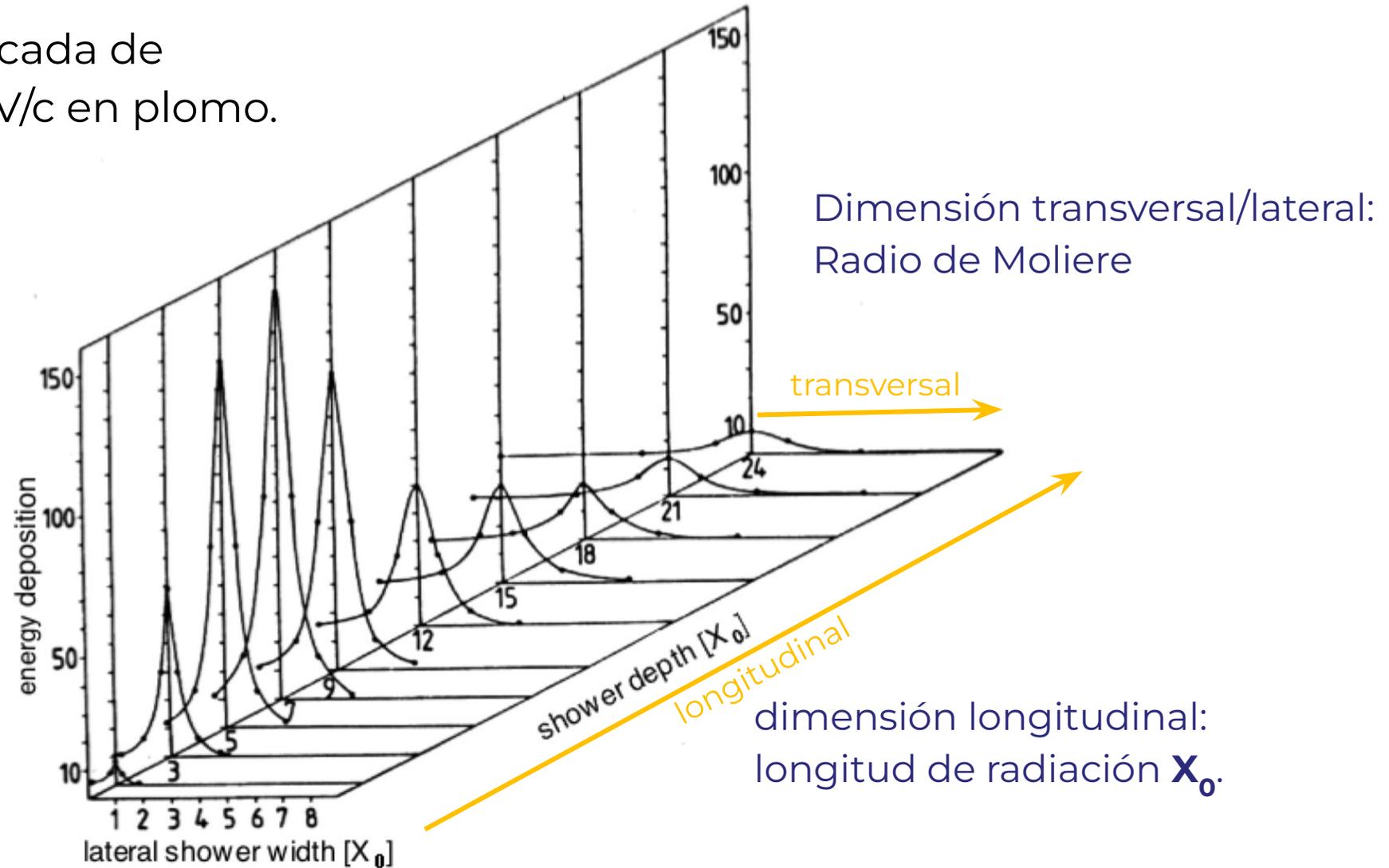
*aproximaciones*

- Dependerá del material que se use.
  - E.g. 95 MeV para carbón; 7 MeV para plomo.



# Cascadas electromagnéticas

Desarrollo de la cascada de **electrones** de 6 GeV/c en plomo.



C. Grupen, Teilchendetektoren, 1993.



# Longitud de radiación $X_0$

- El tamaño longitudinal de la cascada se caracteriza por la **longitud de radiación,  $X_0$** .

COMO LO  
ESTUDIARON EN LA  
CLASE 10

$$X_0 = \frac{A}{4\alpha N_A Z^2 r_e^2 \ln \frac{183}{Z^{\frac{1}{3}}}} \quad [\text{g/cm}^2]$$

**fotones:** producción de pares

$$\sigma_{\text{pair}} \approx \frac{7}{9} \left( 4\alpha r_e^2 Z^2 \ln \frac{183}{Z^{\frac{1}{3}}} \right) = \frac{7}{9} \frac{A}{N_A X_0}$$

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x} = I_0 e^{-\frac{7}{9} \frac{x}{X_0}}$$

Para fotones, después de atravesar la distancia de  $(7/9)X_0$ , su **intensidad** se ha reducido por  $(1/e)$ .  
i.e. 63% de los fotones se han convertido a pares  $e^+e^-$ .

**electrones:** Bremsstrahlung

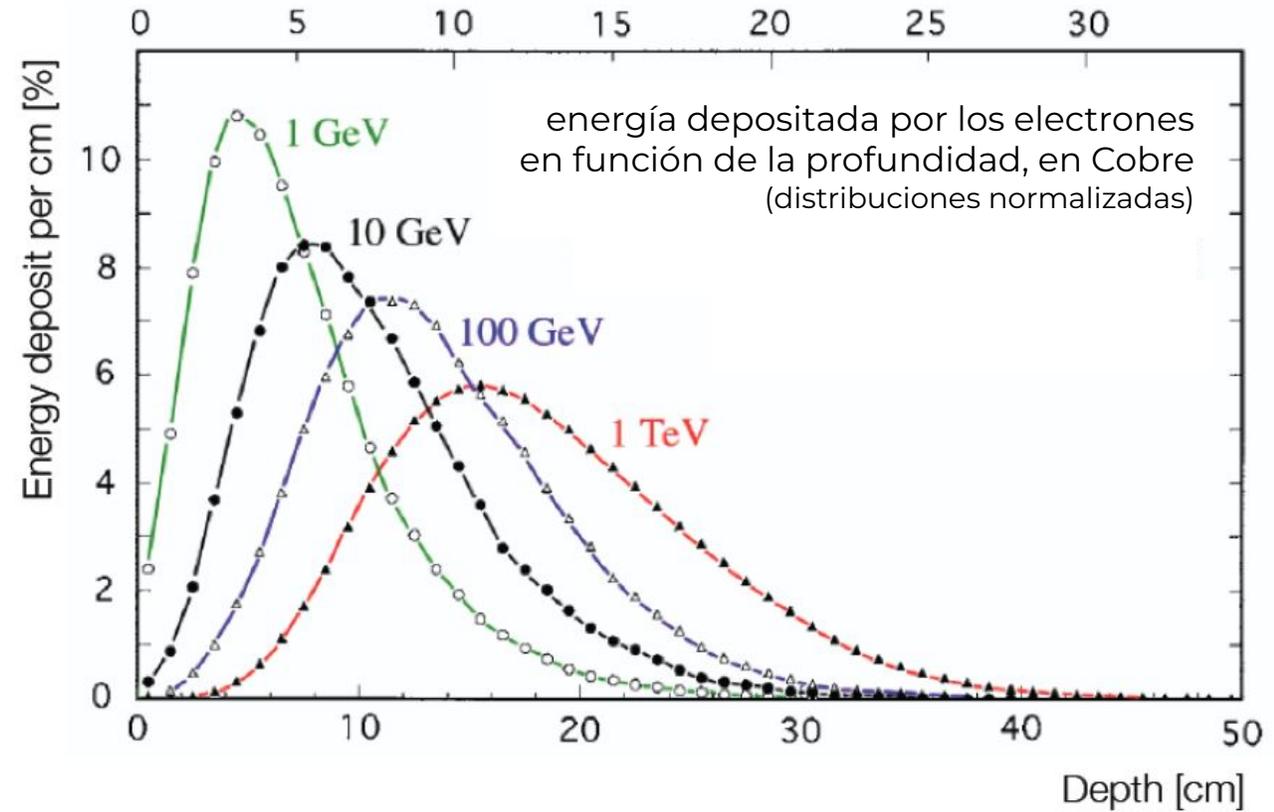
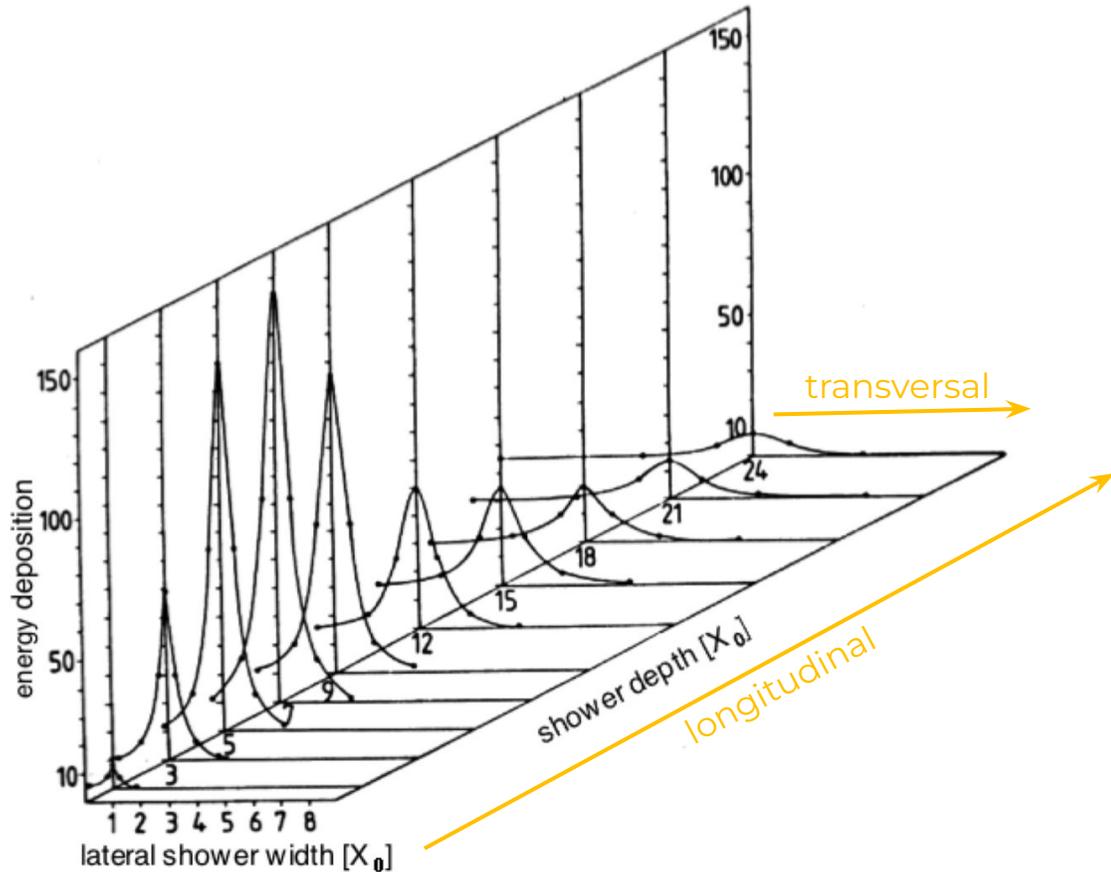
$$\frac{dE}{dx} = 4\alpha N_A \frac{Z^2}{A} r_e^2 \cdot E \ln \frac{183}{Z^{\frac{1}{3}}} = \frac{E}{X_0}$$

$$E = E_0 e^{-x/X_0}$$

Un electrón, después de atravesar  $X_0$ , tiene solo  $(1/e)$  de su **energía** inicial,  $E_0$ .  
i.e. ~37%.



# Perfil longitudinal

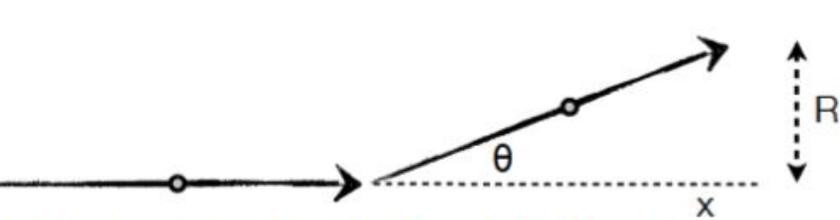


- La profundidad de la cascada (de energía depositada) incrementa logarítmicamente con la energía.
- Después del punto máximo, la cascada decae lentamente por ionización y efecto Compton.



# Radio de Molière $\rho_M$

- El tamaño transversal/lateral de la cascada se caracteriza por el **radio de Molière  $\rho_M$** .
- La cascada se va haciendo más ancha conforme penetra más el detector debido a dispersión múltiple de los electrones/positrones, y al ángulo de dispersión en la radiación Bremsstrahlung y producción de pares.



Lateral extension:  $R = x \cdot \tan\theta \approx x \cdot \theta$ , if  $\theta$  small ...

- Bremsstrahlung y producción de pares (contribución mínima).  $\langle\theta^2\rangle \approx (m/E)^2 = 1/\gamma^2$

- dispersión múltiple:  $\langle\theta\rangle = \frac{21.2 \text{ [MeV]}}{E_e} \sqrt{\frac{x}{X_0}}$   $[\beta=1, c=1, z=1]$

$$E_s = \sqrt{\frac{4\pi}{\alpha}} (m_e c^2) = 21.2 \text{ [MeV]}$$

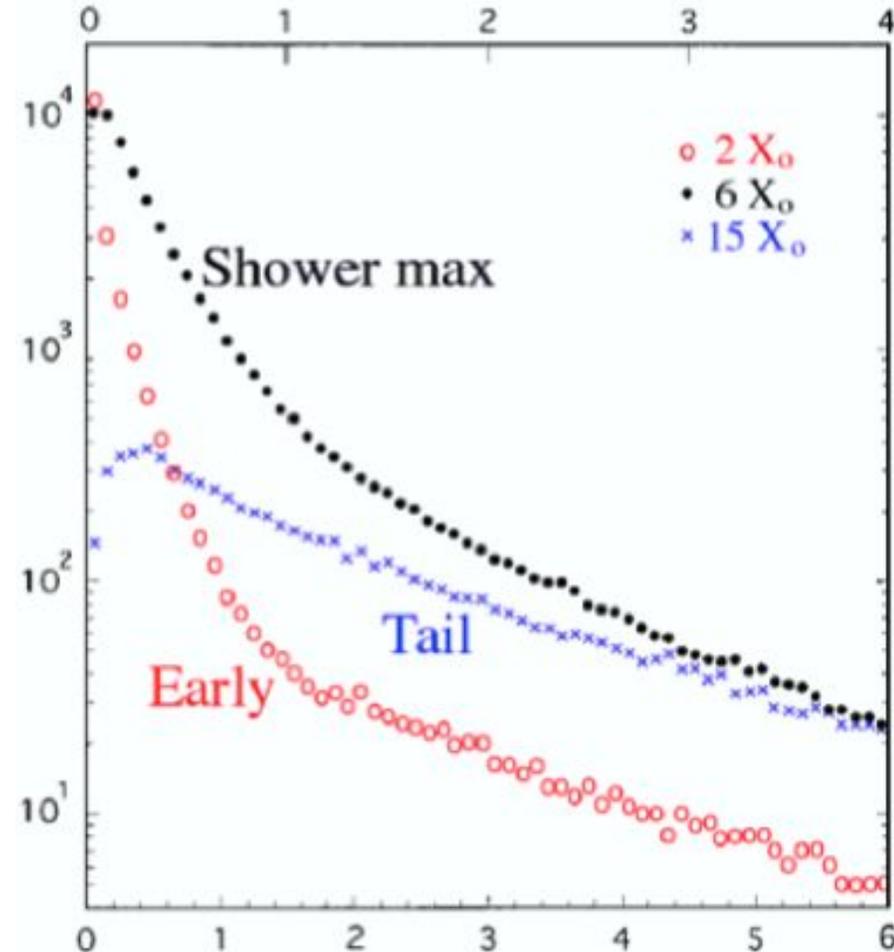
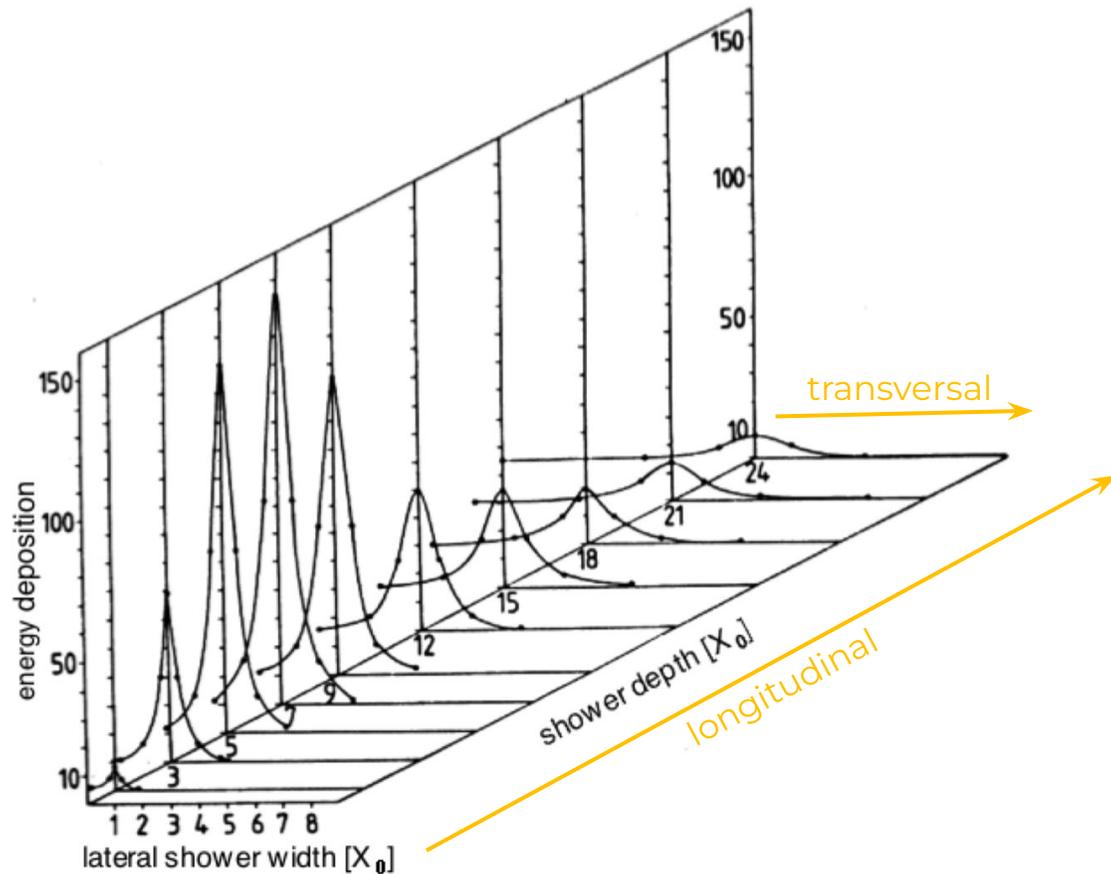
- Contribución principal viene de electrones de baja energía ( $\langle\theta\rangle \sim 1/E_e$ ), con  $E=E_c$ .
  - Si asumimos que el rango de electrones es  $X_0$ ,  $\langle\theta\rangle = 21 \text{ MeV}/E_e \rightarrow \mathbf{R = \langle\theta\rangle X_0 = (21 \text{ MeV}/E_c) X_0}$

$$\rho_M = \frac{21 \text{ [MeV]}}{E_c \text{ [MeV]}} \cdot X_0 \text{ [g/cm}^2\text{]}$$

- Es la medida de la desviación transversal de un electrón con energía E después de atravesar una longitud de radiación  $X_0$ .
- 90% de la energía de la partícula está contenida dentro de un cilindro de radio  $\rho_M$  (~95% en  $2 \rho_M$ ).



# Perfil transversal



- Al inicio de la cascada (early), el ancho se define por **dispersión múltiple** de  $e^\pm$  (~hasta el punto máximo).
- ~Después del punto máximo, el ancho lo determina los fotones de baja energía (**efecto Compton**)



# Cálculos aproximados

- Longitud de radiación:  $X_0 = \frac{180A}{Z^2} \text{ [g/cm}^2\text{]}$
- Energía crítica:  $E_c = \frac{550 \text{ [MeV]}}{Z}$   
(definition of Rossi)
- Punto máximo de la cascada:  $t_{\max} = \ln \frac{E}{E_c} - \begin{cases} 1.0 e^- \text{ induced shower} \\ 0.5 \gamma \text{ induced shower} \end{cases}$
- Contención de energía (longitudinal):  $L(95\%) = t_{\max} + 0.08Z + 9.6 \text{ [}X_0\text{]}$
- Contención de energía (transversal):  
 $R(90\%) = \rho_M$   
 $R(95\%) = 2\rho_M$



# ¿Excepciones?

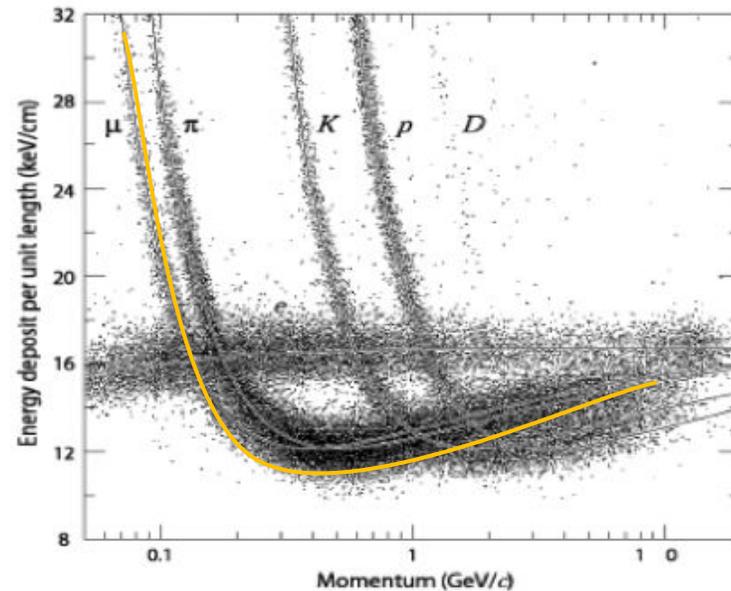
- El método de calorimetría es destructivo para *casi* todas las partículas... excepto para neutrinos (~interacción débil) y para muones... ¿o no?



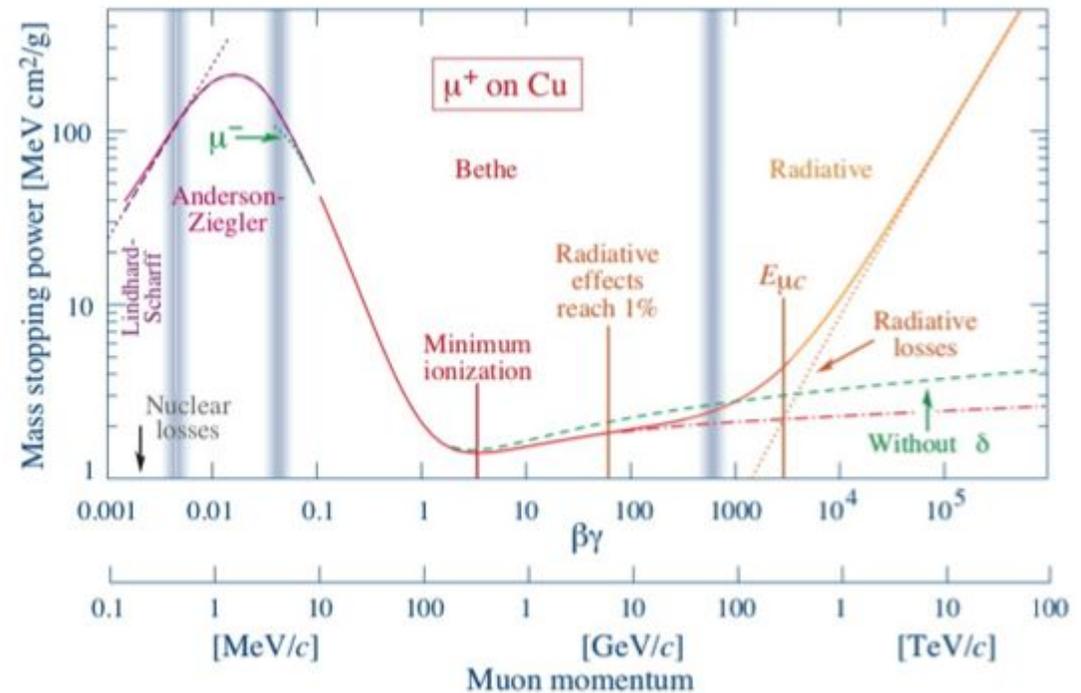
# ¿Excepciones?

- El método de calorimetría es destructivo para *casi* todas las partículas... excepto para neutrinos (~interacción débil) y para muones... ¿o no?
- Partícula pesada:  $m_\mu \gg m_e \rightarrow$  Bethe-Bloch.
  - Muones pierden energía vía ionización principalmente (no forman cascada).

$$E_c^\mu = E_c^e \left( \frac{m_\mu}{m_e} \right)^2 \approx 4 \cdot 10^4 E_c^e$$



partícula de ionización mínima



¿QUÉ PASA CON LOS MUONES?



# ¿qué pasa con los muones?

El método de calorimetría es destructivo para *casi* todas las partículas... excepto para neutrinos (no interactúan con la materia) y para muones:



- un muón de 10 GeV atravesando un material pierde energía principalmente por ionización de átomos.
- Se necesitan 9 m de hierro (8 m de plomo) para absorber toda su energía.

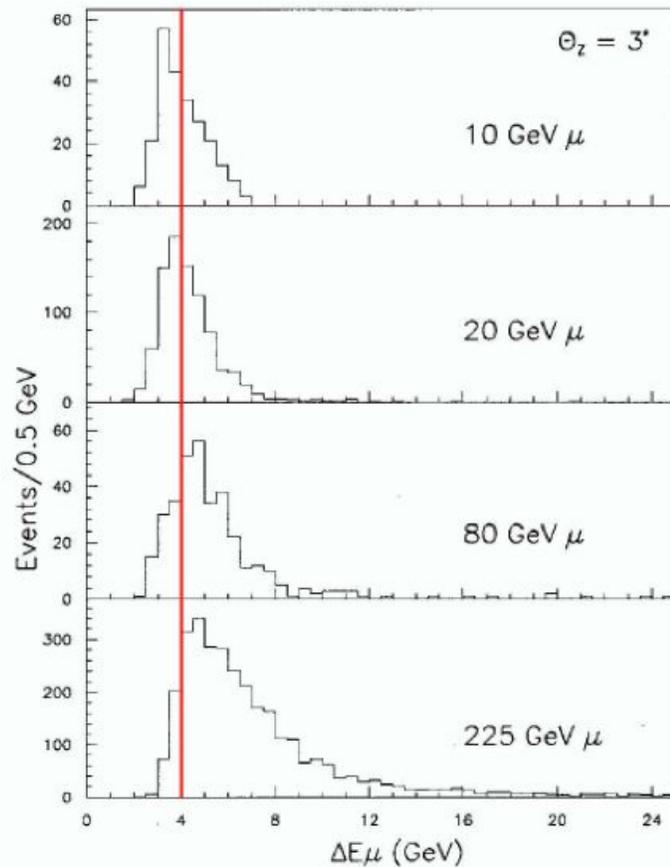


- un electrón de 10 GeV deposita su energía más eficientemente (Bremsstrahlung) y solo se necesitan 40 cm de hierro para absorber toda su energía.



# ¿qué pasa con los muones?

El método de calorimetría es destructivo para *casi* todas las partículas... excepto para neutrinos (no interactúan con la materia) y para muones:



- Para muones de muy altas energías, los efectos de la radiación si se pueden observar en los calorímetros, en particular en materiales de Z alto.
- E.g. plomo (Z=82).
  - $E_c(e^-) = 6$  MeV.
  - $E_c(\mu^-) = 250$  GeV.

FIG. 2.19. Signal distributions for muons of 10, 20, 80 and 225 GeV traversing the  $9.5\lambda_{\text{int}}$  deep SPACAL detector at  $\theta_z = 3^\circ$ . From [Aco 92c].

hadrónicos

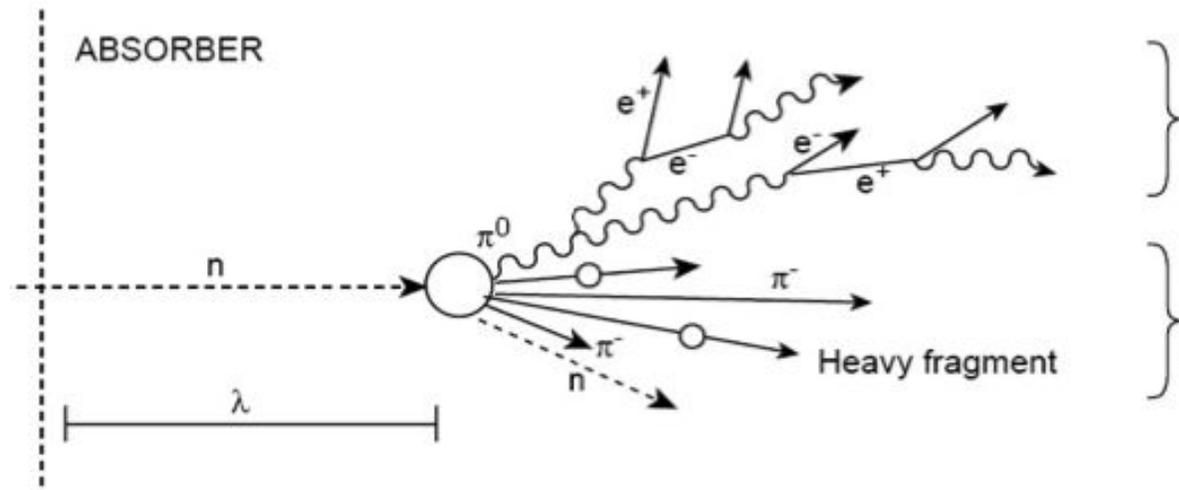


# Cascadas hadrónicas

- Calorímetros hadronicos miden la energía de hadrones neutros y cargados.
- La cascada hadrónica se desarrolla de manera similar a lo descrito antes para EM, pero las interacciones son **interacciones hadrónicas**: se produce una mezcla de hadrones neutros y cargados.
  - Los  $\pi^0$  decaen a fotones, por lo que también habrá una *cascada electromagnética*.
  - Los hadrones cargados tendrán mayor penetración en el detector creando interacciones hadrónicas secundarias.
  - Una parte considerable de la energía se va en ruptura nuclear, evaporación de neutrones/protones del núcleo. Esto no se puede medir, lo que deja ~20-40% de energía perdida.
- El tamaño de la cascada es proporcional a la longitud de absorción nuclear,  $\lambda_a$ .
  - Son más gruesas y largas que las electromagnéticas.
  - Los calorímetros hadronicos necesitan ser más grandes: la longitud de absorción nuclear,  $\lambda_a$ , el equivalente a  $X_0$  (longitud de radiación) en la interacción fuerte es ~5-10 veces más grande que  $X_0$ .



# Cascadas hadrónicas



- **Componente electromagnético:**

- electrones, fotones,
- $\pi^0 \rightarrow 2$  fotones

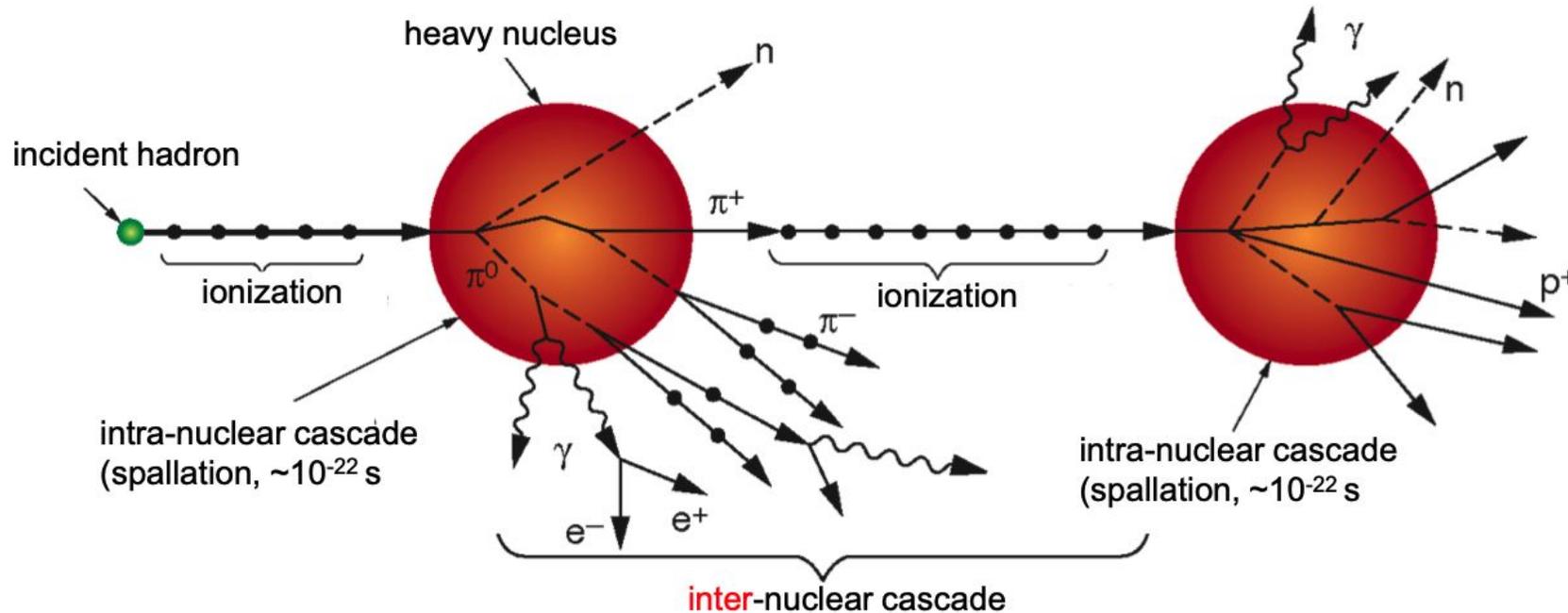
- **Componente hadrónico:**

- hadrones cargados:  $\pi^\pm$ ,  $K^\pm$ .
- fragmentos nucleares,  $p$ ,
- neutrones, neutrinos, fotones de baja energía,
- ruptura de núcleos.



# Cascadas hadrónicas

- La cascada es una serie de interacciones hadrónicas inelásticas de la partícula incidente con los núcleos del material del detector. Las partículas secundarias, tendrán más interacciones inelásticas y producirán más partículas...
- Interacciones elásticas no producen partículas secundarias, así que no contribuyen a la cascada.



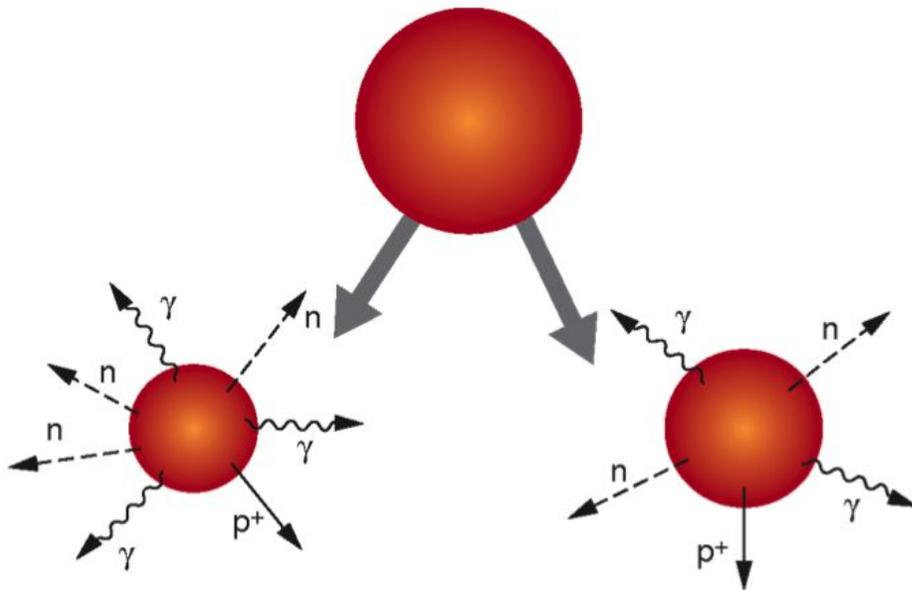
cascada **intra-nuclear**: componentes del núcleo reciben suficiente energía para interactuar entre ellos (producen  $\pi$  u otros hadrones).

cascada **inter-nuclear**: partículas que escapan un núcleo interaccionan con otro núcleo.

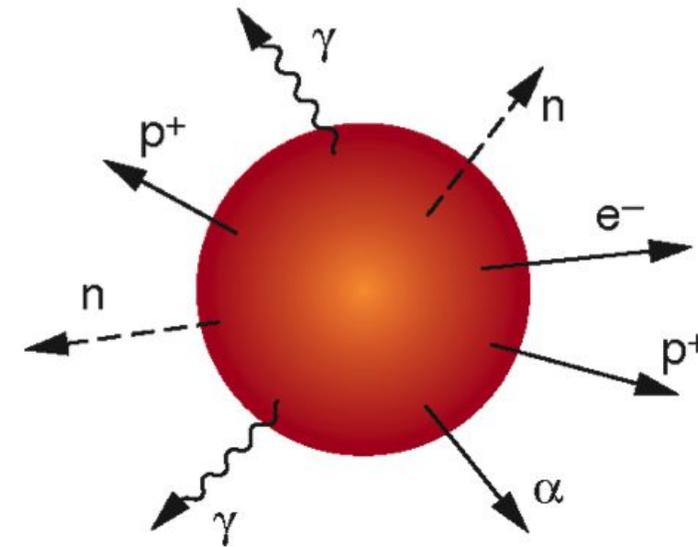


# Cascadas hadrónicas

- La cascada es una serie de interacciones hadrónicas inelásticas de la partícula incidente con los núcleos del material del detector. Las partículas secundarias, tendrán más interacciones inelásticas y producirán más partículas...
- Interacciones elásticas no producen partículas secundarias, así que no contribuyen a la cascada.



**fisión:** en elementos pesados (e.g.  $^{238}\text{U}$ ), el núcleo decae en 2-3 'escombros' nucleares; adicionalmente, fotones y neutrones son emitidos.



**evaporación** nuclear: núcleos excitados emiten partículas hasta que la energía de excitación está por debajo de la energía de unión (binding) de los componentes del núcleo

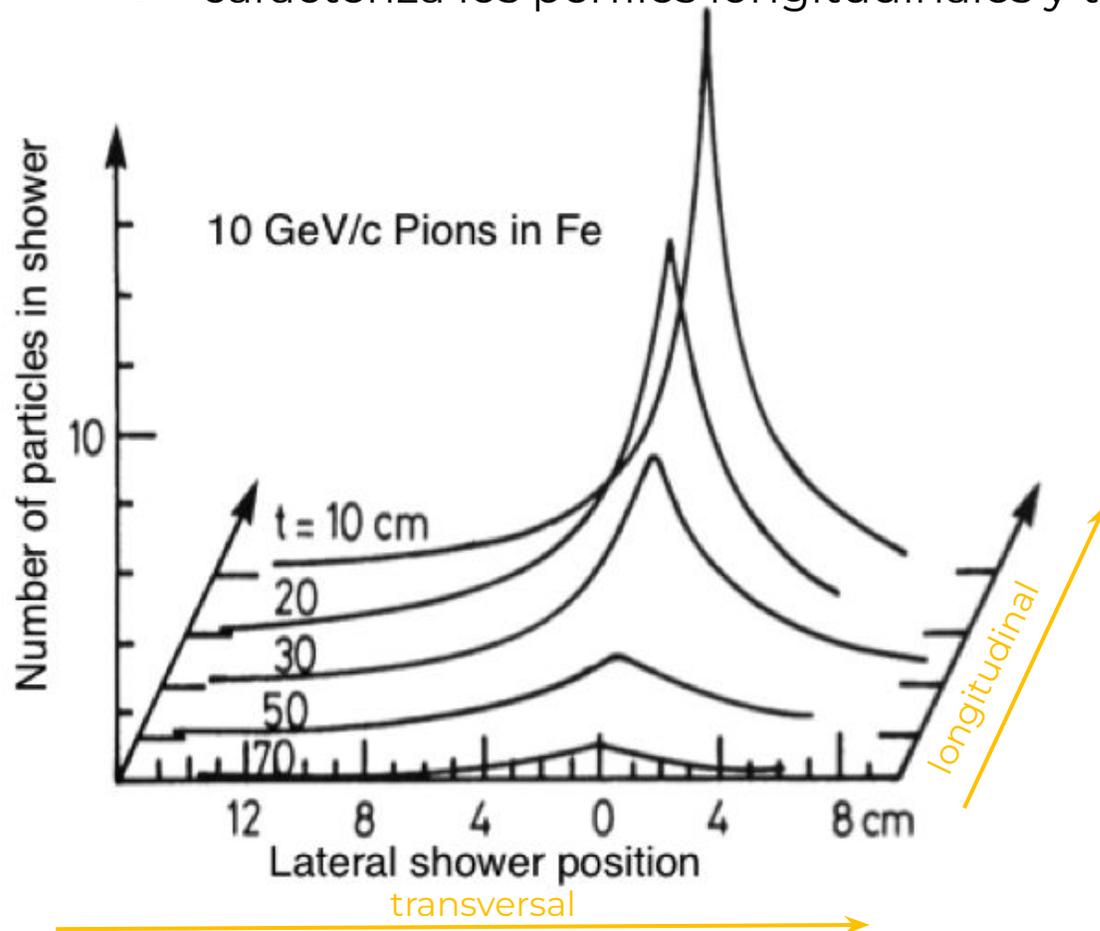


# Perfil transversal

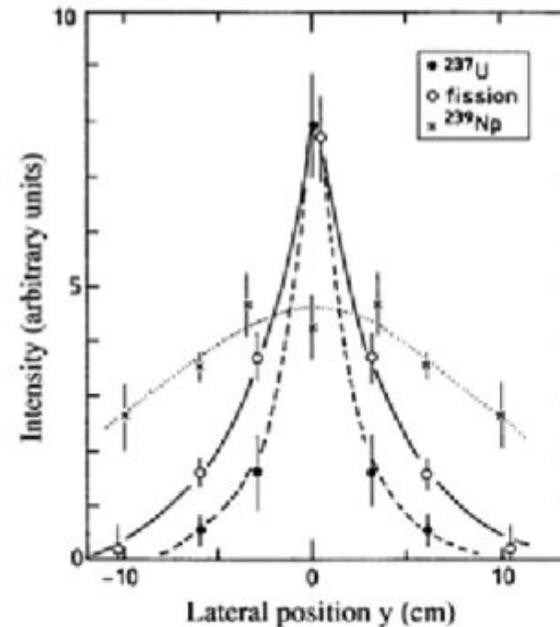
- Longitud de interacción nuclear,  $\lambda_a$ .
  - Análogo a la longitud de radiación,  $X_0$ ;
  - una orden de magnitud mayor.
  - caracteriza los perfiles longitudinales y transversales.

$$\lambda_a = \frac{1}{\sigma_{\text{total}} \cdot n} = \frac{A}{\sigma_{pp} A^{2/3} \cdot N_A \rho}$$

$$\lambda_a \approx 35 \text{ [g/cm}^2\text{]} \cdot A^{1/3}$$



- Contención transversal  $\sim 95\%$  en  $1 \lambda_a$ .



- Midiendo la radioactividad:
  - fisión: componente neutral.
  - $^{237}\text{U}$ : componente electromagnético (centro bien definido).
  - $^{239}\text{Np}$ : componente termal-neutron (libres).



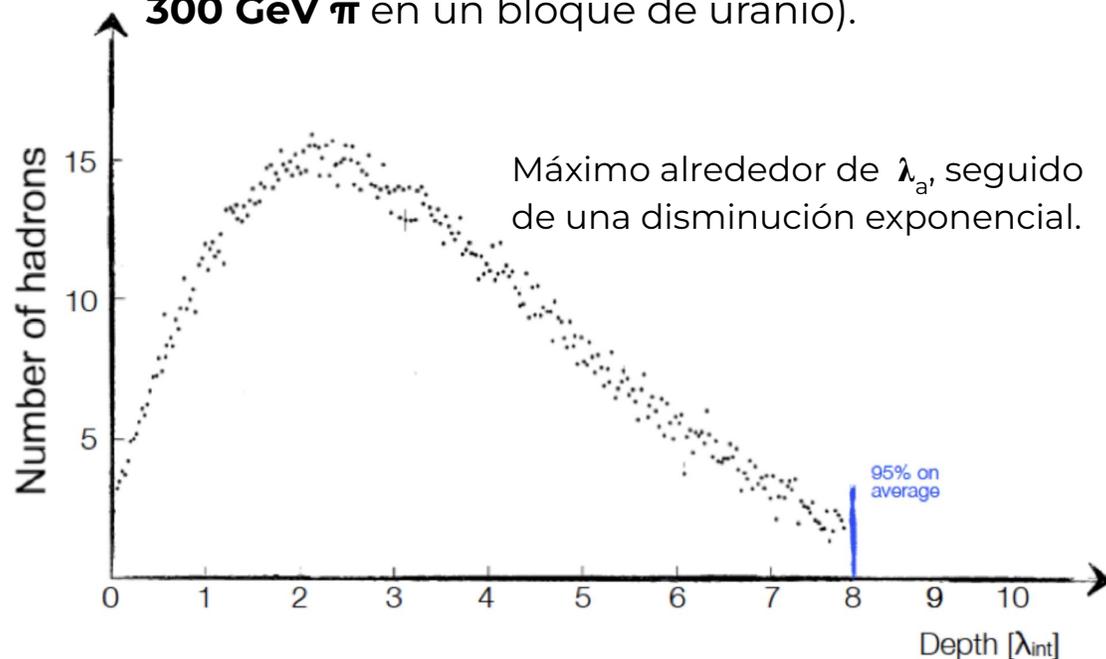
# Perfil longitudinal

- Longitud de interacción nuclear,  $\lambda_a$ .
  - Análogo a la longitud de radiación,  $X_0$ ;
  - una orden de magnitud mayor.
  - caracteriza los perfiles longitudinales y transversales.

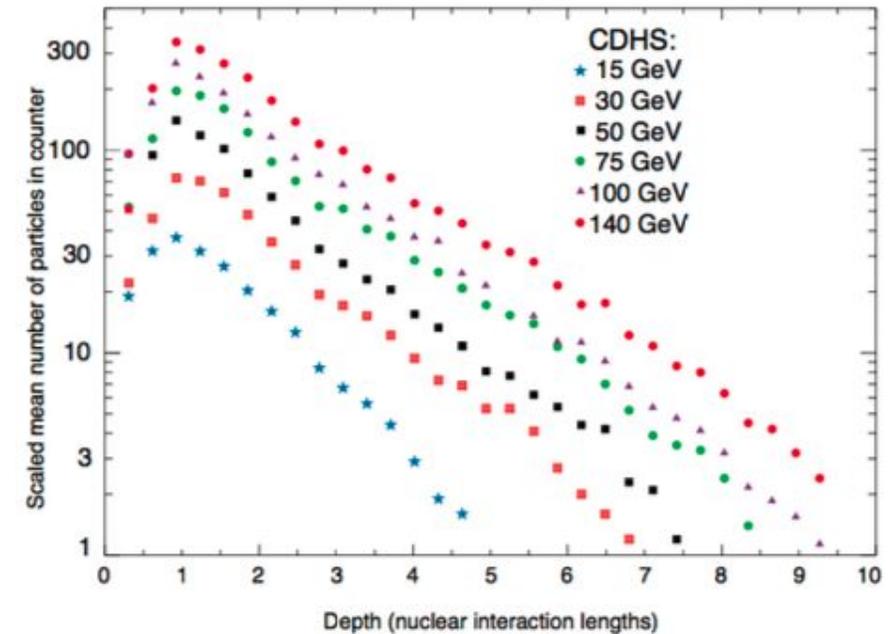
$$\lambda_a = \frac{1}{\sigma_{\text{total}} \cdot n} = \frac{A}{\sigma_{pp} A^{2/3} \cdot N_A \rho}$$

$$\lambda_a \approx 35 \text{ [g/cm}^2\text{]} \cdot A^{1/3}$$

Perfil longitudinal de la cascada hadrónica  
**300 GeV  $\pi$**  en un bloque de uranio).



- Contención longitudinal: ~90% en 8  $\lambda_a$ .

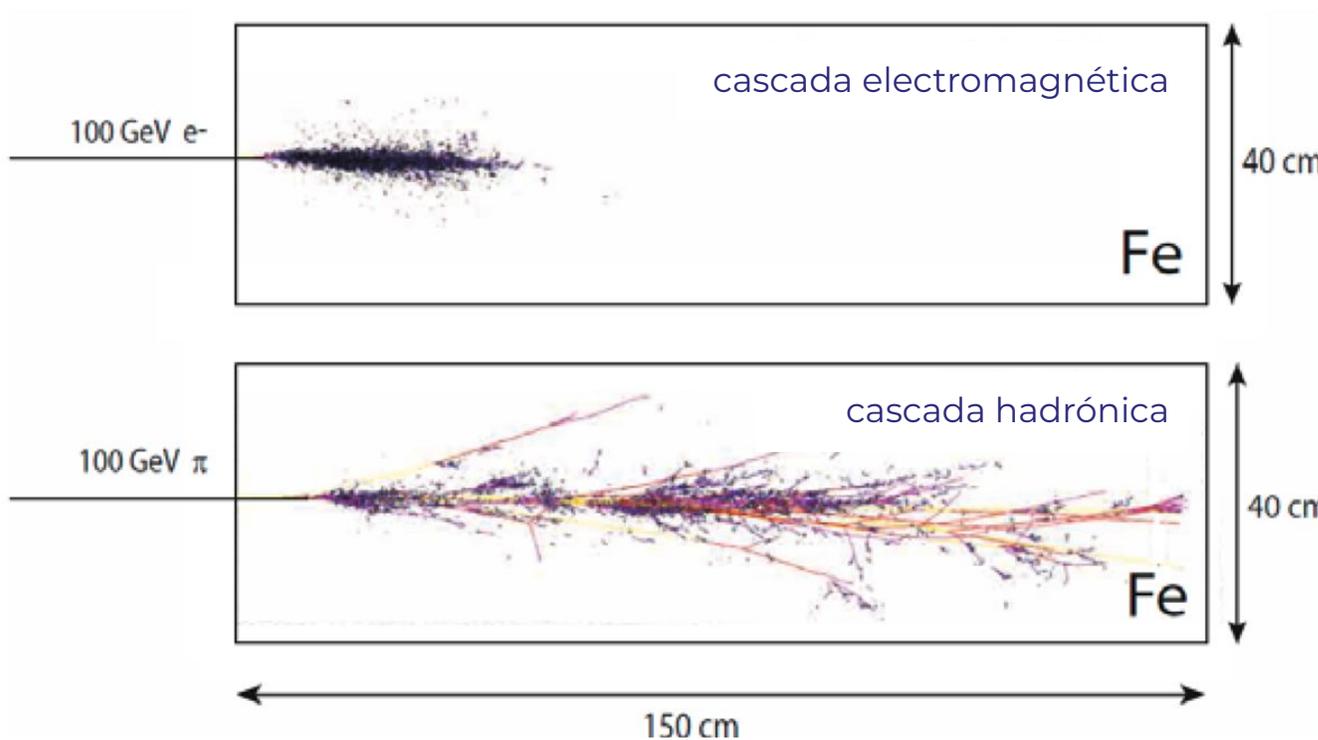


Measured shower longitudinal profiles for high energy pions in the CDHS detector.

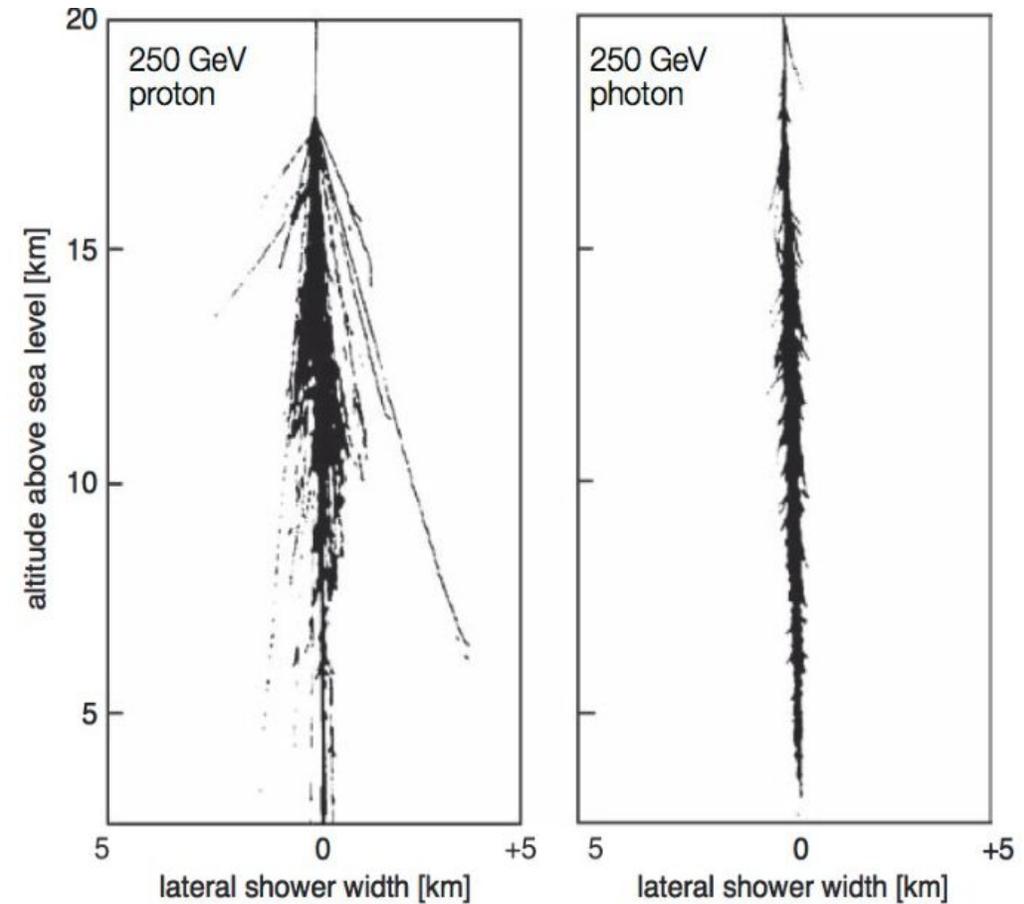


# EM vs HAD

- Las cascadas hadrónicas son más largas y anchas. Calorímetros hadronicos deben ser más grandes.
- Parte de la energía es 'invisible' (e.g. excitación nuclear), la resolución de los calorímetros hadrónicos es usualmente peor.



- Regla de oro:
  - $\sim 25 X_0$  para contener la cascada electromagnética.
  - $\sim 10 \lambda_a$  para contener la cascada hadrónica.





## Electromagnéticos

Material	$X_0$ [cm]	$\rho_M$ [cm]	$E_c$ [MeV]
Fe	1.76	1.77	21–27
Pb	0.56	1.60	7.4
U	0.32	1.00	6.8
W	0.35	0.92	8
Polystyrol	42.9	8.25	80–109
Ar	14	7.2	41.7
Si	9.36	5.28	37.6
BGO	1.12	2.33	10.2
H <sub>2</sub> O	36.10	10.9	70

## Hadrónicos

Material	$\lambda_a$ [cm]
Fe	16.8
Pb	17.1
U	10.5
Cu	15.1
Al	39.4
W	9.6
Polystyrol	79.5
Ar	83.7
Si	45.5

C. Leroy, F.-G. Rancoita, *Physics of Cascading Shower Generation and Propagation in Matter: Principles of High-Energy, Ultrahigh-Energy and Compensating Calorimetry*, Rep.Prog.Phys. **63**, 505–606 (2000).



# Tipos de calorímetros

Tipos de  
cascadas  
(SHOWERS)

electromagnéticos

hadronicos

Por  
construcción

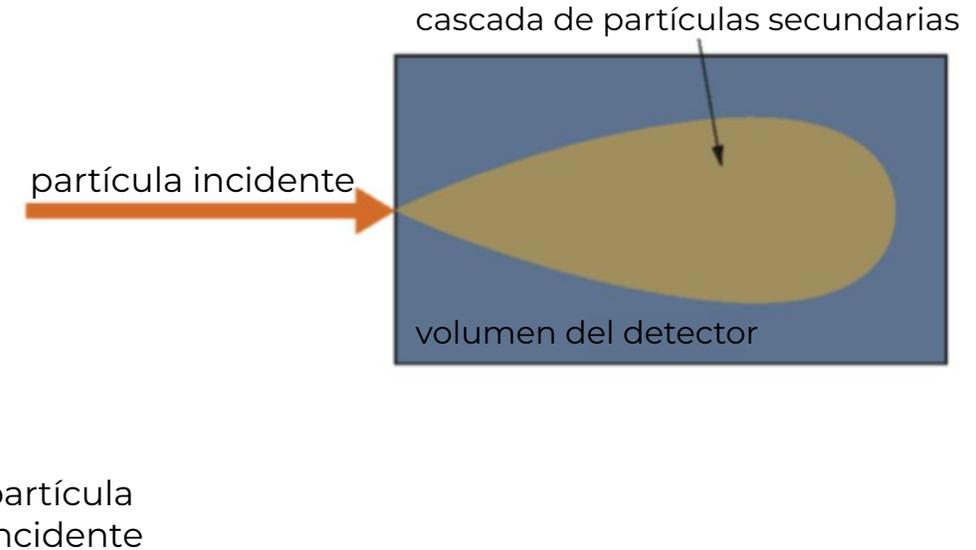
homogéneos

de muestreo  
(SAMPLING)



# Calorímetros homogéneos

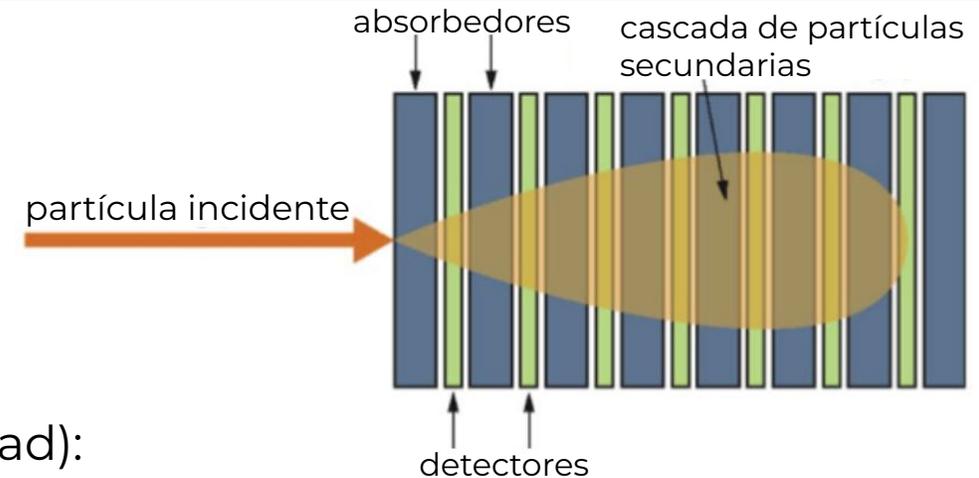
- En un calorímetro homogéneo, el material del detector funciona como material de absorción y de detección.
- Algunos ejemplos:
  - Centelladores ( $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ,  $\text{BaF}_2$ ,  $\text{CeF}_3$ ,  $\text{PbWO}_4$ ).
  - Luz de Cherenkov (vidrio de plomo).
  - Ionización (Gases nobles líquidos, Germanium).
- Pros/Cons:
  - Se puede obtener la mejor resolución de energía posible (toda la energía que se deposita se recolecta).
  - Pero, pueden ser muy caros (la densidad del material tiende a ser baja, así que el tamaño incrementa).
- Calorímetros homogéneos solo son usados como calorímetros electromagnéticos.





# Calorímetros de muestreo

- Un calorímetro de muestreo (SAMPLING) consiste en capas alternantes de absorbedores pasivos (material denso) para el desarrollo de la cascada y detectores activos (para recolectar la señal).
- Ejemplos de materiales pasivo, absorbedores, (alta densidad):
  - Fe, Pb, U.
- Ejemplos de materiales activos.
  - Señal en forma de luz: Centelladores plásticos,
  - Señal en forma de carga eléctrica: detectores de silicon, detectores de gas, cámaras de ionización de gases nobles líquidos.
- Pros/Cons:
  - El absorbedor pasivo es barato, es fácil tener segmentación transversal y longitudinal.
  - Pero, solo la energía del material activo se puede medir lo que empeora la resolución de energía.





# Tipos de calorímetros

## Tipos de cascadas (SHOWERS)

**electromagnéticos**  
medir electrones y fotones a través de sus interacciones electromagnéticas.

**hadronicos**  
se usan para medir hadrones a través de sus interacciones fuertes y electromagnéticas.

## Por construcción

**homogéneos**  
se construyen de un solo material que realiza las dos tareas: degradación de energía y generación de señal.

(SAMPLING)

## de muestreo

consiste en capas alternantes de un absorbedor, un material denso que degrada la energía de la partícula incidente, y un medio activo que proporciona una señal detectable.

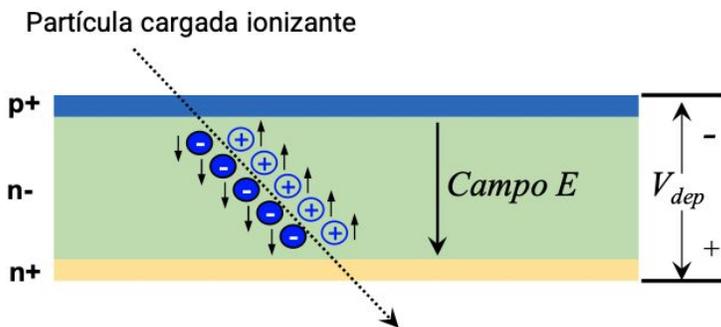
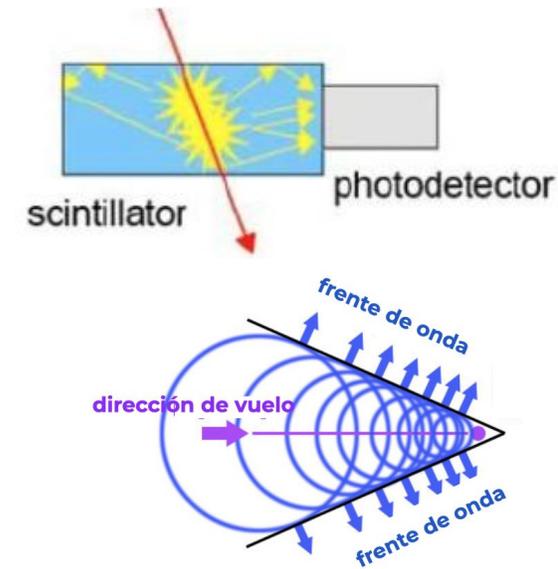
# Técnicas de detección





# Tipos de calorímetros

- La energía depositada produce **luz**.
  - e.g. centelladores, detectores de Cherenkov.
  - la luz se convierte a corriente eléctrica (foto-multiplicadores, fotodiodos).



- Colectar la **carga** directamente.
  - de la ionización en gases o líquidos nobles.
  - de pares electrón/hoyo en semiconductores.

- Medir incrementos de **temperatura** *muy pequeños*.
  - Bolómetros (siguiente clase).

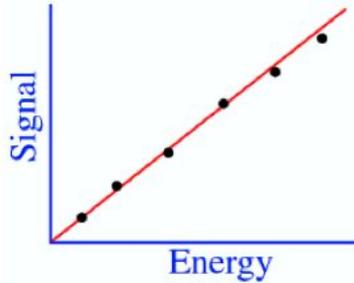
# Medición de energía





# Medición

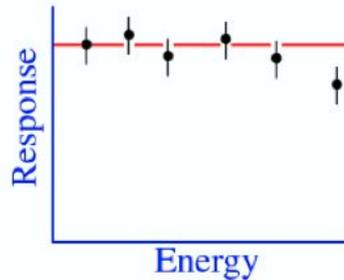
- Para hacer la medición de energía en un calorímetro se necesita:
  - relación entre la señal medida y la energía depositada.



Respuesta del detector → **linealidad**.

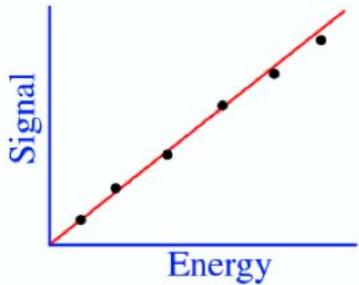
- energía promedio de la señal calorimétrica vs la energía de la partícula.
- compensación (para calorímetros hadrónicos).

- precisión con la cual la energía desconocida se puede medir.



Precisión del detector → **fluctuaciones**.

- variaciones de la señal de evento a evento.
- limitantes en la precisión de la medición depende de la energía.



- Un calorímetro lineal tiene respuesta constante.
  - Calorímetros EM son lineales
    - toda la energía es depositada vía ionización/excitación del material absorbente.
  - Calorímetros hadrónicos... no tanto.
- 
- Causas de no-linealidad:
    - Defectos instrumentales: saturación de detectores de gas, centelladores, etc.
    - La respuesta cambia en función de la energía: la energía depositada se mide según la profundidad (la cual es diferente según la energía).
    - Fugas.
  - Calibración:
    - Inyección de fuentes de luz, uso de fuentes radiactivas, rayos de partículas.



# Resolución de la energía

- La resolución de la energía medida depende de las fluctuaciones de los depósitos de energía y el proceso de medición.

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{S}{\sqrt{E}} \oplus \frac{n}{E} \oplus C$$

$$a \oplus b = a^2 + b^2$$

- Término **estocástico**:

- fluctuaciones de Poisson.
- E es proporcional al número de partículas N:
- fluctuaciones de muestreo.

$$\frac{\sigma_N}{N} = \frac{\sqrt{N}}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}} \rightarrow \frac{\sigma_E}{E} \propto \frac{1}{\sqrt{E}}$$

- **Ruido (n)**:

- de la electrónica u otras partículas, fluctuaciones por el pile-up.
- independiente de la energía de las partículas.

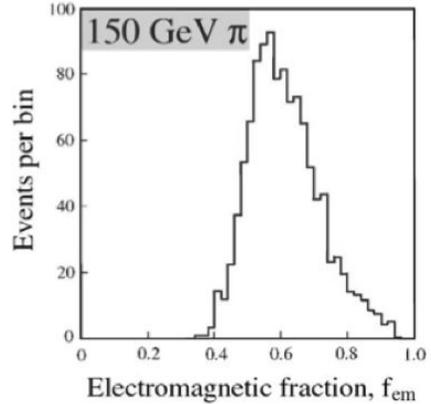
- **Constante**:

- Fugas, falta de uniformidad (en la construcción, temperatura, calibración).

**en altas energías,  
el factor  
dominante!**



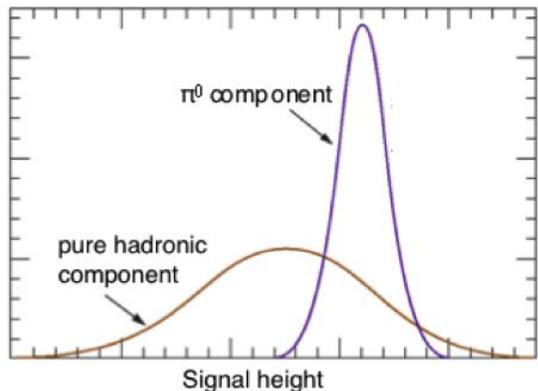
# Fluctuaciones en cascadas hadrónicas



R. Wigmans, EDIT, CERN, 2011

- La fracción de energía electromagnética aumenta con la energía, y varía de evento a evento (se determina en las primeras interacciones).

- Una parte considerable de la energía depositada es ‘invisible’.
  - unión nuclear (~15-30%), evaporación de neutrones (5-10%), producción de neutrinos, muones de alta energía, etc.



- No-linealidad por una respuesta diferente a los componentes electromagnéticos y hadrónicos.
  - Respuesta del calorímetro al componente EM > componente HAD.
  - figura de mérito: **e/h**.  $e/h = 1$  en caso ideal.



# Algunos ejemplos

Homogéneos

Experiment	Material	Energy resolution (E in GeV)
NA48	Liquid Kr	$4.8\%/\sqrt{E} \oplus 0.22\%$
BELLE	CsI(Tl)	$0.8\%/\sqrt{E} \oplus 1.3\%$
CMS	PbWO <sub>4</sub>	$2.7\%/\sqrt{E} \oplus 0.55\%^*$

Muestreo

Experiment	Detector	Detector thickness [mm]	Absorber material	Absorber thickness [mm]	Energy resolution (E in GeV)
UA1	Scintillator	1.5	Pb	1.2	$15\%/\sqrt{E}$
SLD	liquid Ar	2.75	Pb	2.0	$8\%/\sqrt{E}$
DELPHI	Ar + 20% CH <sub>4</sub>	8	Pb	3.2	$16\%/\sqrt{E}$
ALEPH	Si	0.2	W	7.0	$25\%/\sqrt{E}$
ATLAS	liquid Ar		Pb		$10\%/\sqrt{E} \oplus 0.7\%^*$
LHCb	Scintillator		Fe		$10\%/\sqrt{E} \oplus 1.5\%^*$

\* Design values



## Muestreo

Experiment	Detectors	Absorber material	$e/h$	Energie resolution (E in GeV)
UA1 C-Modul	Scintillator	Fe	$\approx 1.4$	$80\%/\sqrt{E}$
ZEUS	Scintillator	Pb	$\approx 1.0$	$34\%/\sqrt{E}$
WA78	Scintillator	U	0.8	$52\%/\sqrt{E} \oplus 2.6\%^*$
D0	liquid Ar	U	1.11	$48\%/\sqrt{E} \oplus 5\%^*$
H1	liquid Ar	Pb/Cu	$\leq 1.025^*$	$45\%/\sqrt{E} \oplus 1.6\%$
CMS	Scintillator	Brass (70% Cu / 30% Zn)	$\neq 1$	$100\%/\sqrt{E} \oplus 5\%$
ATLAS (Barrel)	Scintillator	Fe	$\neq 1$	$50\%/\sqrt{E} \oplus 3\%^{**}$
ATLAS (Endcap)	liquid Ar	Brass	$\neq 1$	$60\%/\sqrt{E} \oplus 3\%^{**}$

\* After software compensation

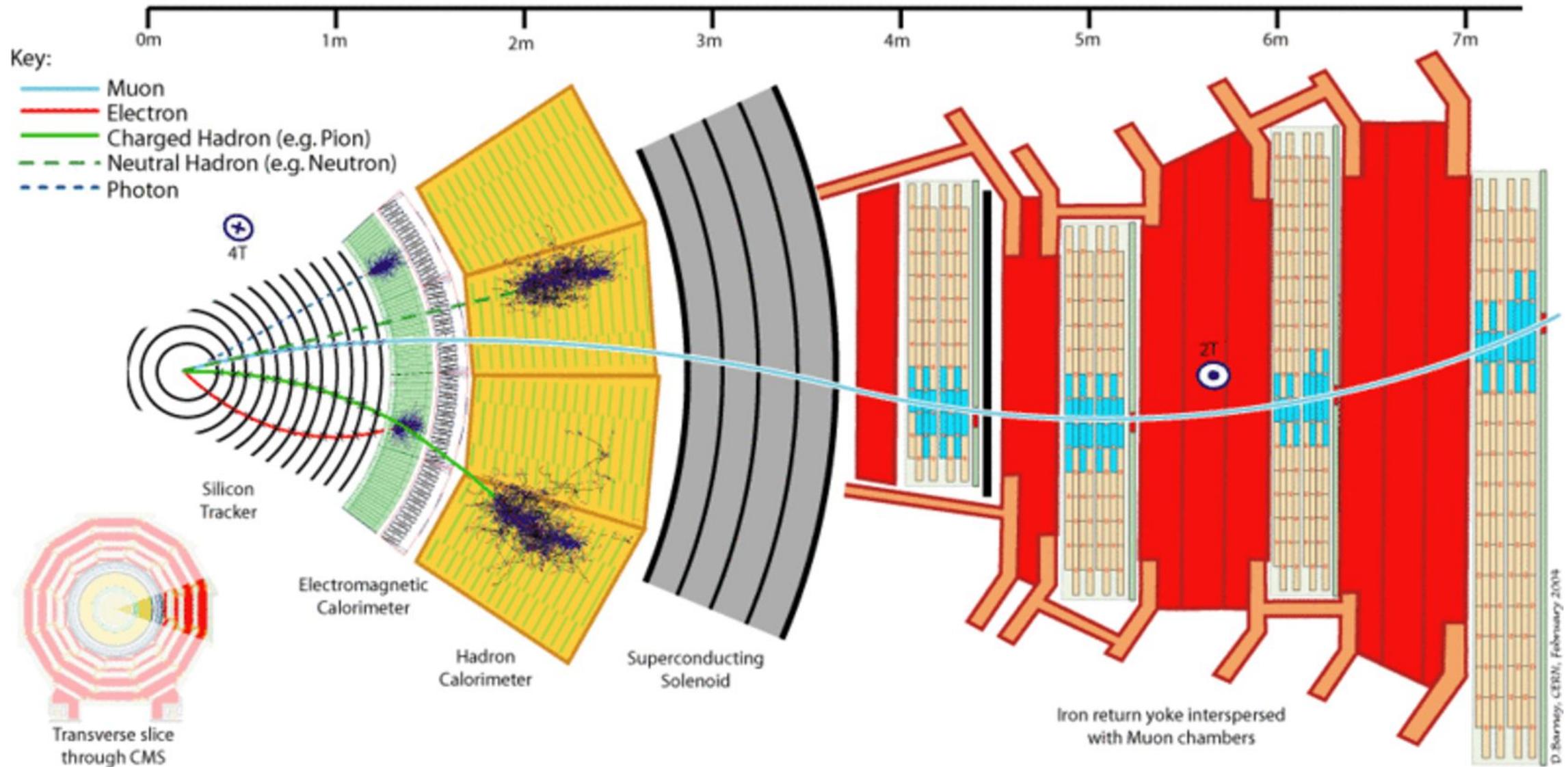
\*\* Design values

# Reconstrucción de partículas





# Detector de partículas

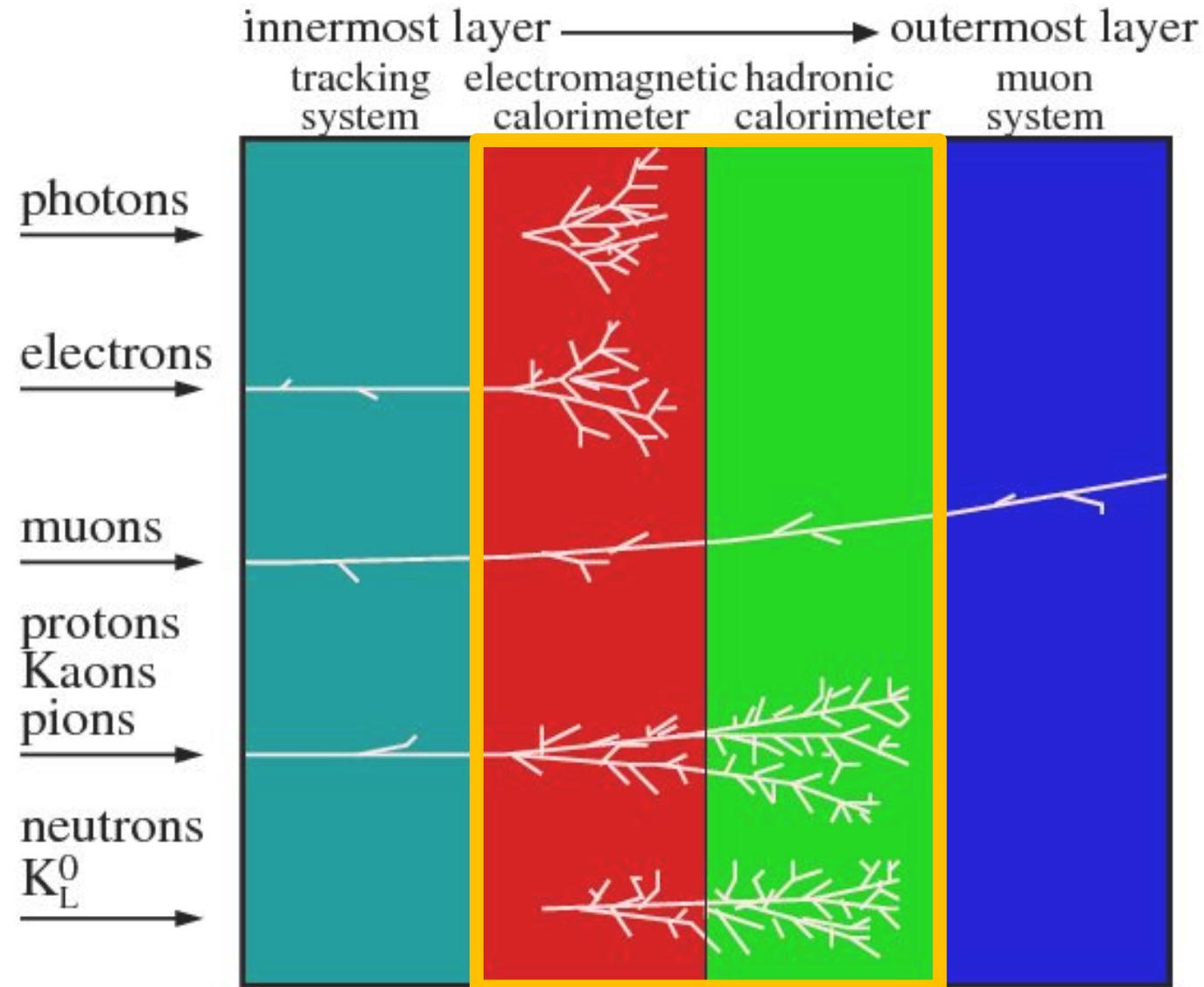




- ¿Cuál es el objetivo de construir un calorímetro?
  - [EM] Medir la energía de electrones, positrones y fotones.
  - [HAD] Medir la energía de hadrones.
- Los calorímetros se pueden dividir en ‘celdas’ que permiten la reconstrucción de los perfiles transversales y longitudinales de los depósitos de energía.
- ¿Qué más podemos medir?
  - Determinar la posición y dirección de la cascada.
  - Medir el tiempo de llegada de la partícula.
  - La señal se obtiene en poco tiempo ( $<100$  ns) → se pueden identificar eventos interesantes en tiempo real.
  - la información se complementa con la de otros detectores para obtener un mejor rendimiento.



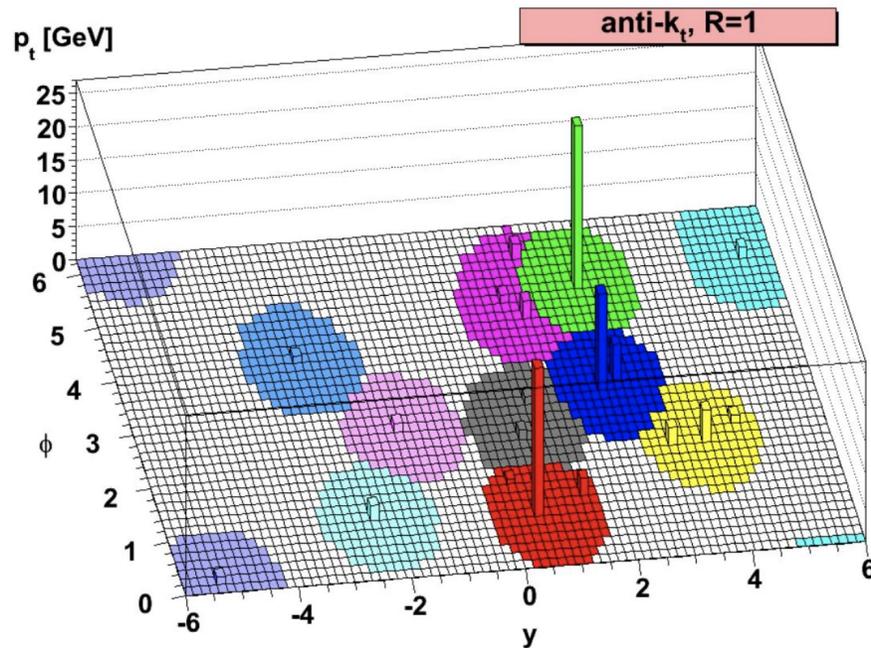
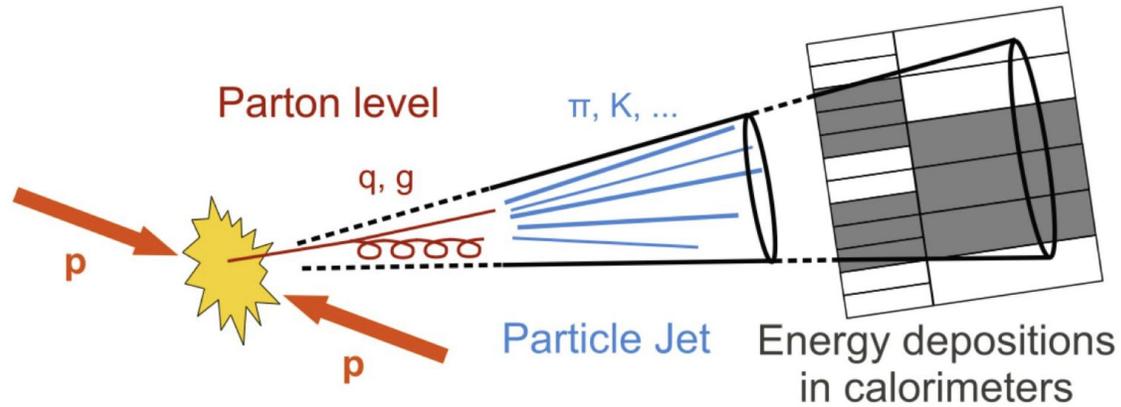
# Identificación de partículas



C. Lippmann – 2003



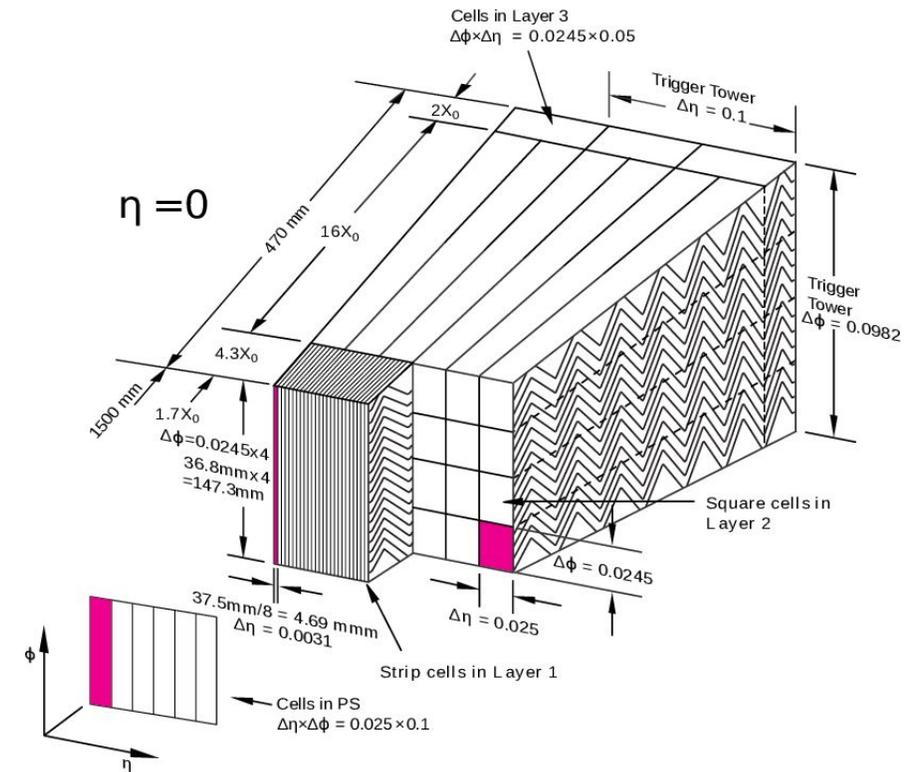
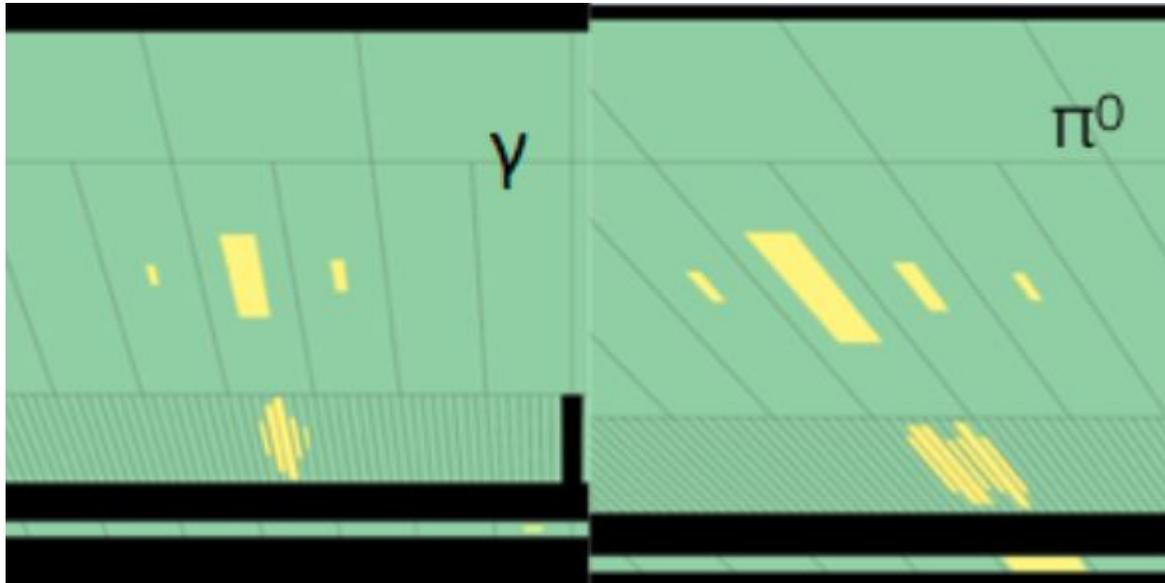
# Reconstrucción de partículas



- Jets son ‘bunches’ de partículas que aparecen colimados.
- Definición experimental: bunche de partículas generadas por la hadronización de una fuente común.
  - e.g. fragmentación de quark/gluon.
- Pueden depositar energía en los dos calorímetros, electromagnéticos y hadrónicos.
  - También pueden tener partículas en el tracker.
- Se reconstruyen empezando por los agrupamientos de celdas con depósitos de energía en los calorímetros (cells clustering).



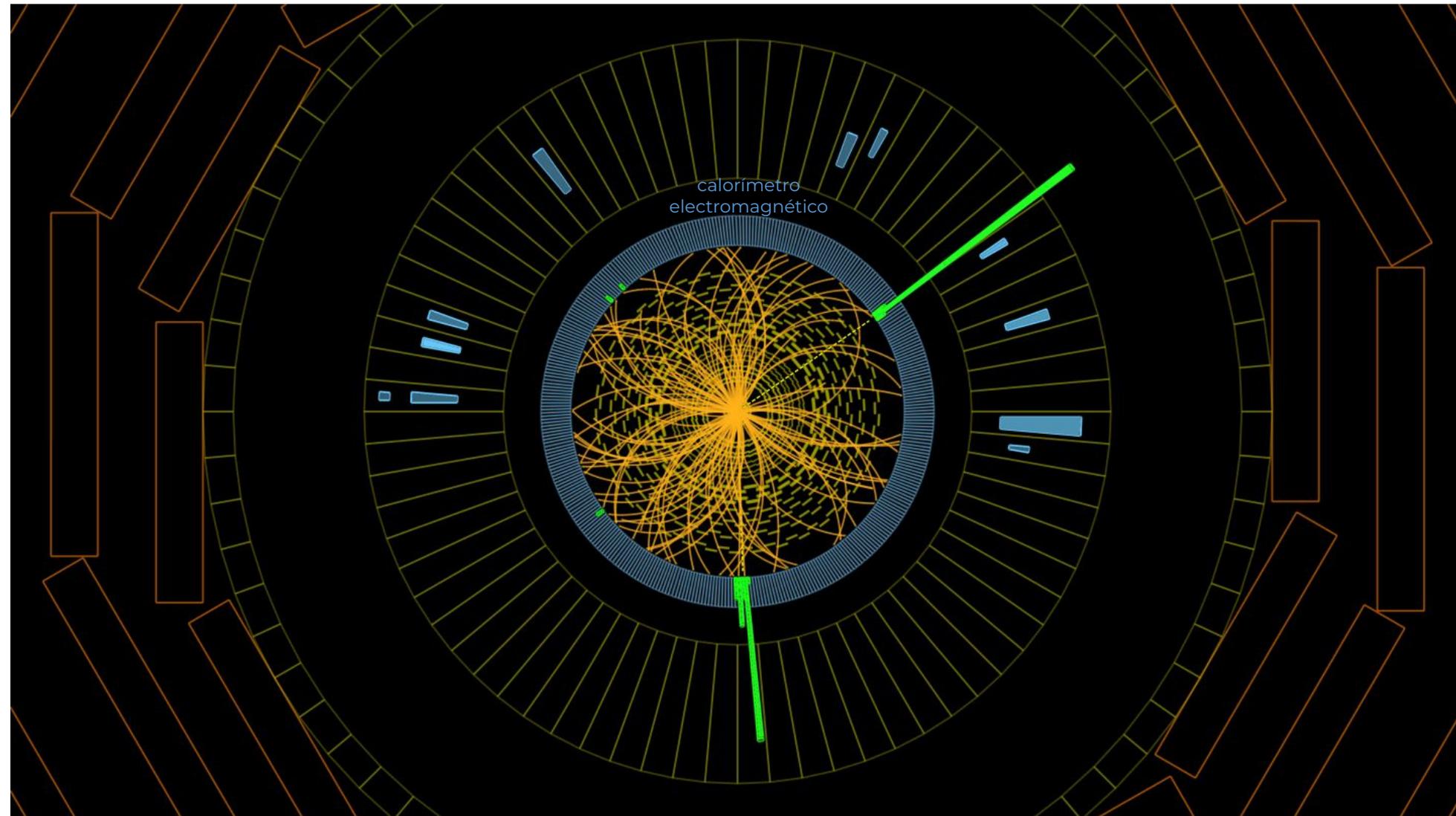
# Medición de la posición



- Ejemplo: ATLAS calorímetro electromagnético de muestreo.
- Segmentación transversal y longitudinal, permite medir la posición y dirección de la cascada.
- La primera capa de tiras de 5 mm permite distinguir  $\gamma$  de  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ .
- Las 3 capas de profundidad:
  - mejora la resolución de la medición de la energía.
  - permite dar dirección a  $\gamma$  (asociación al vertex correcto en el tracker).



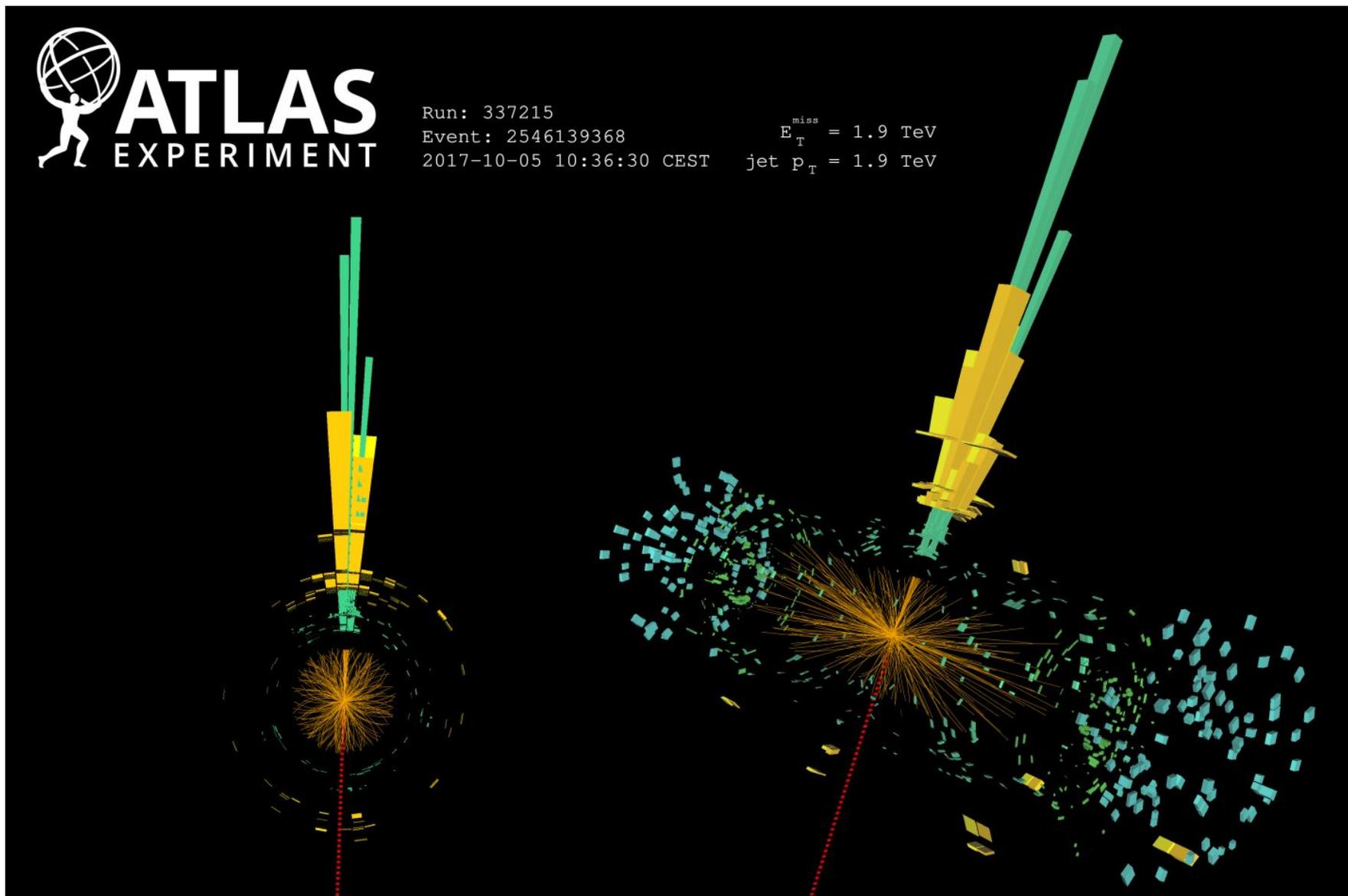
# Reconstrucción de partículas



- CMS.
- Evento candidato:  $H \rightarrow \gamma\gamma$
- **Energía depositada** en el calorímetro EM.

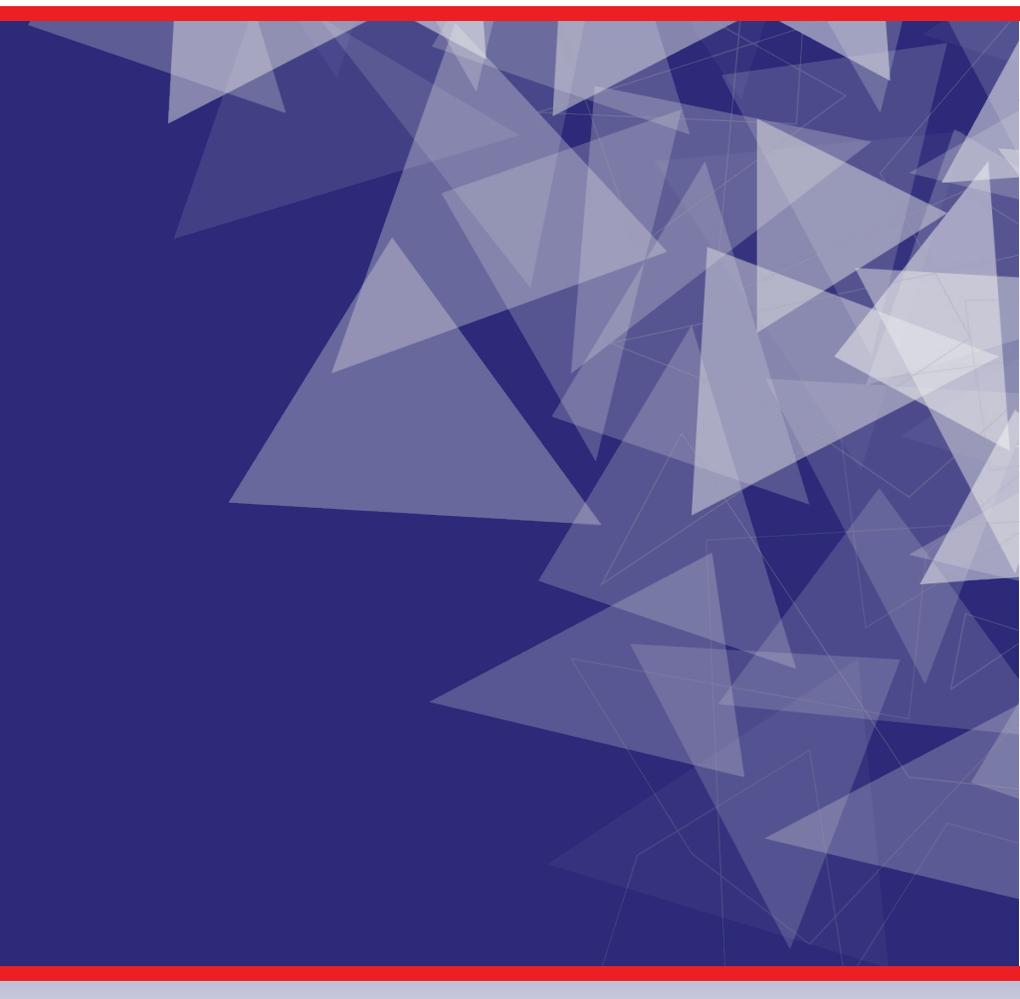


# Reconstrucción de partículas



- ATLAS.
- Evento candidato: **jet +  $E_T^{miss}$**  (canal de búsqueda de materia oscura).
- Energía depositada en el calorímetro **electromagnético** y **hadrónico**.

# Ejemplos de calorímetros



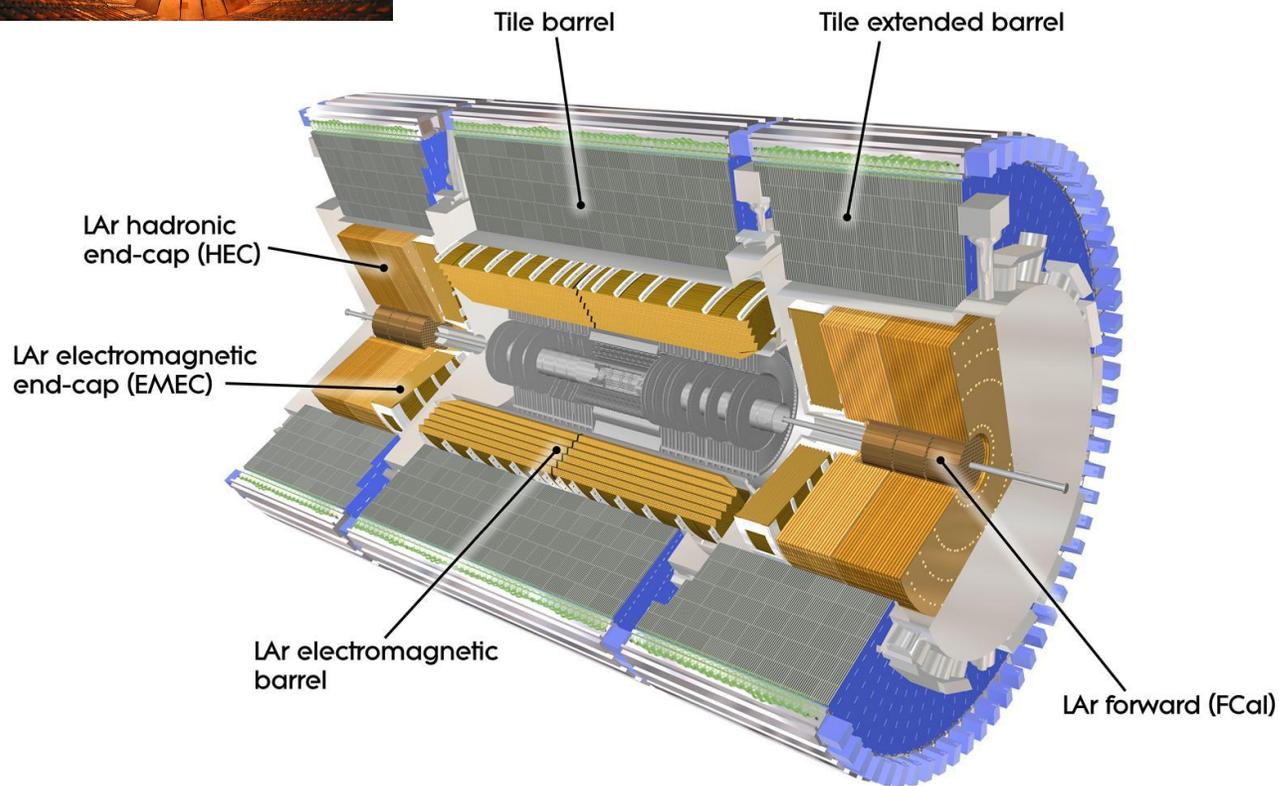


# Calorímetro de ATLAS LAr

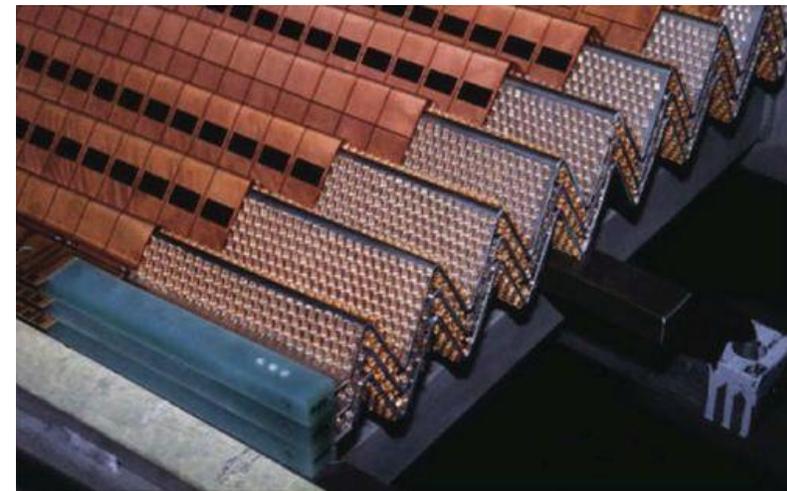


- Calorímetro electromagnético de muestreo.
- Plomo como material de absorción; Argón líquido (LAr) como material activo.
- Estructura de acordeón (reduce huecos).

- ~200000 canales de lectura.
- LAr es resistente a la radiación

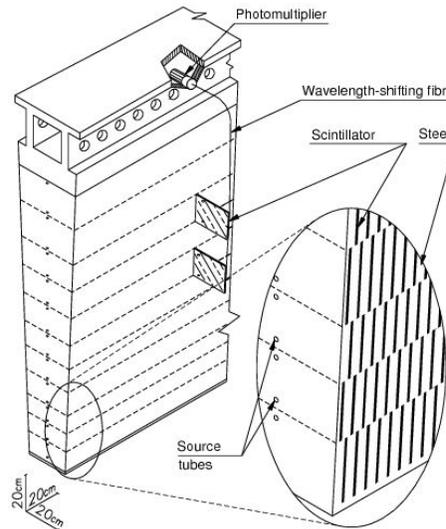
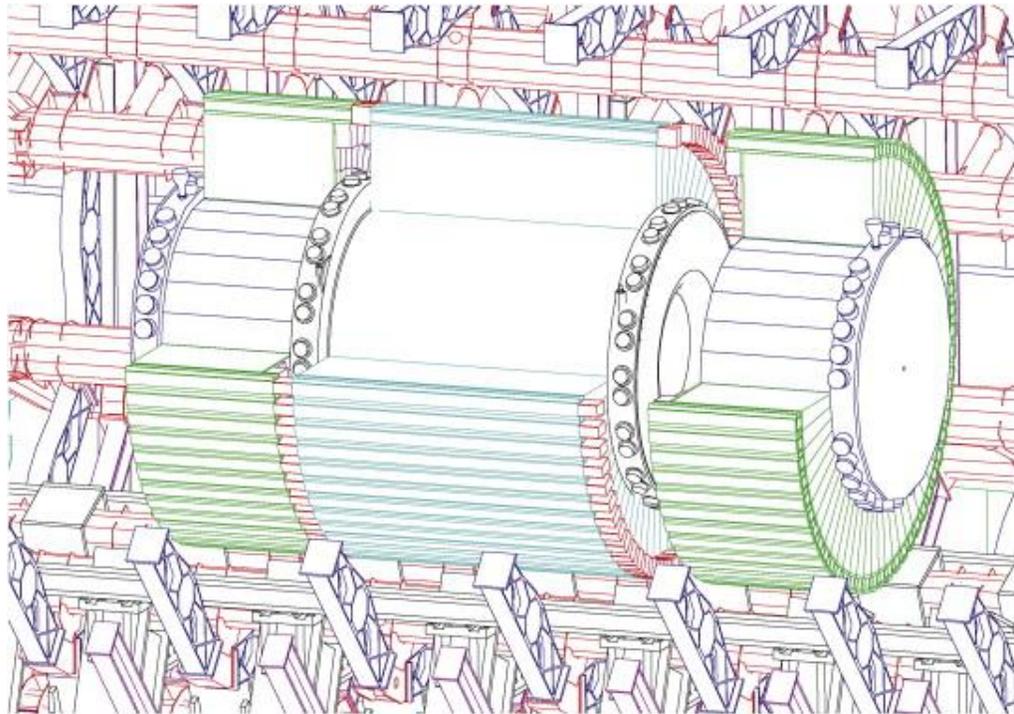


$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{10\%}{\sqrt{E \text{ (GeV)}}} \oplus \frac{0.3}{E \text{ (GeV)}} \oplus 0.7\%$$





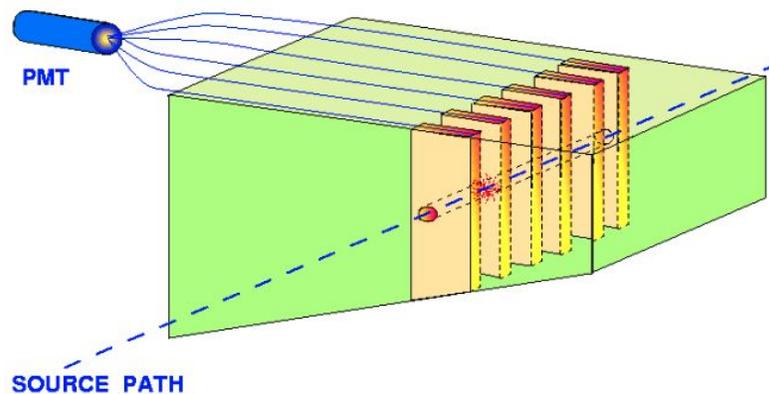
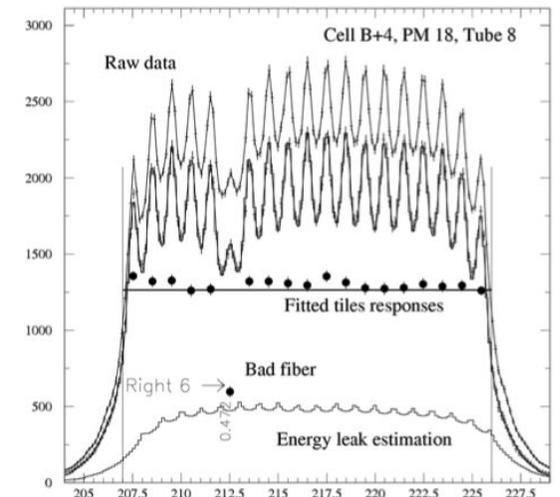
# Calorímetro de ATLAS Tile



- Calorímetro hadrónico de muestreo.
- Hierro como material de absorción; Plásticos centelladores como medio activo. La señal se lee con foto-multiplicadores.
- Cubre  $7.4 \lambda_a$  para partículas emitidas a 90 grados del punto de interacción.

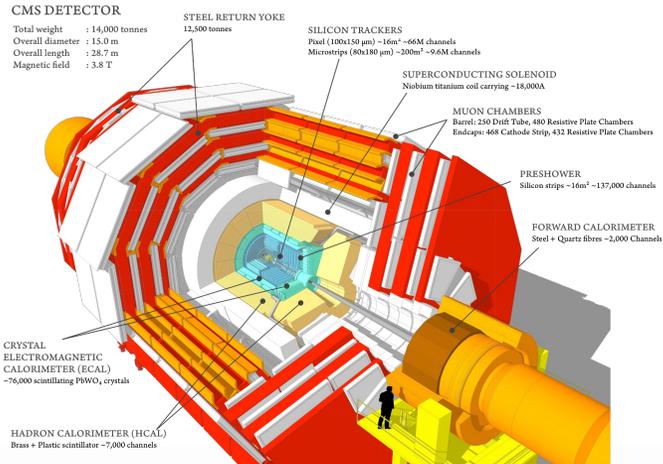
$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{50\%}{\sqrt{E}} \oplus 10\%$$

- Calibración: sistema de Cesium. Se usan 3 fuentes radiactivas ( $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ ) que se hacen circular por el detector a través de un sistema de tubos de acero (control hidráulico).





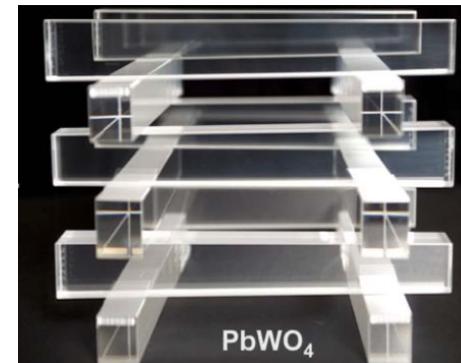
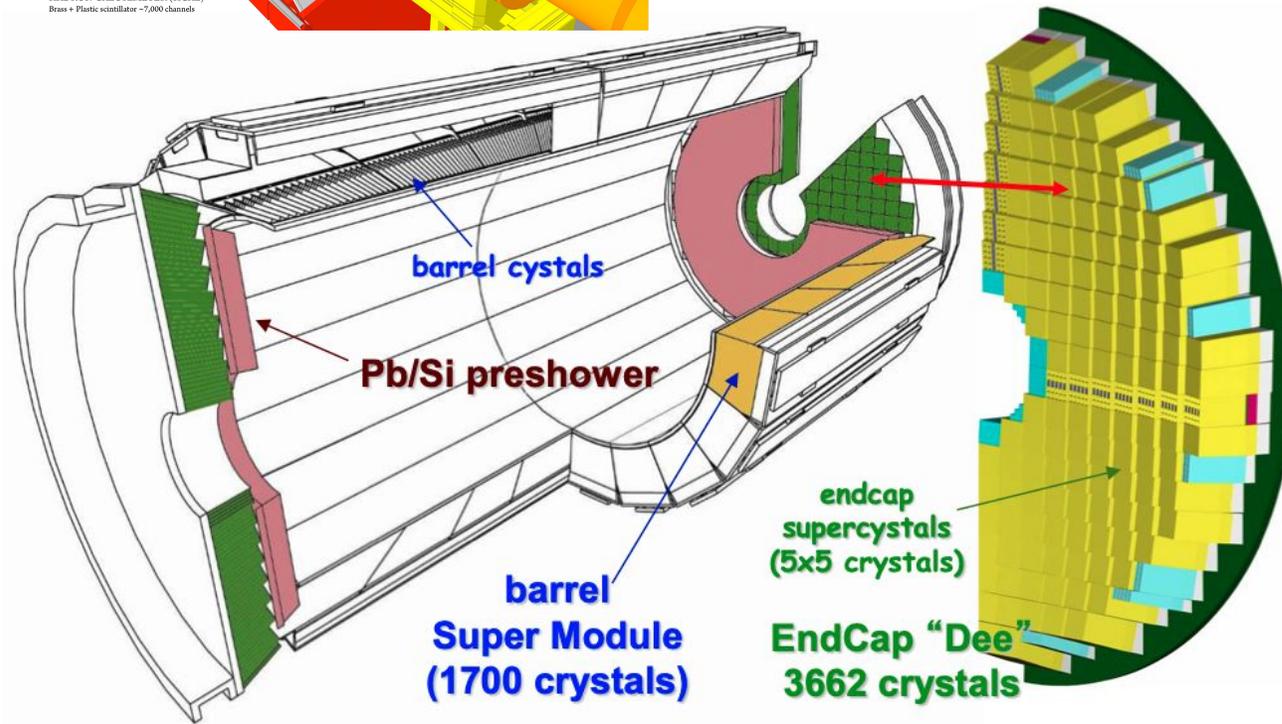
# Calorímetro de CMS PbWO<sub>4</sub>



- Calorímetro electromagnético homogéneo.
- ~76'000 Cristales de centelleo (tungstato de plomo).
- La señal se lee con fotodiodos.

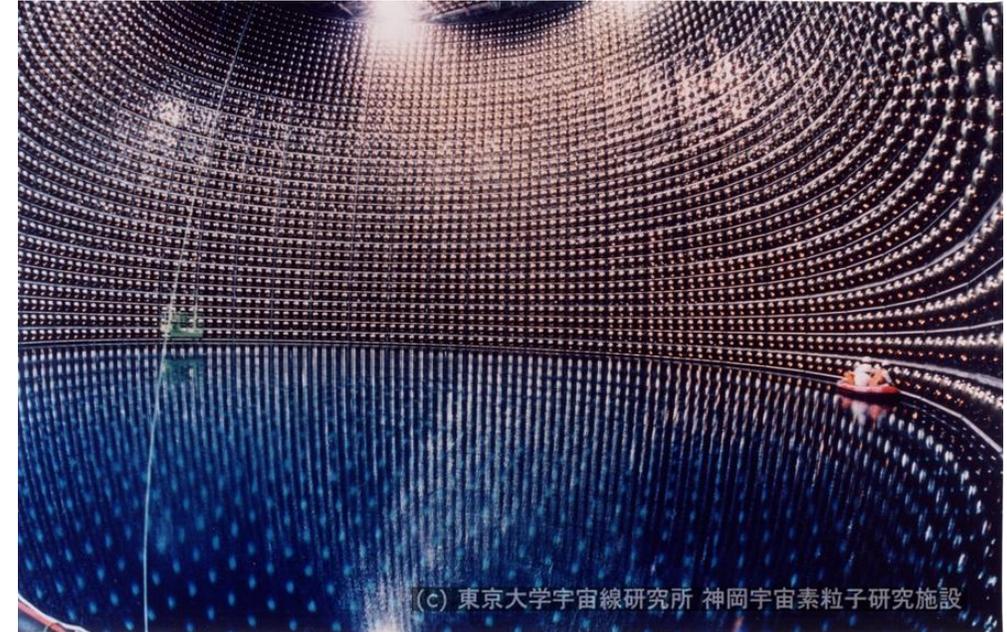
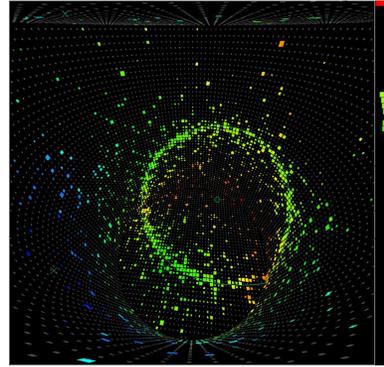
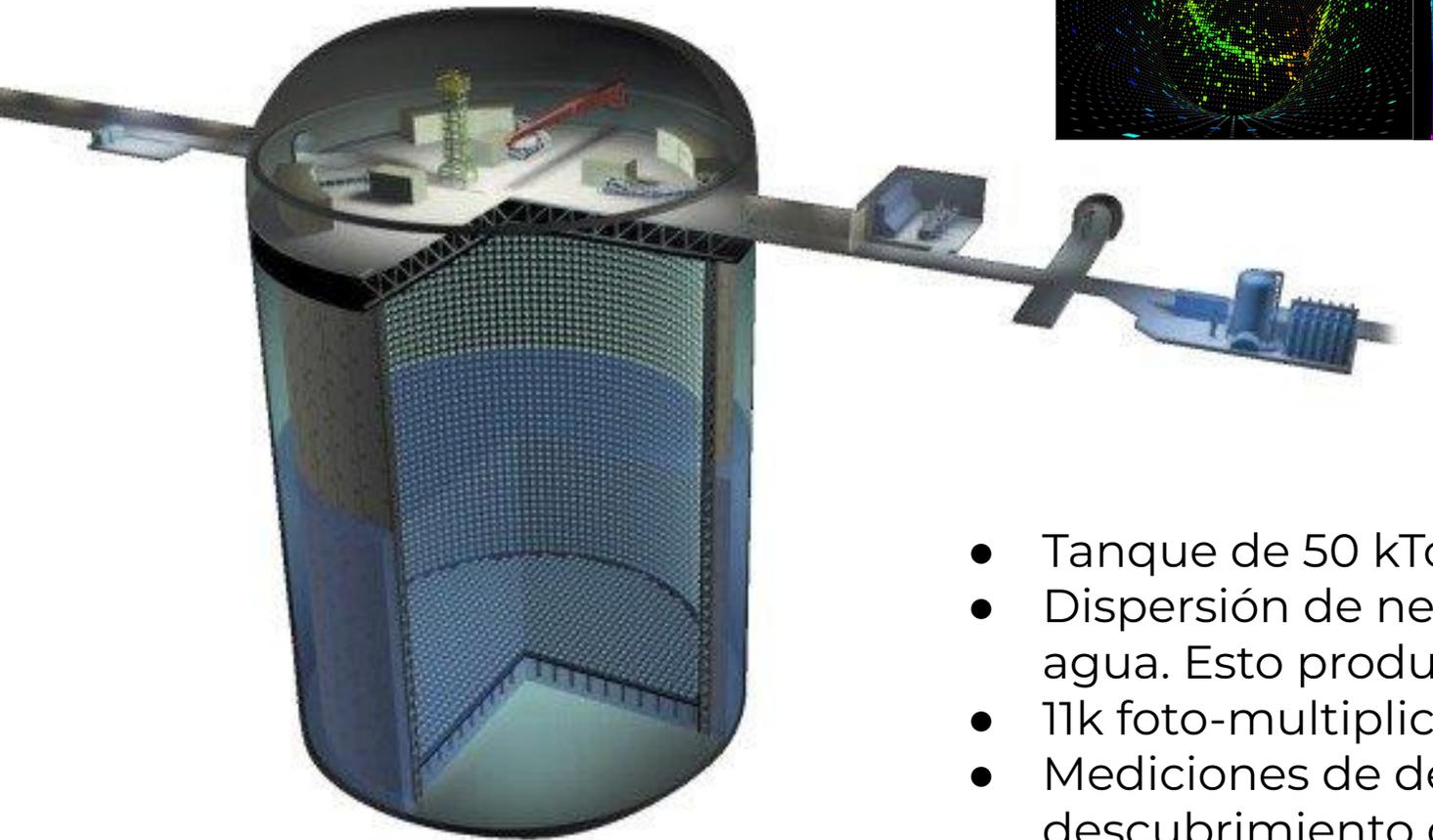
- Costo de los cristales centelladores.
  - A corto plazo, afectados por la radiación.
  - A largo plazo, daño por interacciones nucleares.

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{2.8\%}{\sqrt{E(\text{GeV})}} \oplus \frac{125}{E(\text{MeV})} \oplus 0.3\%$$





# Super-Kamiokande

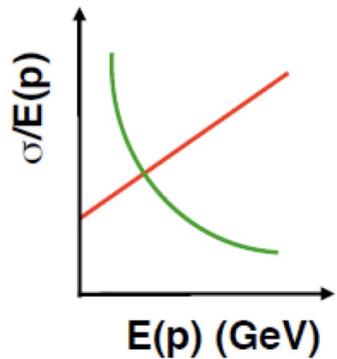


(c) 東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設

- Tanque de 50 kToneladas de agua bajo tierra.
- Dispersión de neutrinos con los electrones o núcleos del agua. Esto produce luz de Cherenkov.
- 11k foto-multiplicadores.
- Mediciones de déficit de flujo de neutrinos solares, descubrimiento de oscilaciones de neutrinos.



# Lo mejor de los calorímetros



Tracking

$$\frac{\sigma(p)}{p} = ap \oplus b$$

Calorimetry

$$\frac{\sigma(E)}{E} \approx \frac{a}{\sqrt{E}}$$

- En la mayoría de casos, la resolución de la energía mejora con  $\sim 1/\sqrt{E}$ , donde **E** es la energía de la partícula incidente.

- Son sensibles a partículas **cargas** y partículas **neutras**.
  - Pueden incluso, indirectamente, detectar neutrinos a través de la medición de la energía faltante en un evento (MISSING ENERGY).
- Son usados muy comúnmente para dar señales de adquisición de datos (TRIGGER), dado que proporcionan **señales rápidas**.
- Pueden ser **económicos** (en cuanto a espacio, y en consecuencia precio).
  - La longitud de las cascadas (shower) crece logarítmicamente con la energía, el espesor del detector sólo necesita crecer logarítmicamente con la energía de las partículas.



<http://laconga.redclara.net>



[contacto@laconga.redclara.net](mailto:contacto@laconga.redclara.net)



lacongaphysics



Latin American alliance for  
Capacity buildiNG in Advanced physics

**LA-CoNGA physics**

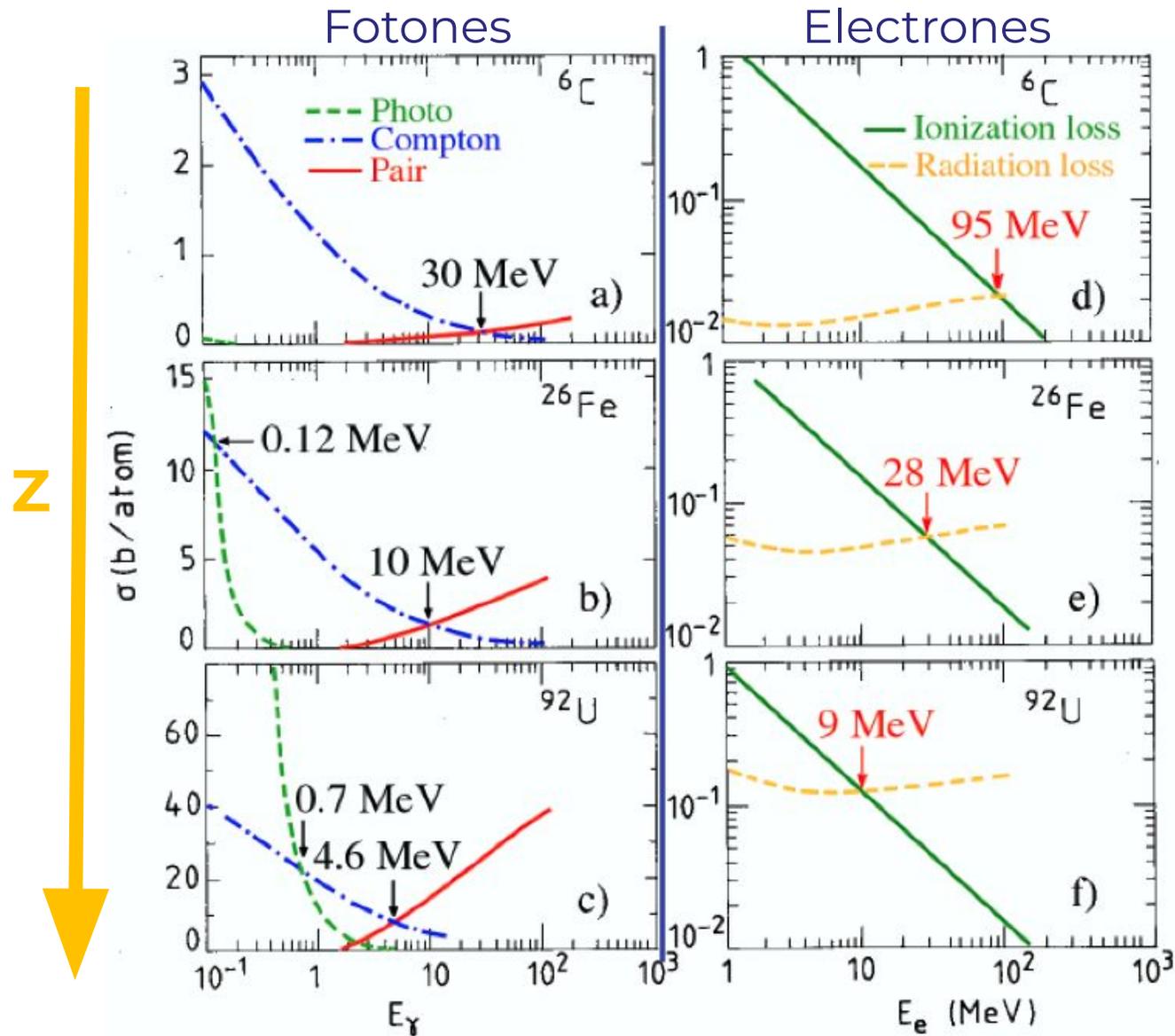


Cofinanciado por el  
programa Erasmus+  
de la Unión Europea

El apoyo de la Comisión Europea para la producción de esta publicación no constituye una aprobación del contenido, el cual refleja únicamente las opiniones de los autores, y la Comisión no se hace responsable del uso que pueda hacerse de la información contenida en la misma.

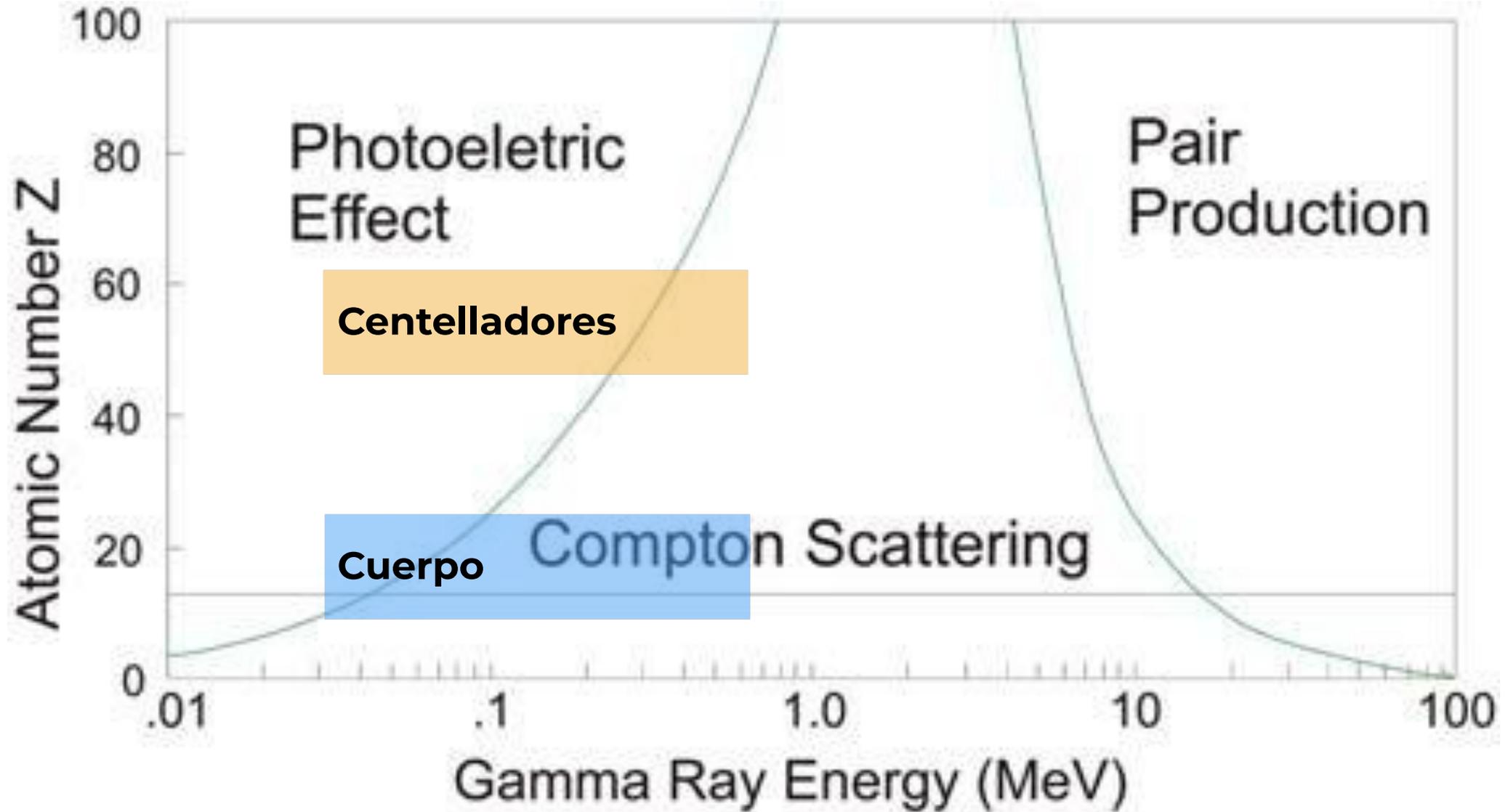


# ¿Cómo se comparan los materiales?



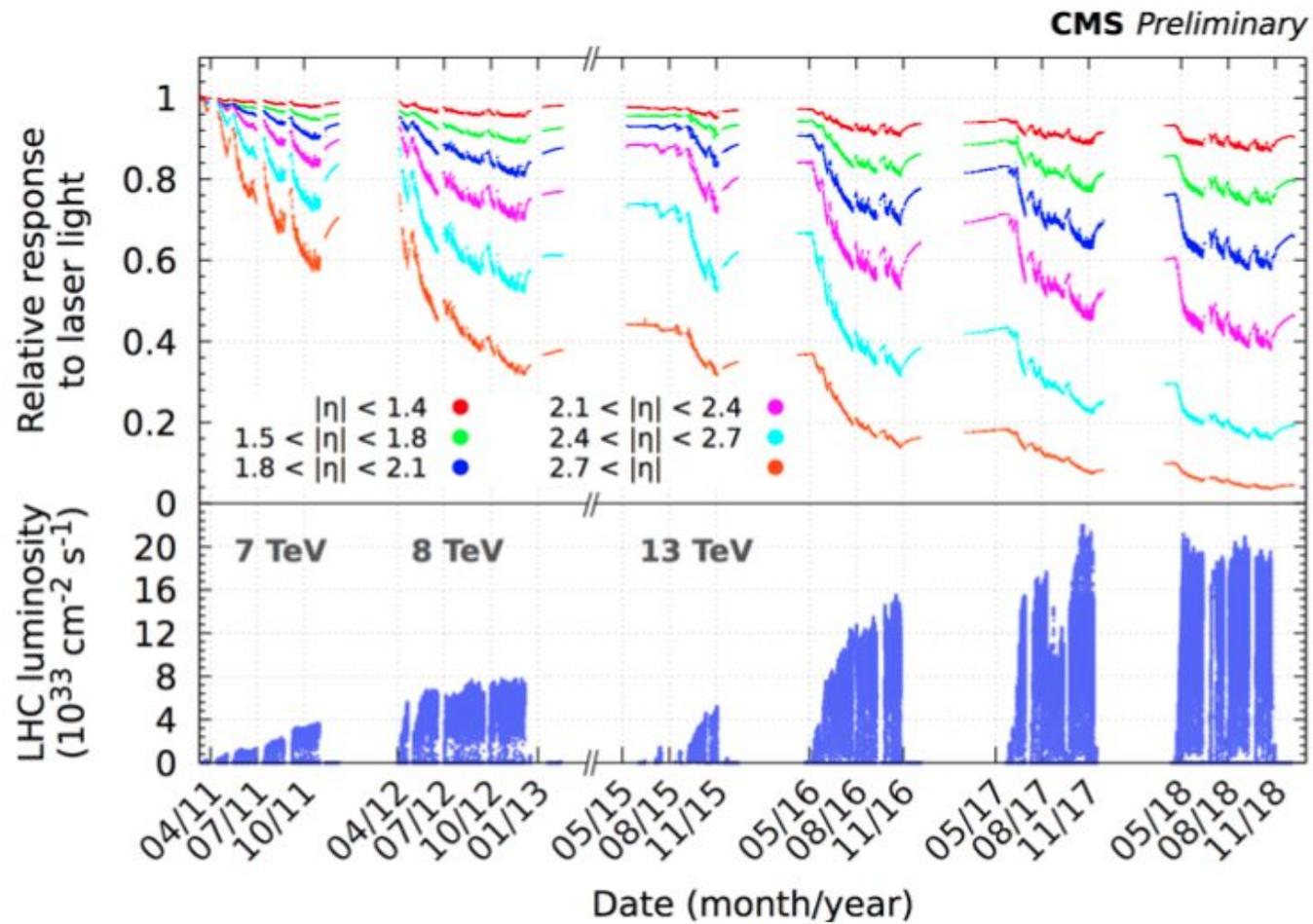


# Interacciones electromagnéticas

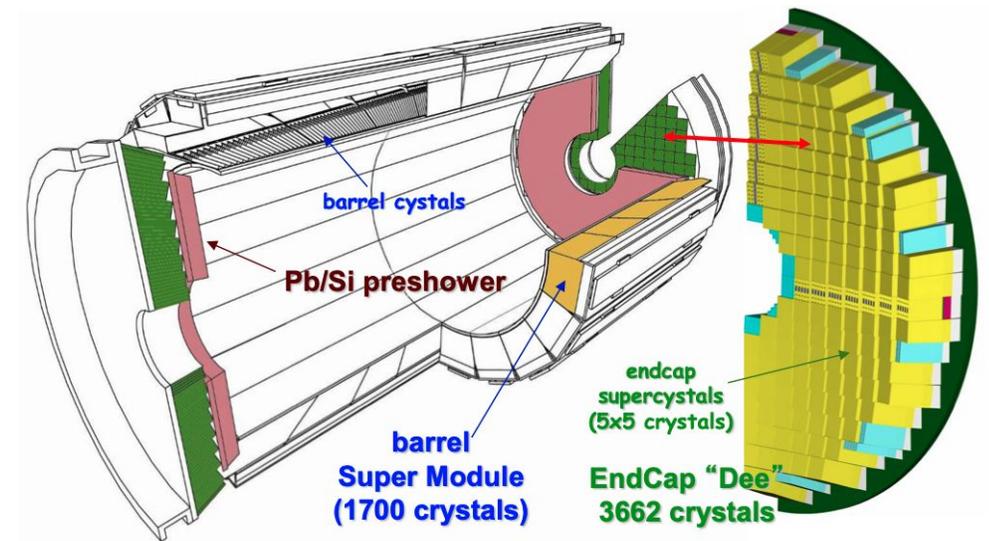




# Calorímetro de CMS $\text{PbWO}_4$



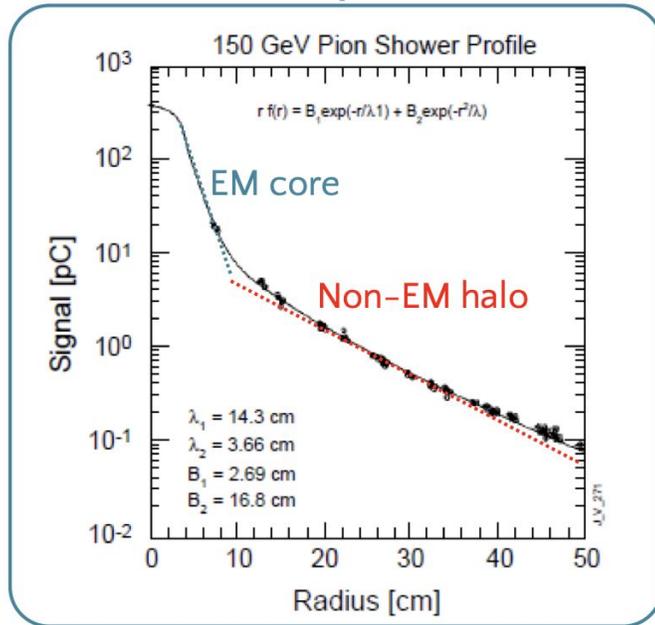
- Costo de los cristales centelladores.
  - A corto plazo, afectados por la radiación.
  - A largo plazo, daño por interacciones nucleares.





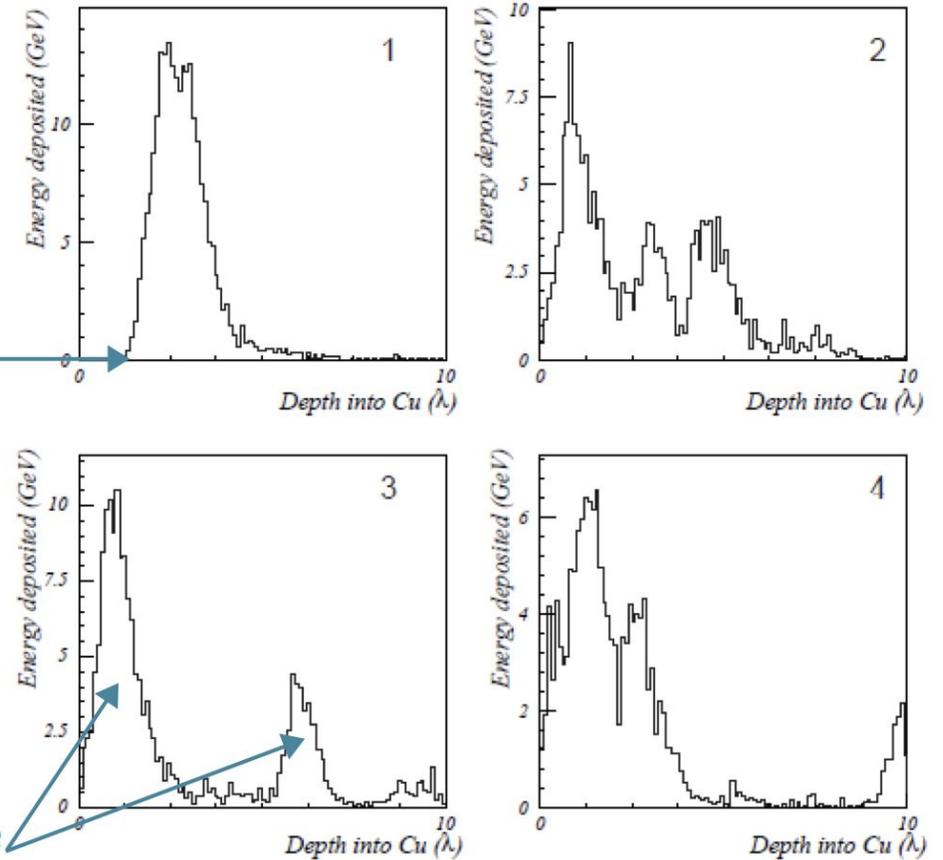
## Examples of longitudinal development

### Lateral profile



### 270 GeV Incident Pions in Copper

A pion can travel a significant distance before the first interaction happens



$\pi_0$  production in consecutive hadronic interactions