



Universidad de los Andes

Facultad de Ciencias
Departamento de Física

Taller: Aplicaciones Interdisciplinarias de Detectores de Partículas.

Junio 10 - 12.

2026

Idioma Oficial: Español / Inglés.

Official Language: Spanish/English.

Interacción de Muones con la Materia

MIÉRCOLES 10 DE JUNIO DE 2026

BERNARDO GÓMEZ MORENO (DR.RER.NAT.)

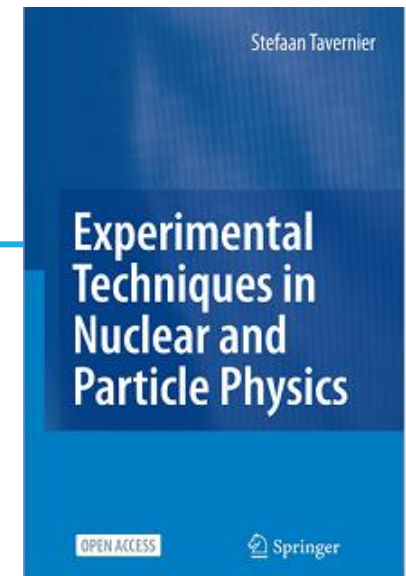
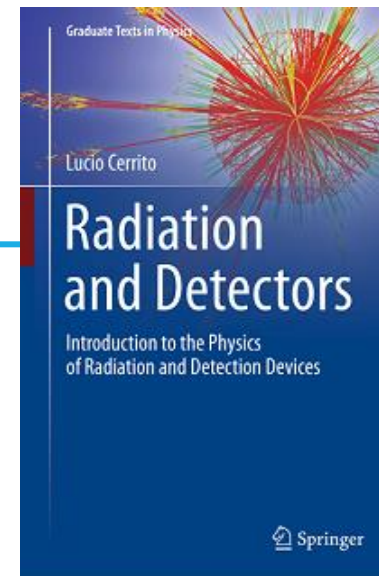
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

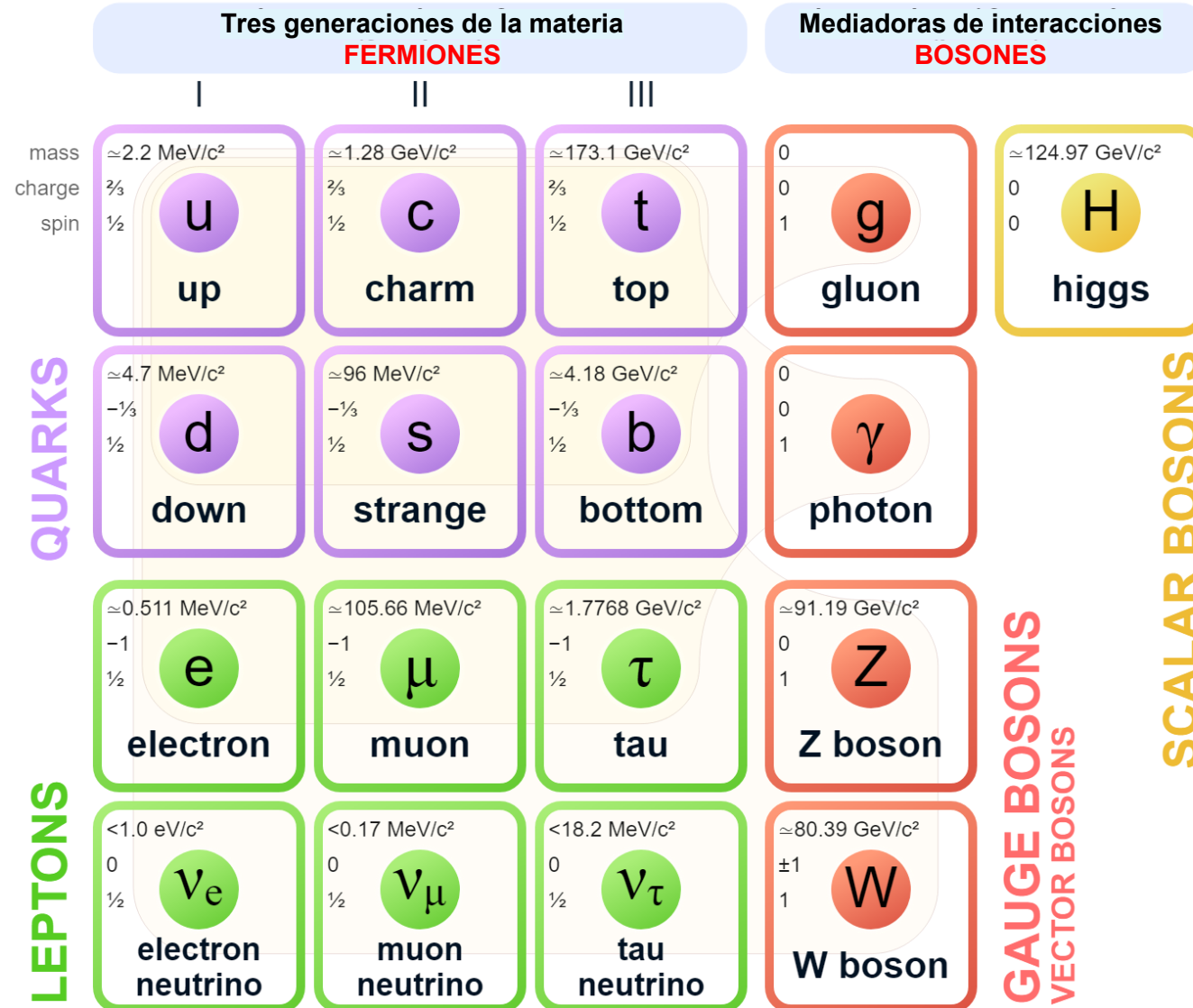
Interacción de Muones con la Materia

Referencias a materiales utilizados en la preparación de esta clase:

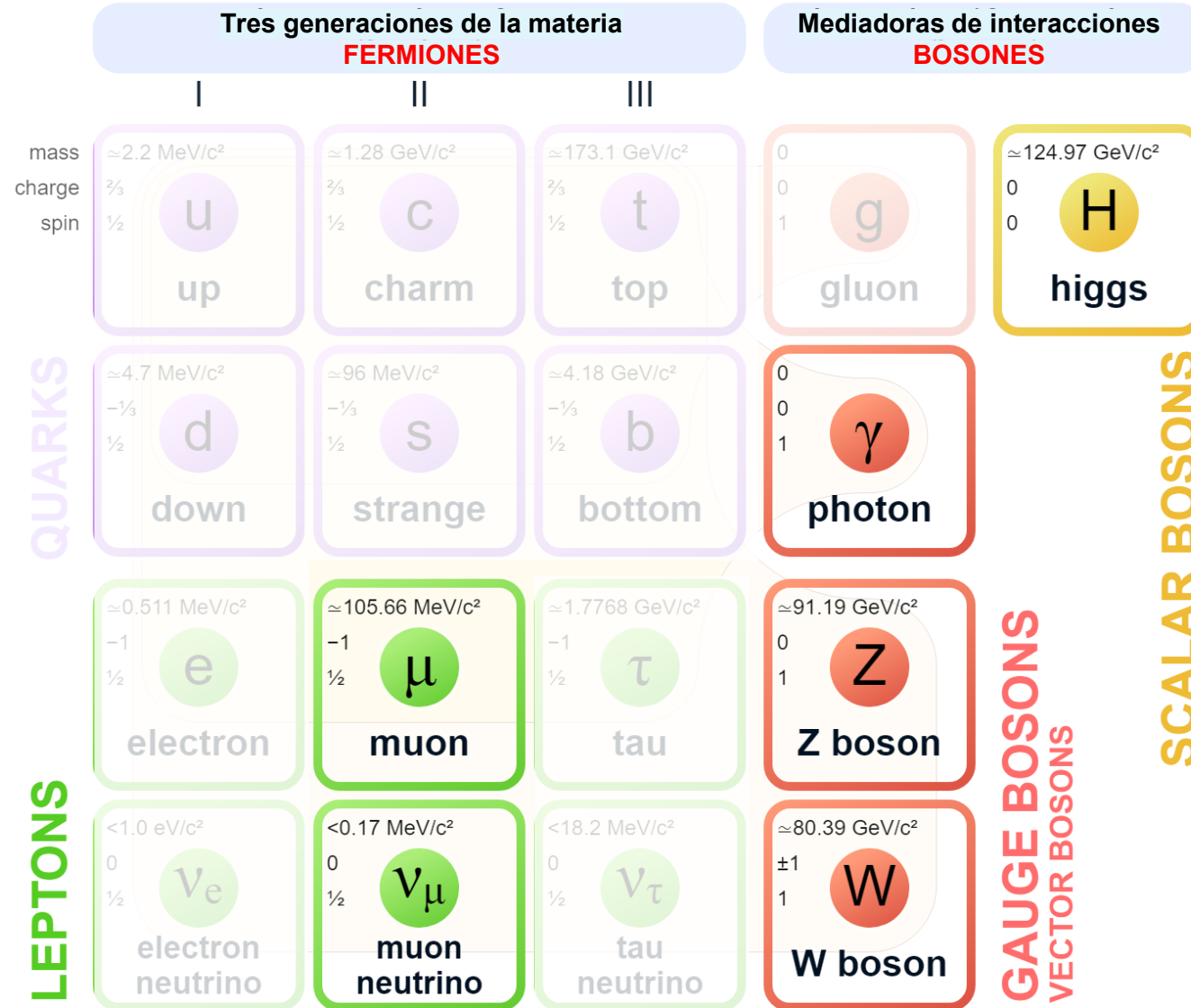
- **Particle Data Group, PDG**, “**The Review of Particle Physics (2017)**”, <http://pdg.lbl.gov>
C. Patrignani et al. (Particle Data Group), Chin. Phys. C, 40, 100001 (2016) and 2017 update.
- **Lucio Cerrito**, School of Physics and Astronomy, Queen Mary University of London.
Radiation and Detectors: Introduction to the Physics of Radiation and Detection Devices
Graduate Texts in Physics, Springer International Publishing AG, 2017.
- **Stefaan Tavernier**, Vrije Universiteit Brussel, Bruxelles, Belgium
Experimental Techniques in Nuclear and Particle Physics
For master students in physics and in engineering, Springer Science,



Modelo Estándar de Partículas Elementales



Modelo Estándar de Partículas Elementales



El muón es partícula elemental.

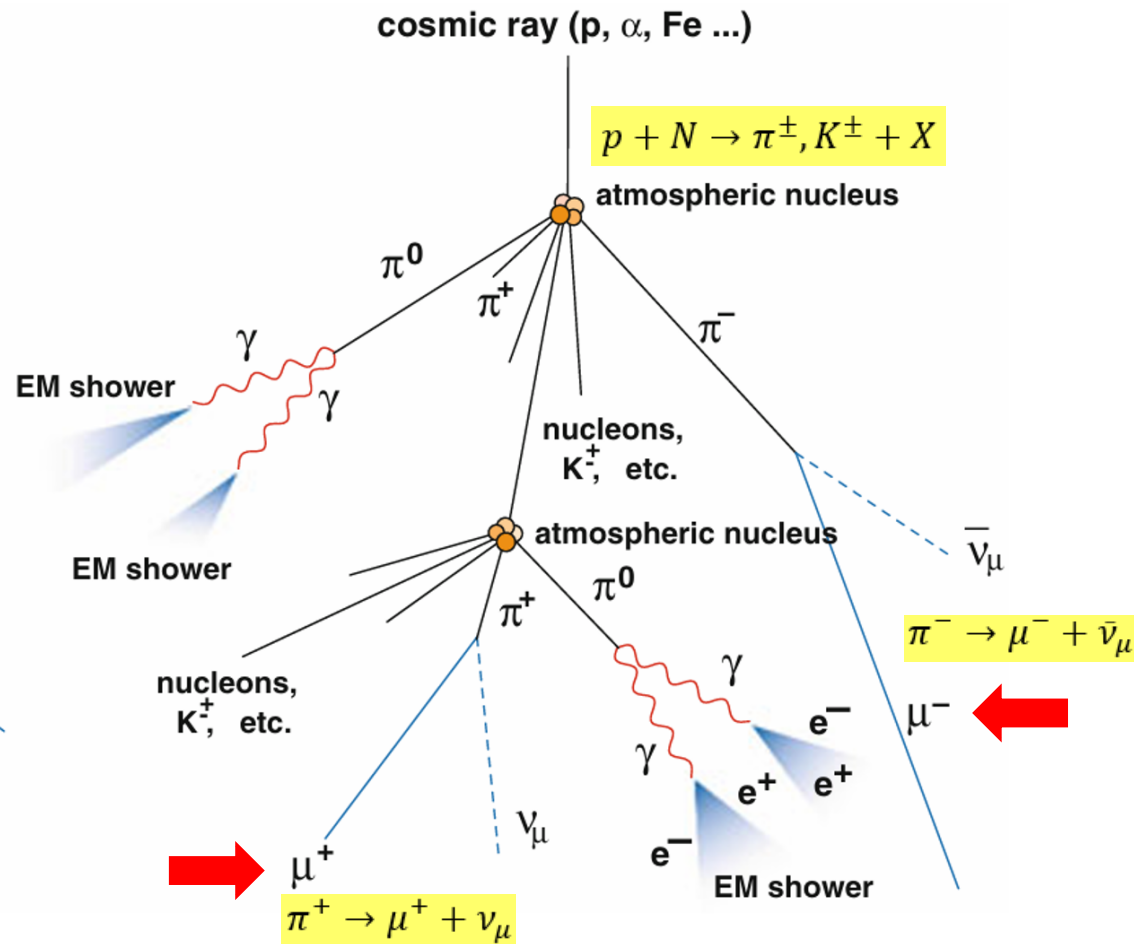
Siendo LEPTÓN el muón NO participa de la interacción fuerte.

Muón solo participa de **interacción débil** y de **interacción electromagnética** (además de la interacción gravitacional).

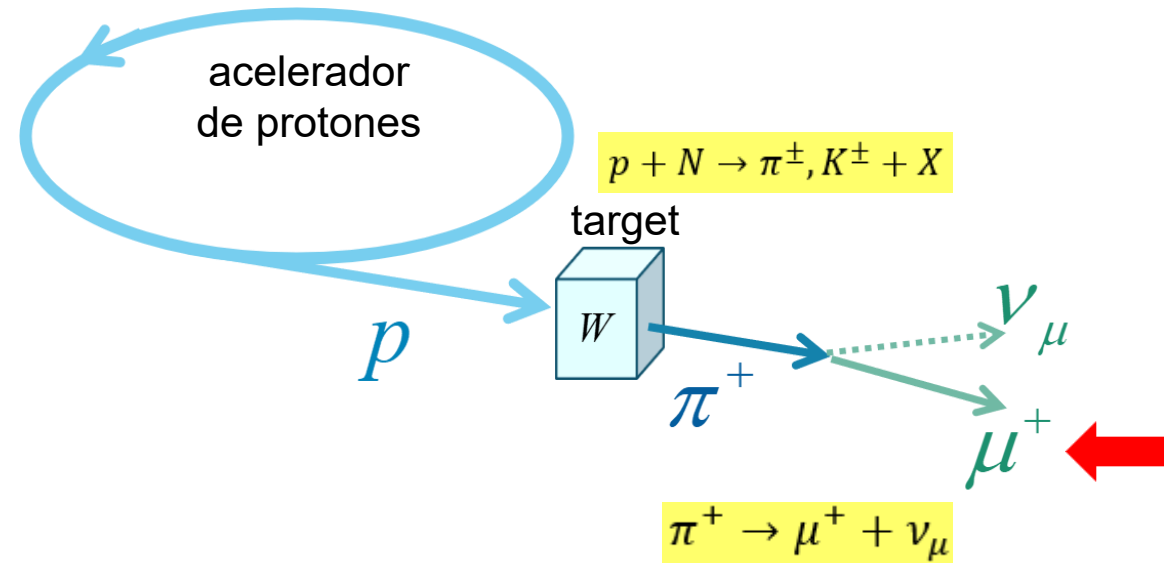
MUÓN: su interacción con la materia es **interacción electromagnética**.

Producción de muones

EN RAYOS CÓSMICOS



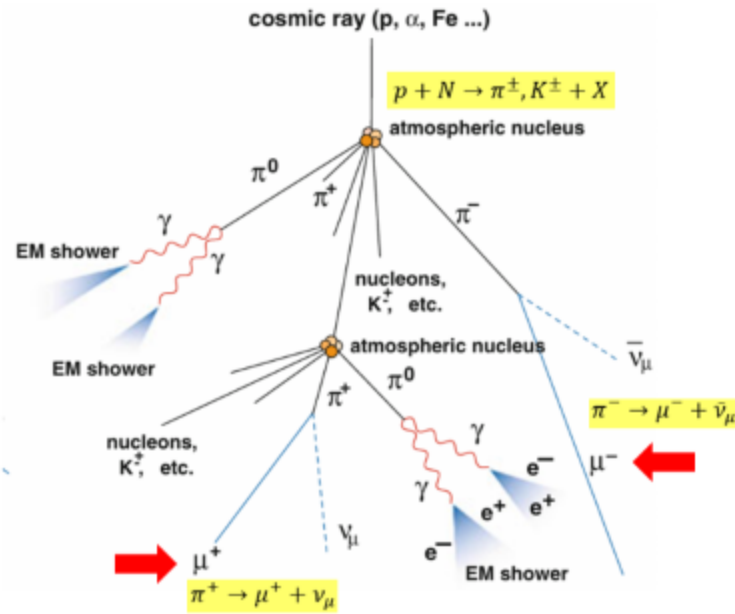
EN ACELERADORES DE PARTÍCULAS



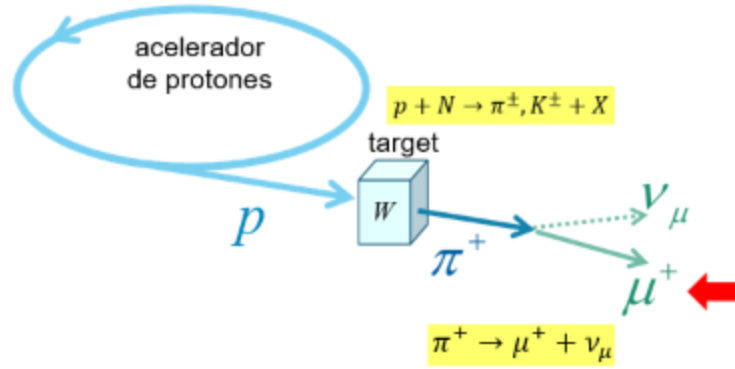
1. Proceso previo (interacción fuerte)
Producción hadrónica $p + N \rightarrow \pi^\pm, K^\pm + X$
2. Producción por decaimiento de mesones
interacción débil
 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$
 $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$

Producción de muones

EN RAYOS CÓSMICOS



EN ACELERADORES DE PARTÍCULAS



1. Proceso previo (interacción fuerte)
Producción hadrónica $p + N \rightarrow \pi^\pm, K^\pm + X$
2. Producción por decaimiento de mesones
Interacción débil
 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$
 $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$

$$\tau_{\pi^\pm} \approx 2.6 \times 10^{-8} \text{ s}$$

Es un **decaimiento de dos cuerpos**
→ el muón sale con **energía bien definida** en el sistema del pion.

...depende de la **energía del pión.**

Fuente de muones	Proceso de producción	Energía típica
Rayos cósmicos	$\pi, K \rightarrow \mu$ en vuelo	GeV (media ≈ 4 GeV)
Rayos cósmicos	espectro completo	~ 0.1 GeV \rightarrow TeV+

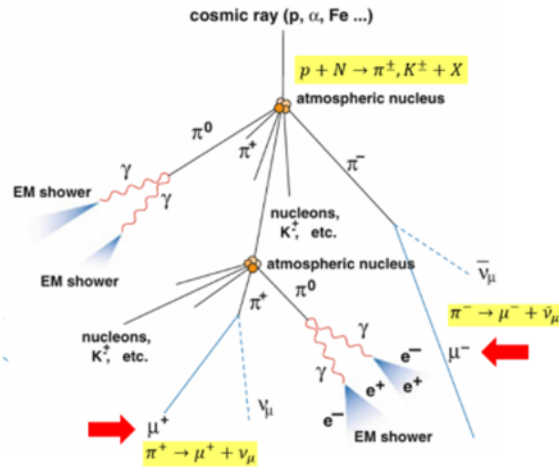
Fuente de muones	Proceso de producción	Energía típica
Acelerador	π en reposo $\rightarrow \mu\nu$	≈ 4 MeV (monocromático)
Acelerador	π relativista $\rightarrow \mu\nu$	≈ 0.1 – varios GeV

La energía del muón está dominada por el boost del pion.

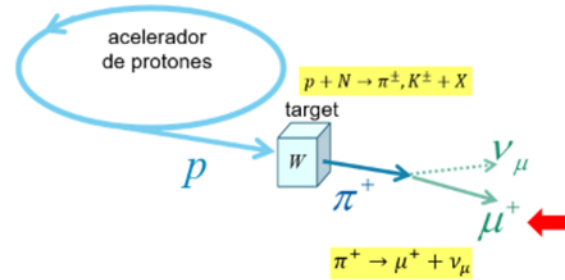
- Pion en reposo \rightarrow muón de 4 MeV
- Pion relativista \rightarrow muón de energía alta

Producción de muones

EN RAYOS CÓSMICOS



EN ACELERADORES DE PARTÍCULAS



1. Proceso previo (interacción fuerte)
Producción hadrónica $p + N \rightarrow \pi^\pm, K^\pm + X$
2. Producción por decaimiento de mesones
Interacción débil
 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$
 $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$

$$\tau_{\pi^\pm} \approx 2.6 \times 10^{-8} \text{ s}$$

Energías de los muones como resultan de la producción comparando rayos cósmicos con aceleradores

Es un decaimiento de dos cuerpos
→ el muón sale con **energía bien definida** en el sistema del pion.

...depende de la energía del pion.

Fuente de muones	Proceso de producción	Energía típica
Rayos cósmicos	$\pi, K \rightarrow \mu$ en vuelo	GeV (media ≈ 4 GeV)
Rayos cósmicos	espectro completo	~ 0.1 GeV \rightarrow TeV+

Fuente de muones	Proceso de producción	Energía típica
Acelerador	π en reposo $\rightarrow \mu\nu$	≈ 4 MeV (monocromático)
Acelerador	π relativista $\rightarrow \mu\nu$	≈ 0.1 – varios GeV

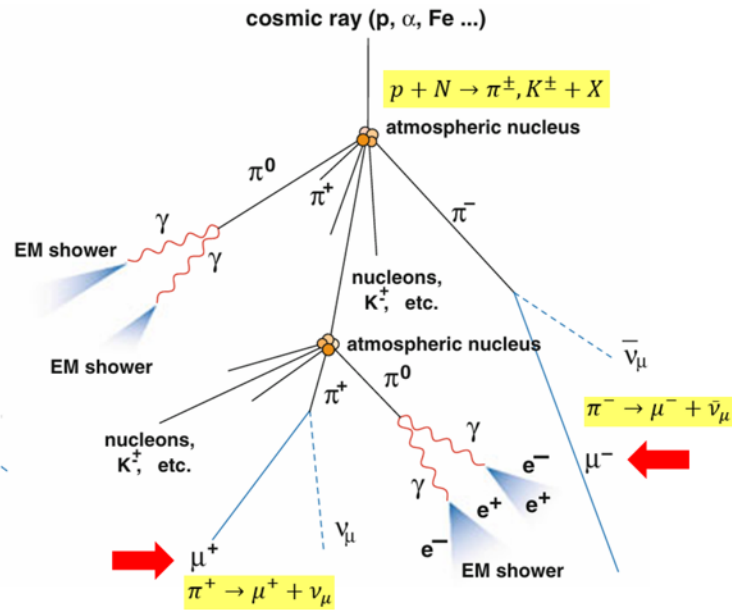
La energía del muón está dominada por el boost del pion.

- Pion en reposo \rightarrow muón de 4 MeV
- Pion relativista \rightarrow muón de energía alta

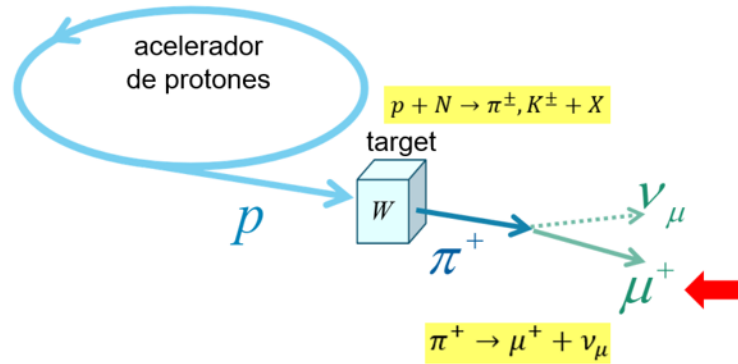
“Los muones cósmicos son típicamente relativistas (GeV), mientras que los muones de acelerador pueden ser térmicos (MeV) o relativistas, dependiendo de si los piones decaen en reposo o en vuelo.”

Producción de muones

EN RAYOS CÓSMICOS



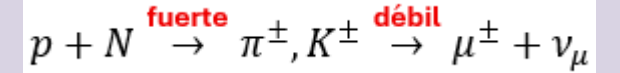
EN ACELERADORES DE PARTÍCULAS



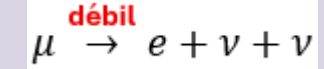
1. Proceso previo (interacción fuerte)
Producción hadrónica $p + N \rightarrow \pi^\pm, K^\pm + X$
2. Producción por decaimiento de mesones
interacción débil
 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$
 $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$

La existencia del muón

Producción:



Decaimiento:



Es un **decaimiento de dos cuerpos**

→ el muón sale con **energía bien definida** en el sistema del pión.

...depende de la energía del pión.

vida media

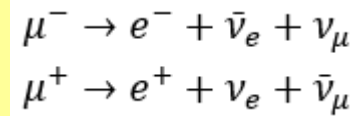
$$\tau_{\pi^\pm} \approx 2.6 \times 10^{-8} \text{ s}$$

Decaimiento de muones

Canal dominante (casi 100%)

Proceso de **interacción débil**

proceso leptónico de tres cuerpos mediado por W virtual.



vida media

$$\tau_{\mu^\pm} \approx 2.2 \times 10^{-6} \text{ s}$$

Es un **decaimiento de tres cuerpos**

→ el electrón de decaimiento tiene un

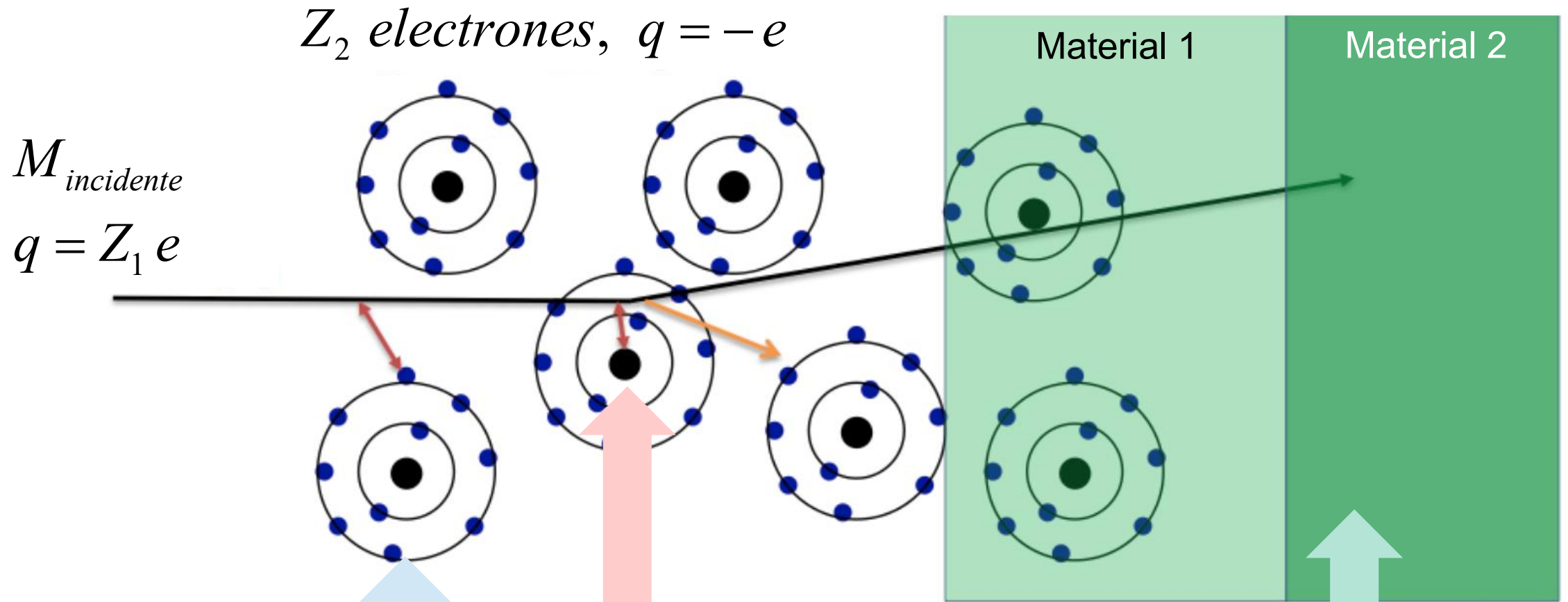
espectro continuo de energías.

El muón tiene una vida media 100 veces mayor que el pión.

Durante su existencia el MUÓN: interacciona con la materia por

interacción electromagnética.

Interacción electromagnética Partícula - Materia

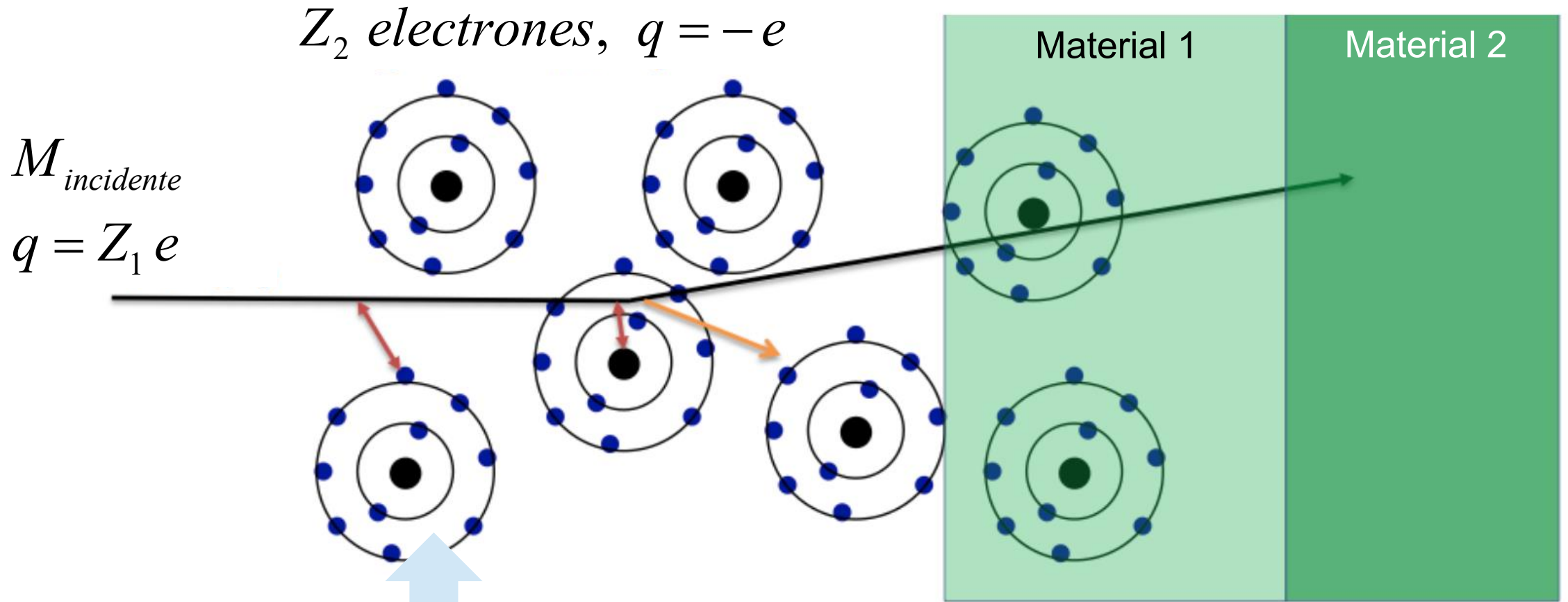


Interacción con electrones de los átomos del material

Interacción con los núcleos atómicos

Interacción global con los materiales

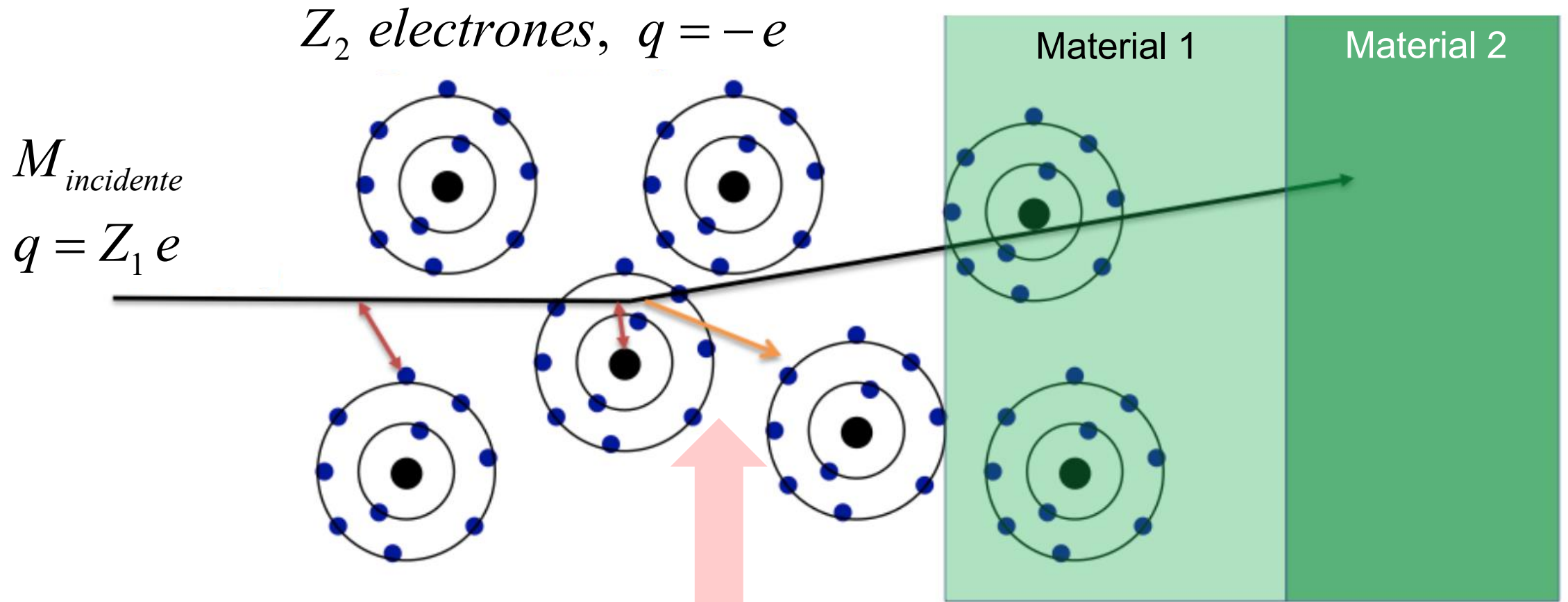
Interacción electromagnética Partícula - Materia



Interacción con electrones de los átomos del material

La partícula incidente pierde energía excitando o ionizando los átomos.

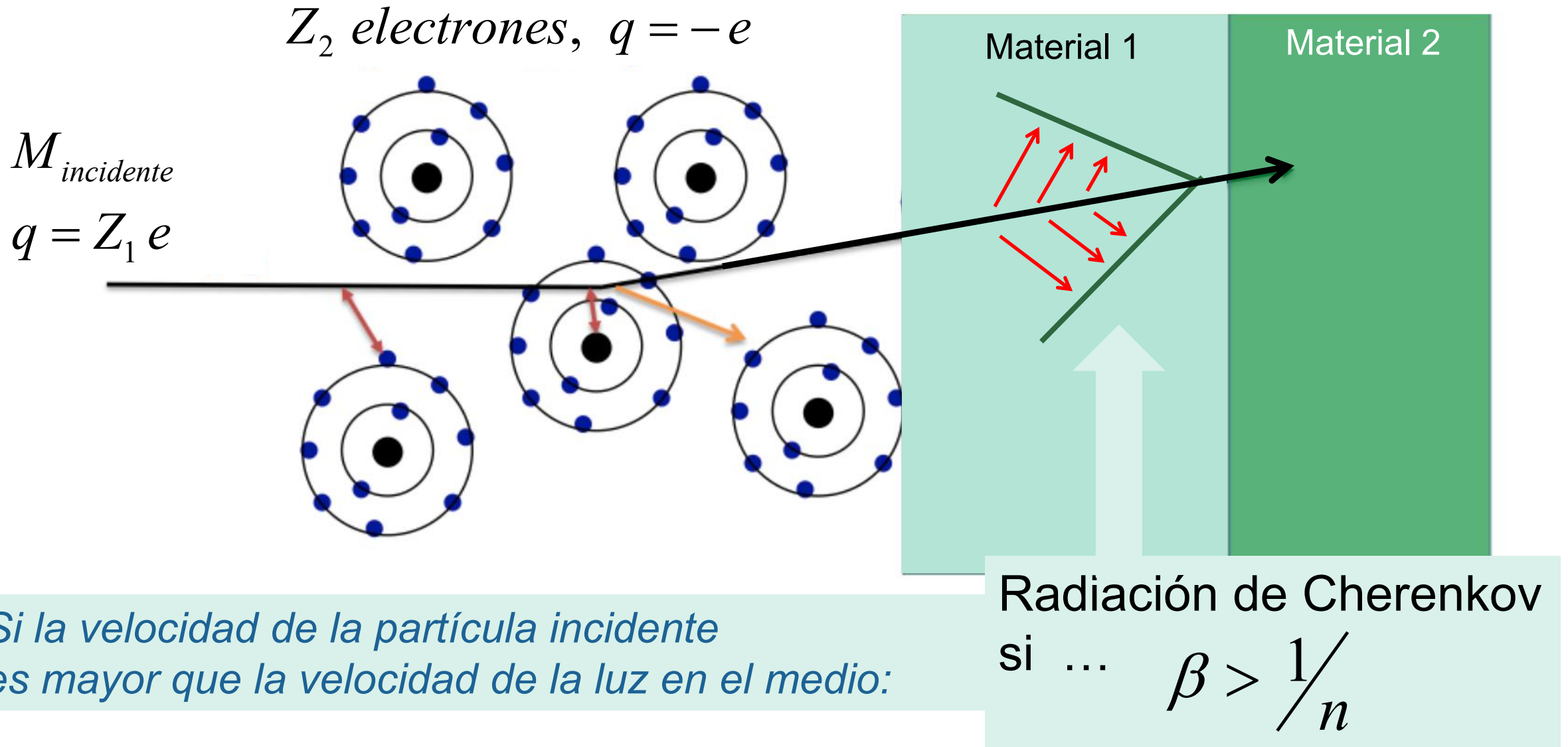
Interacción electromagnética Partícula - Materia



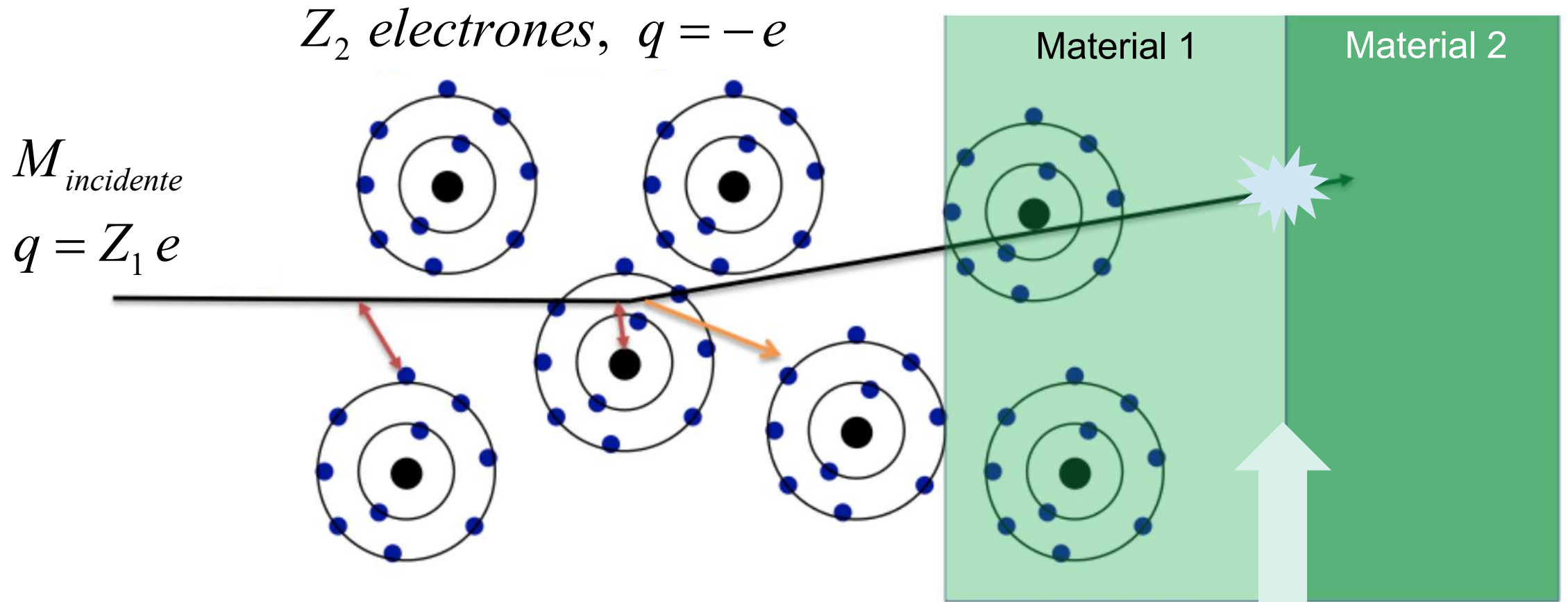
Interacción con los núcleos atómicos

La partícula incidente se defleca. Hay multiple scattering en el material. Con la dispersión puede **emitir fotón de Bremsstrahlung**.

Interacción electromagnética Partícula - Materia



Interacción electromagnética Partícula - Materia



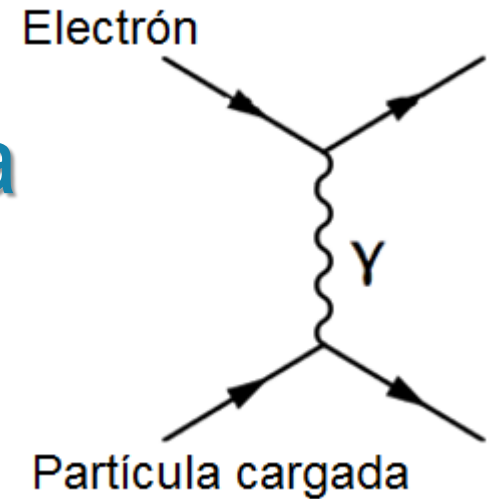
Cuando la partícula cruza el límite entre dos medios diferentes puede emitir: **Radiación de Transición**

Pérdida media de energía por unidad de distancia recorrida en materia

Fórmula de Bethe - Bloch:

Pérdida de energía para partículas pesadas cargadas

$$Mc^2 \gg m_e c^2$$



Del material del detector, del medio donde partícula ioniza.

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = K \frac{Z}{A} \cdot \frac{z^2}{\beta^2} \cdot \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 E_{cin_{max}}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right] \cdot \rho$$

densidad

De la partícula que entra al material.

I : Potencial medio de excitación atómica

Fórmula de Bethe - Bloch:

Pérdida media de energía
por unidad de distancia recorrida en materia

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = K \frac{Z}{A} \cdot \frac{z^2}{\beta^2} \cdot \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 E_{cin_{max}}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right] \cdot \rho$$

densidad

Para la partícula incidente:

M Masa partícula incidente

$z \cdot e$ carga eléctrica

$\beta \cdot c$ Velocidad

$\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$ Factor de Lorentz

$$\frac{p}{Mc} = \frac{\gamma M v}{Mc} = \gamma \frac{v}{c} = \gamma \beta \rightarrow \beta \gamma$$

dE/dx depende de la partícula incidente:

Carga z

Partículas con más carga ionizan más (efecto $\propto z^2$).

Velocidad v ($1/\beta^2$)

Si la partícula va más lenta, interactúa más tiempo \rightarrow pierde más energía.

Fórmula de Bethe - Bloch:

Pérdida media de energía por unidad de distancia recorrida en materia

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = K \frac{Z}{A} \cdot \frac{z^2}{\beta^2} \cdot \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 E_{cin_{max}}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right] \cdot \rho$$

densidad

Para el medio (material):

Z carga eléctrica

A número de masa atómica

I potencial medio de excitación atómica

$\delta(\beta\gamma)$ corrección de densidad

dE/dx Depende del material: $\cdot \rho$

Densidad de electrones

→ Más electrones → más interacciones.

$$\frac{Z}{A}$$

Energía de excitación media (I)

→ Qué tan difícil es arrancar electrones del material.

La pérdida de energía depende de
cuántos electrones encuentra la partícula,
de cuán fuerte interactúa con ellos,
y de cuánto tiempo pasa cerca de ellos.

$K Z z^2, I^2, E_{cin_{max}}$

$$\frac{Z}{A} \rho_{densidad}$$

$$\frac{1}{\beta^2}$$

Fórmula de Bethe - Bloch:

Pérdida media de energía
por unidad de distancia recorrida en materia

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = K \frac{Z}{A} \cdot \frac{z^2}{\beta^2} \cdot \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 E_{cin_{max}}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right] \cdot \rho$$

densidad

Entendiendo Bethe-Bloch:

Un muón atravesando materia es como un proyectil que pasa por una nube de electrones; en cada paso “sacude” a algunos, perdiendo pequeñas cantidades de energía; la suma de todos esos pequeños golpes produce una pérdida continua.

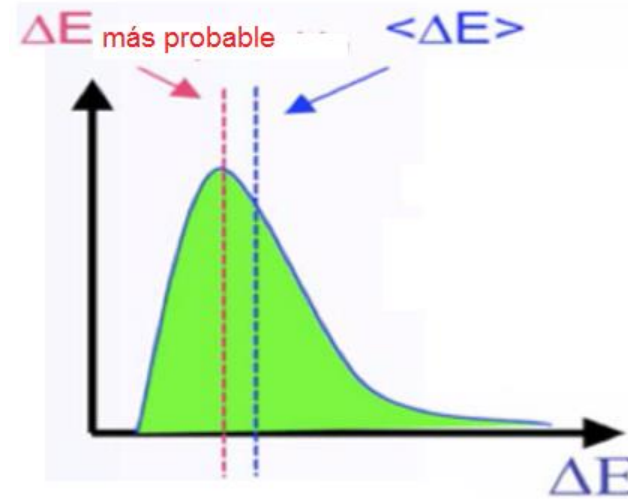
La fórmula de Bethe–Bloch describe la pérdida media de energía de una partícula cargada al atravesar un material, debida a la ionización y excitación de los átomos.

La partícula pierde energía mediante múltiples colisiones con electrones.

La fórmula de Bethe–Bloch no describe evento a evento, sino el valor medio de la pérdida de energía.

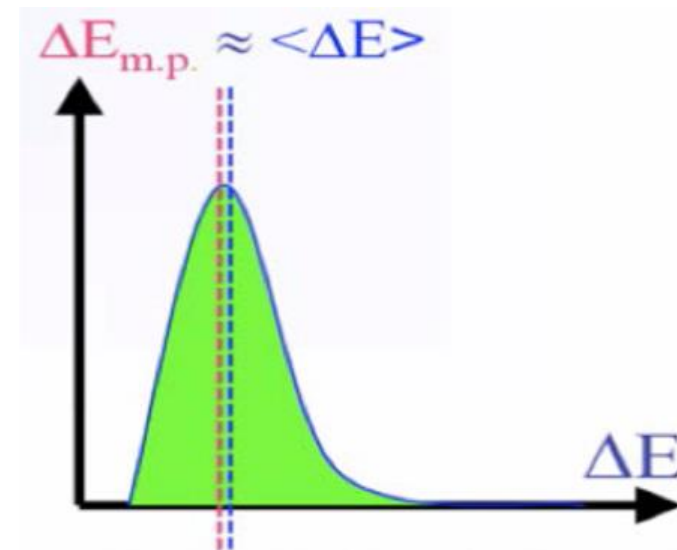
Distribución de pérdida de energía al atravesar material absorbente de espesor finito

En material delgado de espesor pequeño, y para densidad del material pequeña: dE/dx presenta fluctuaciones grandes hacia pérdidas altas:



Distribución Tipo Landau

En material grueso de espesor grande, y para densidad del material grande: dE/dx presenta distribución de tipo gaussiano (por muchas colisiones, todas independientes, con diversas pérdidas de energías δE_n).



Distribución Tipo Gauss

Fórmula de Bethe - Bloch:

Pérdida media de energía por unidad de distancia recorrida en materia

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = K \frac{Z}{A} \cdot \frac{z^2}{\beta^2} \cdot \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 E_{cin_{max}}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right] \cdot \rho$$

densidad

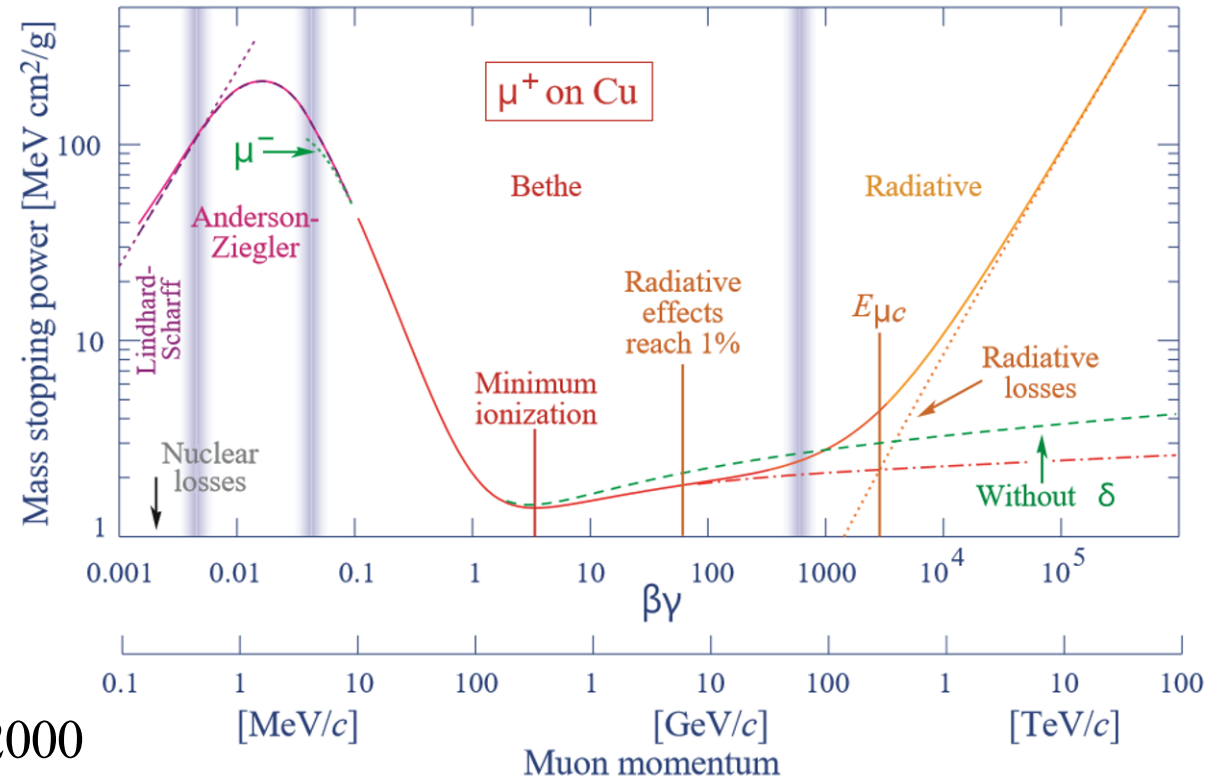
Comportamiento característico con la energía del muón que atraviesa el material:

Empezando con energías de MeV, $\beta\gamma \approx 0.05$ al aumentar la energía,

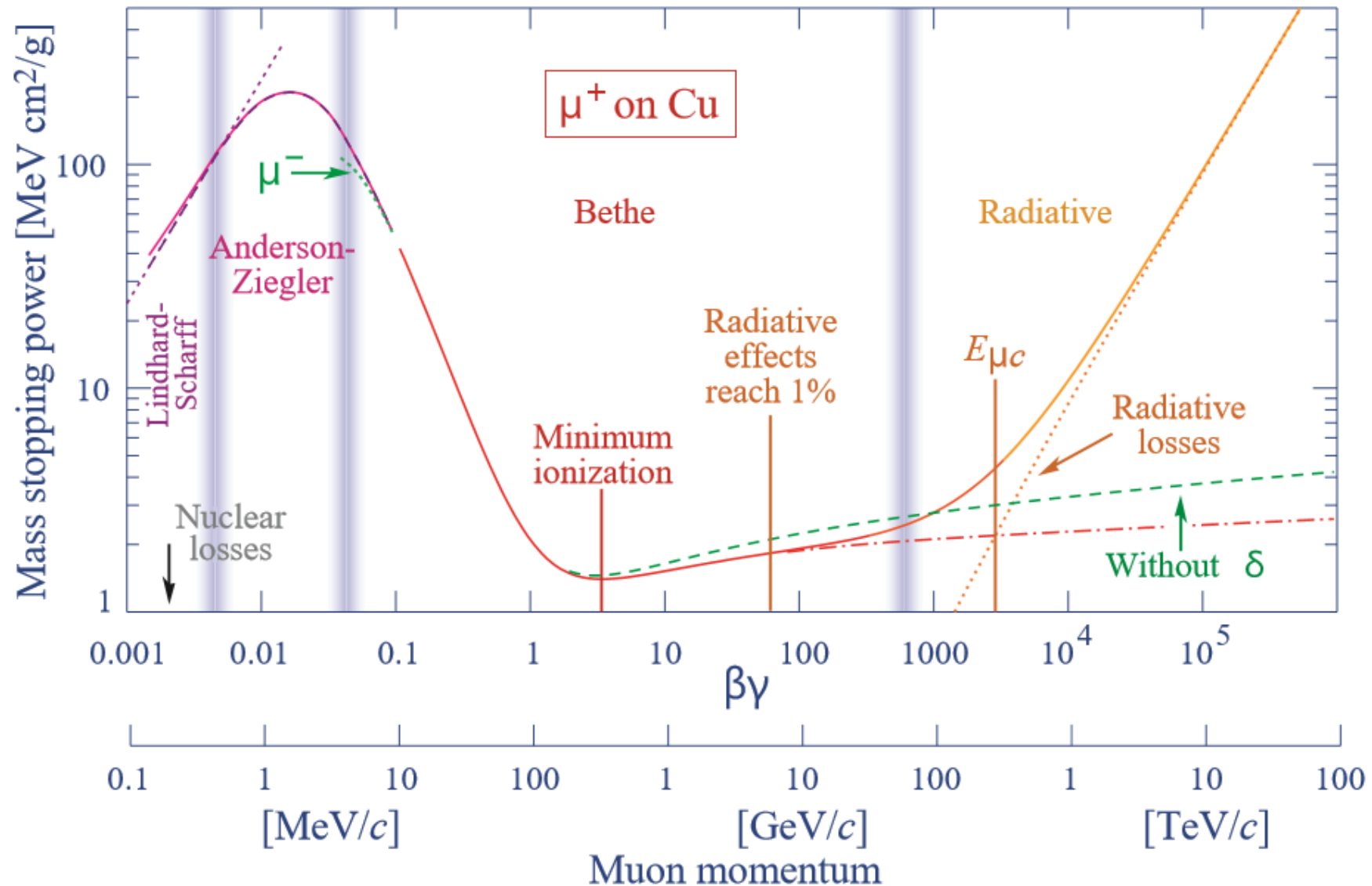
la pérdida de energía por unidad recorrida disminuye primero disminuye, como $1/\beta^2$, alcanza un mínimo

(partículas “mínimamente ionizantes”), $\beta\gamma \approx 3 \rightarrow 4$ y luego vuelve a aumentar lentamente.

Después hay fuerte aumento logarítmico. $\beta\gamma > 2000$



Muones incidiendo sobre Cobre: *Resumen pérdidas de energía*



Pérdida de energía por radiación *Bremsstrahlung*

Caso: Muones

En muones la ionización domina hasta muy altas energías, pero...

Muones también pierden energía por **radiación**,

efecto que se da como dominante para las más altas energías, efecto relativista, para $\beta\gamma > 1000$

$$E \gtrsim 500 \text{ GeV}$$

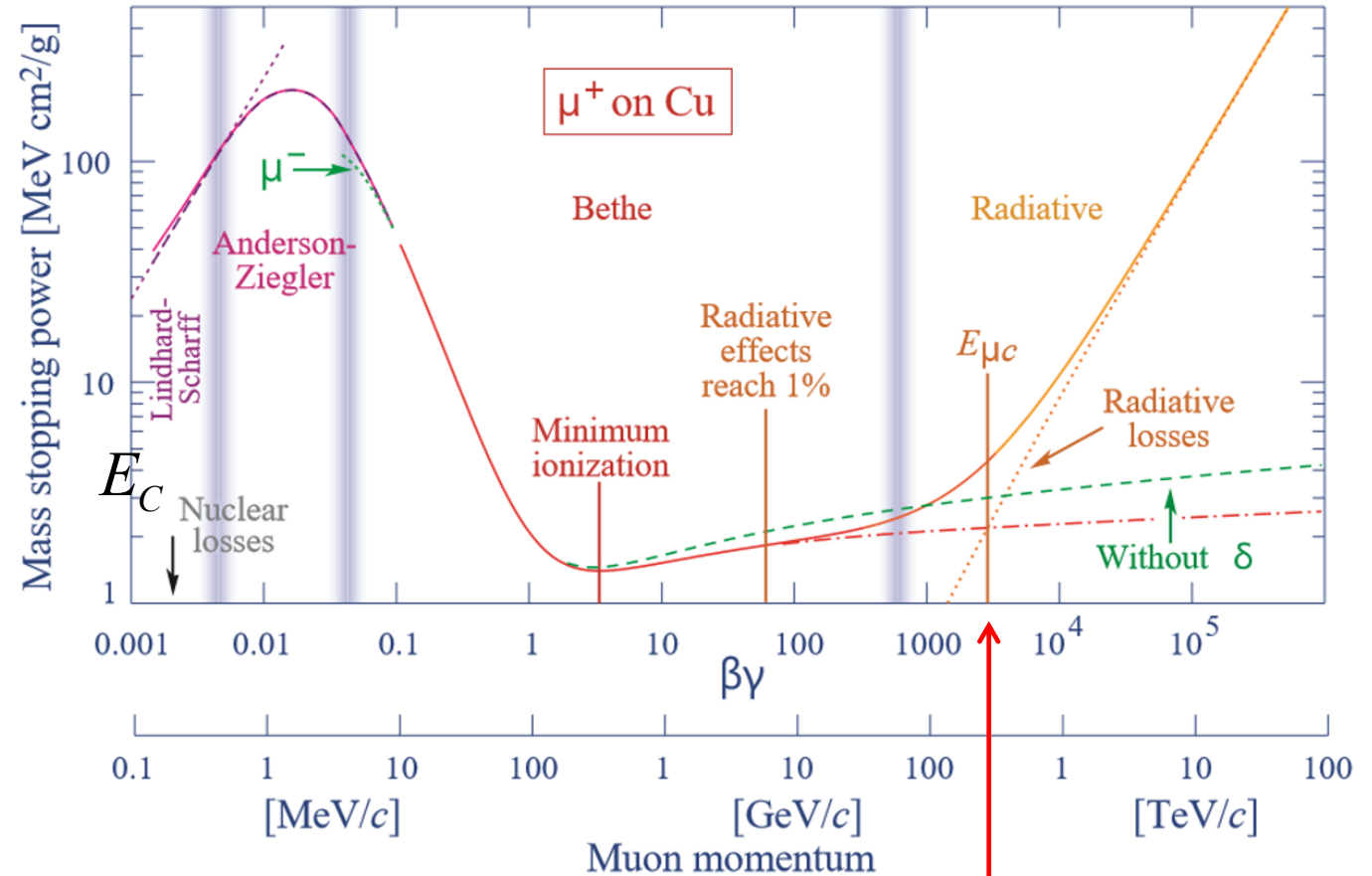
A partir de la **Energía Crítica** para muones:

$$E_C$$

es mayor el efecto de radiación que ionización.

La **energía crítica** del muón en el medio es la energía para la cual vale ...

$$\left. \frac{dE}{E} (E_C) \right|_{\text{Bremsstrahlung}} = \left. \frac{dE}{E} (E_C) \right|_{\text{Ionizacion}}$$



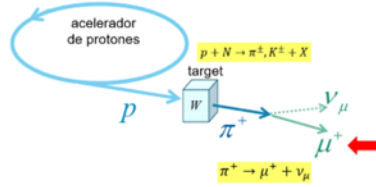
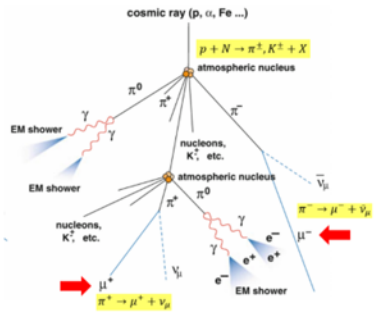
Producción de muones

Energías de los muones como resultan de la producción comparando rayos cósmicos con aceleradores

Muones incidiendo sobre Cobre: Resumen pérdidas de energía

EN RAYOS CÓSMICOS

EN ACELERADORES DE PARTÍCULAS



- Proceso previo (interacción fuerte)
Producción hadrónica $p + N \rightarrow \pi^\pm, K^\pm + X$
- Producción por decaimiento de mesones
Interacción débil $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu$

$$\tau_{\pi^\pm} \approx 2.6 \times 10^{-8} \text{ s}$$

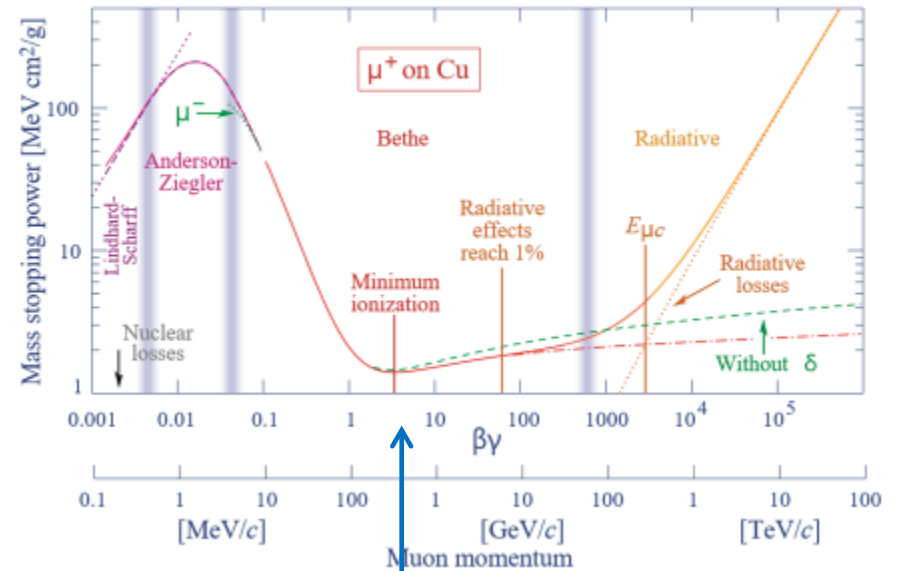
Es un decaimiento de dos cuerpos \rightarrow el muón sale con energía bien definida en el sistema del pión.

...depende de la energía del pión.

Fuente de muones	Proceso de producción	Energía típica	Fuente de muones	Proceso de producción	Energía típica
Rayos cósmicos	$\pi, K \rightarrow \mu$ en vuelo	GeV (media ≈ 4 GeV)	Acelerador	π en reposo $\rightarrow \mu\nu$	≈ 4 MeV (monocromático)
Rayos cósmicos	espectro completo	~ 0.1 GeV \rightarrow TeV+	Acelerador	π relativista $\rightarrow \mu\nu$	$\approx 0.1 - \text{varios GeV}$

La energía del muón está dominada por el boost del pión.

- Pión en reposo \rightarrow muón de 4 MeV
- Pión relativista \rightarrow muón de energía alta



4 GeV: Energía media de muones de rayos cósmicos

$$\beta\gamma \sim 3-4$$

$$E_\mu \sim \text{unos pocos GeV}$$

El mínimo en dE/dx ocurre justo coincidiendo con la energía media de muones de rayos cósmicos.

Muones cósmicos en la superficie de la Tierra:

Energía media: $E \sim 4$ GeV

Masa del muón: $m_\mu c^2 \sim 0.106$ GeV

Entonces:

$$\gamma \sim \frac{E}{m} \sim 40 \quad \beta \approx 0.9 \quad \beta\gamma \approx 36$$

$\beta\gamma \sim 10-100$

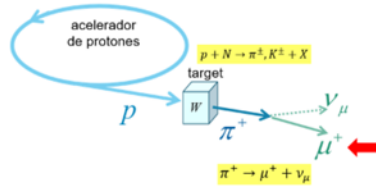
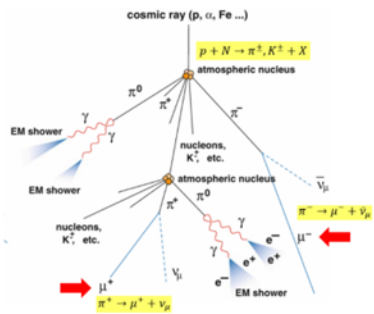
Los muones cósmicos están en régimen relativista donde la curva es plana y cerca del mínimo.

Los muones llegan a la Tierra justo en la región donde la pérdida de energía es mínima.

Producción de muones

EN RAYOS CÓSMICOS

EN ACELERADORES DE PARTÍCULAS



1. Proceso previo (interacción fuerte)
Producción hadrónica $p + N \rightarrow \pi^\pm, K^\pm + X$
2. Producción por decaimiento de mesones
Interacción débil $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu$

$$\tau_{\pi^\pm} \approx 2.6 \times 10^{-8} \text{ s}$$

Energías de los muones como resultan de la producción comparando rayos cósmicos con aceleradores

Es un decaimiento de dos cuerpos → el muón sale con energía bien definida en el sistema del pion.

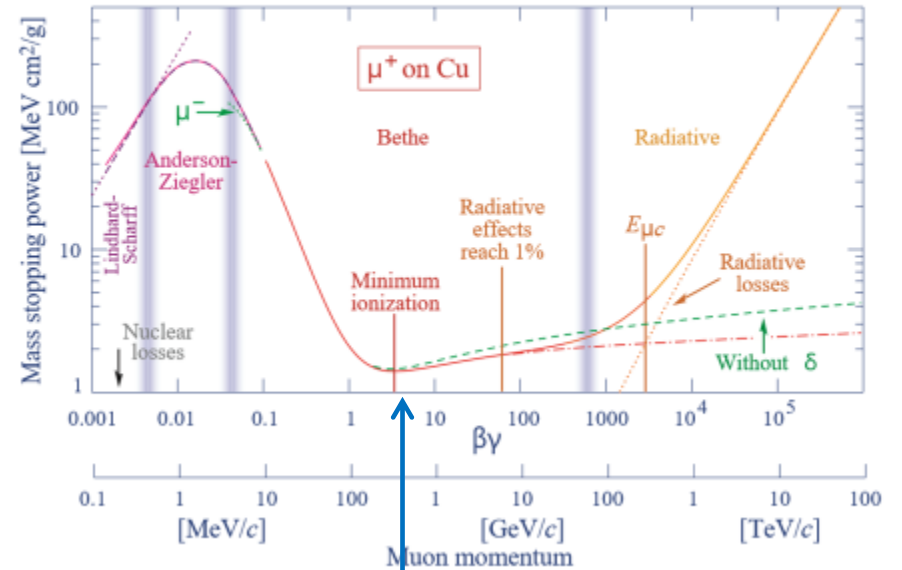
...depende de la energía del pion.

Fuente de muones	Proceso de producción	Energía típica	Fuente de muones	Proceso de producción	Energía típica
Rayos cósmicos	$\pi, K \rightarrow \mu$ en vuelo	GeV (media ≈ 4 GeV)	Acelerador	π en reposo $\rightarrow \mu\nu$	≈ 4 MeV (monocromático)
Rayos cósmicos	espectro completo	~ 0.1 GeV \rightarrow TeV+	Acelerador	π relativista $\rightarrow \mu\nu$	$\approx 0.1 - \text{varios GeV}$

La energía del muón está dominada por el boost del pion.

- Pion en reposo \rightarrow muón de 4 MeV
- Pion relativista \rightarrow muón de energía alta

Muones incidiendo sobre Cobre: Resumen pérdidas de energía



De la curva de Bethe–Bloch se deduce:

- Pierden poca energía por unidad de longitud
- No se frenan rápidamente

Resultado:

Los muones atraviesan grandes espesores de materia. Esto explica por qué llegan:

- al nivel del mar,
- a túneles subterráneos,
- a detectores profundamente enterrados.

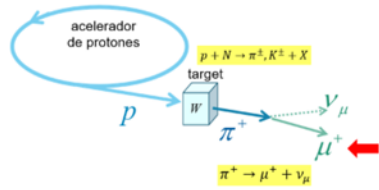
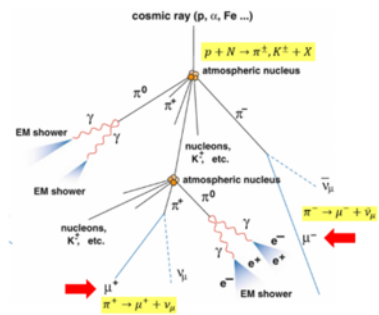
Consecuencias:

- Los muones penetran profundamente.
- dE/dx casi uniforme en amplio rango de energía.
- Comportamiento predecible.
- Los muones permiten hacer “radiografías naturales” de objetos grandes..
- Pueden atravesar:
 - Volcanes, pirámides, estructuras industriales.

Producción de muones

EN RAYOS CÓSMICOS

EN ACELERADORES DE PARTÍCULAS



1. Proceso previo (interacción fuerte)
Producción hadrónica $p + N \rightarrow \pi^\pm, K^\pm + X$
2. Producción por decaimiento de mesones
interacción débil
 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$
 $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$

$$\tau_{\pi^\pm} \approx 2.6 \times 10^{-8} \text{ s}$$

Energías de los muones como resultan de la producción comparando rayos cósmicos con aceleradores

Es un decaimiento de dos cuerpos \rightarrow el muón sale con **energía bien definida** en el sistema del pión.

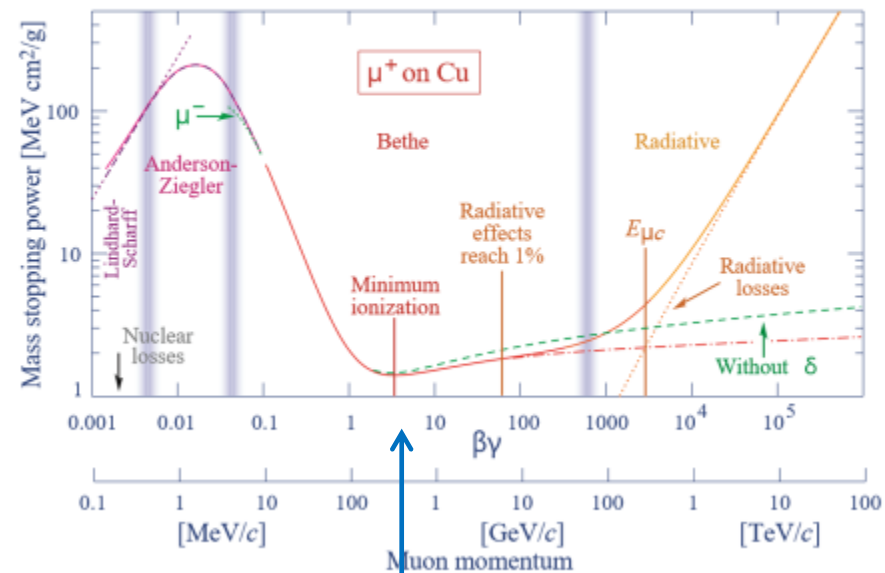
...depende de la energía del pión.

Fuente de muones	Proceso de producción	Energía típica	Fuente de muones	Proceso de producción	Energía típica
Rayos cósmicos	$\pi, K \rightarrow \mu$ en vuelo	GeV (media ≈ 4 GeV)	Acelerador	π en reposo $\rightarrow \mu\nu$	≈ 4 MeV (monocromático)
Rayos cósmicos	espectro completo	~ 0.1 GeV \rightarrow TeV+	Acelerador	π relativista $\rightarrow \mu\nu$	$\approx 0.1 - \text{varios GeV}$

La energía del muón está dominada por el boost del pión.

- Pión en reposo \rightarrow muón de 4 MeV
- Pión relativista \rightarrow muón de energía alta

Muones incidiendo sobre Cobre: Resumen pérdidas de energía



4 GeV: Energía media de muones de rayos cósmicos

$\beta\gamma \sim 3-4$
 $E_\mu \sim \text{unos pocos GeV}$

El mínimo en dE/dx ocurre justo coincidiendo con la energía media de muones de rayos cósmicos.

Los muones cósmicos están justo en el punto donde la materia los frena lo menos posible.

Es como si la naturaleza hubiera elegido la energía ideal para que estas partículas atravesasen grandes volúmenes de material, lo que las convierte en sondas naturales para explorar el interior de objetos.

Ionización mínima en diversos materiales

Dependencia de ...

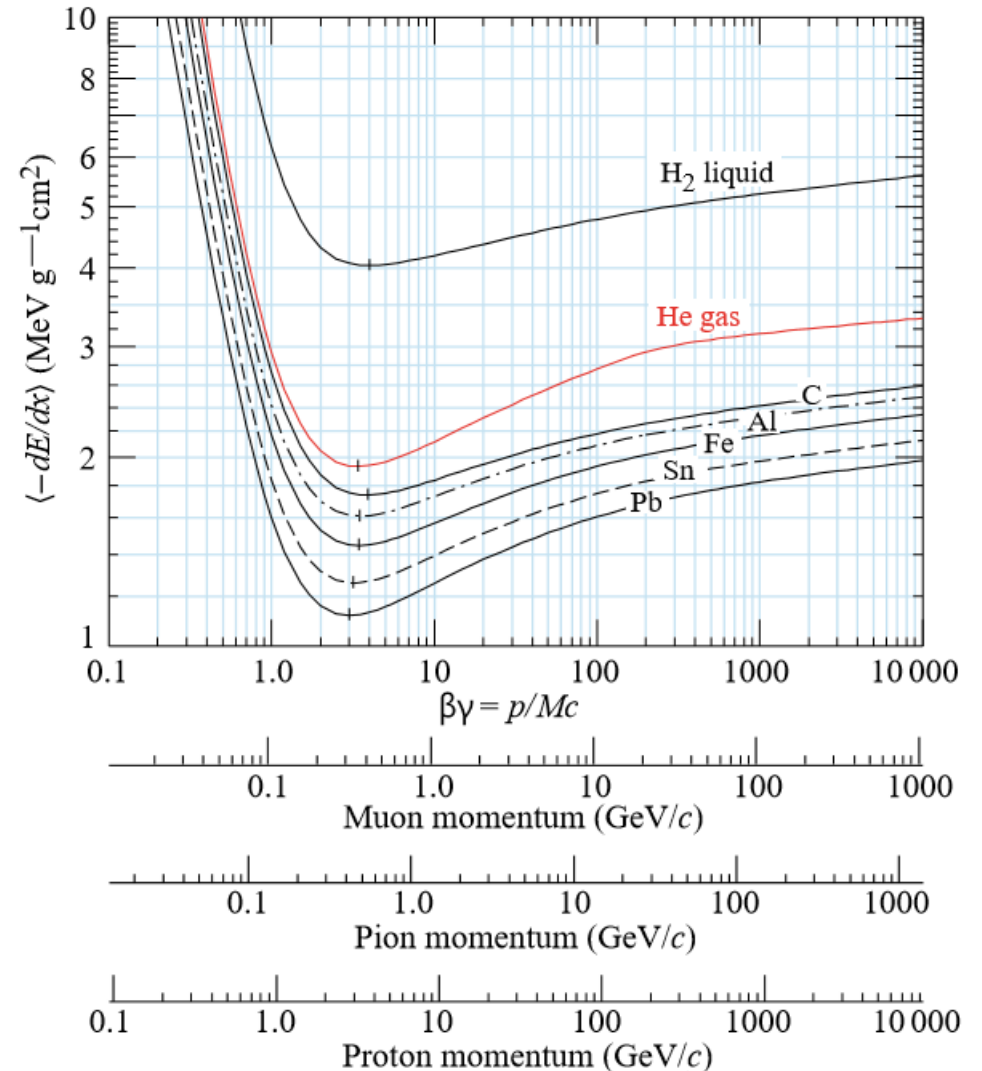
- Masa A
- Carga Z

de los núcleos atómicos del material (target).

Ionización mínima ...

- aproximadamente
 $1 \rightarrow 2 \text{ MeV} / \text{g cm}^{-2}$

dependiendo del material (target).
(Para H_2 : $4 \text{ MeV} / \text{g cm}^{-2}$)



Ionización mínima en diversos materiales

Dependencia de ...

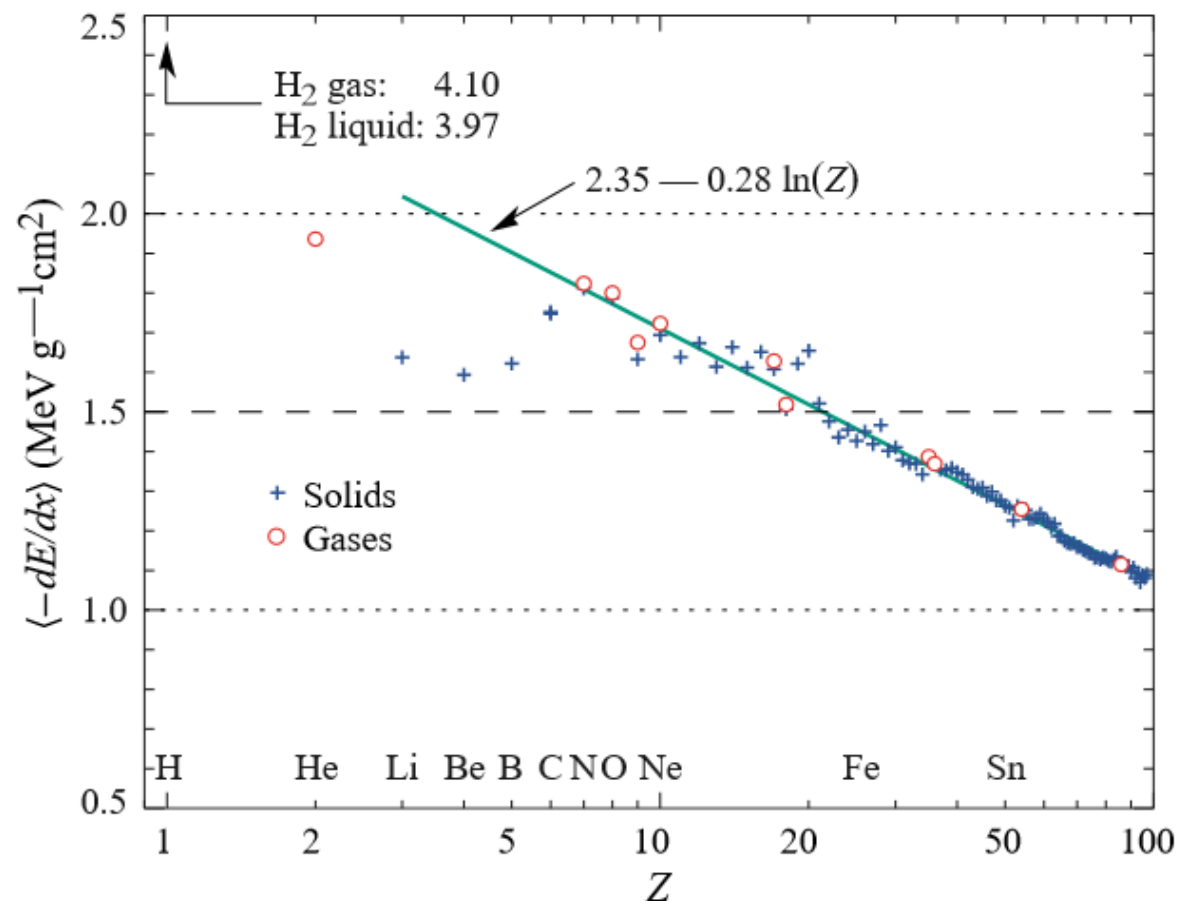
- Masa A
- Carga Z

de los núcleos atómicos del material (target).

Ionización mínima ...

- aproximadamente
 $1 \rightarrow 2 \text{ MeV} / \text{g cm}^{-2}$

dependiendo del material (target).
(Para H_2 : $4 \text{ MeV} / \text{g cm}^{-2}$)



El ajuste (fit) se realizó para $Z > 6$.
No es una función simple de Z ,
por la dependencia de diversas otras variables.

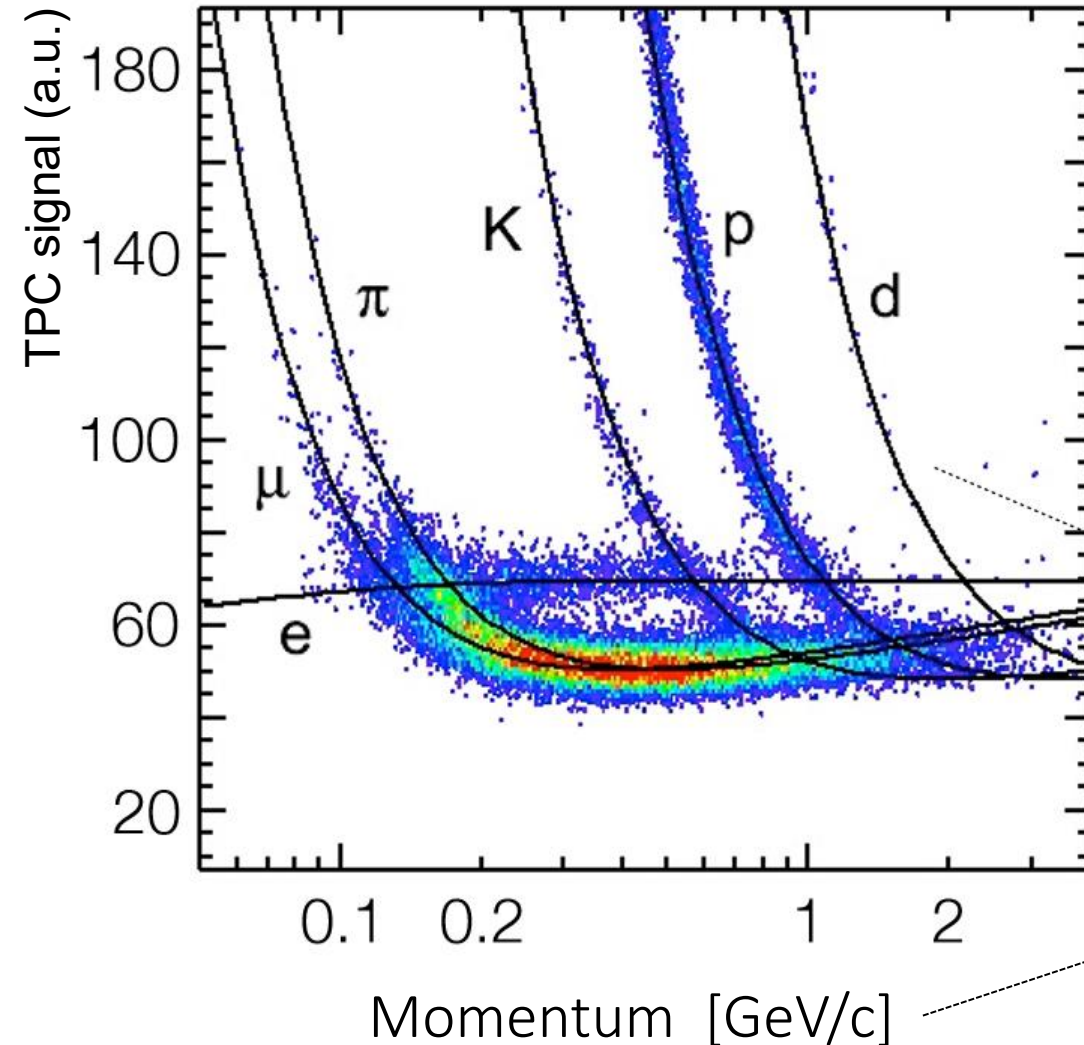
Identificando partículas con dE/dx vs. p

La pérdida de energía como función del momento $p = \gamma m_0 \beta c$ depende de la masa de la partícula.

Se mide:

- momento de la partícula (deflexión en campo magnético)
- pérdida de energía

ScatterPlots ΔE vs. p permiten identificar partículas.



Measured energy loss

[ALICE TPC, 2009]

Bethe-Bloch

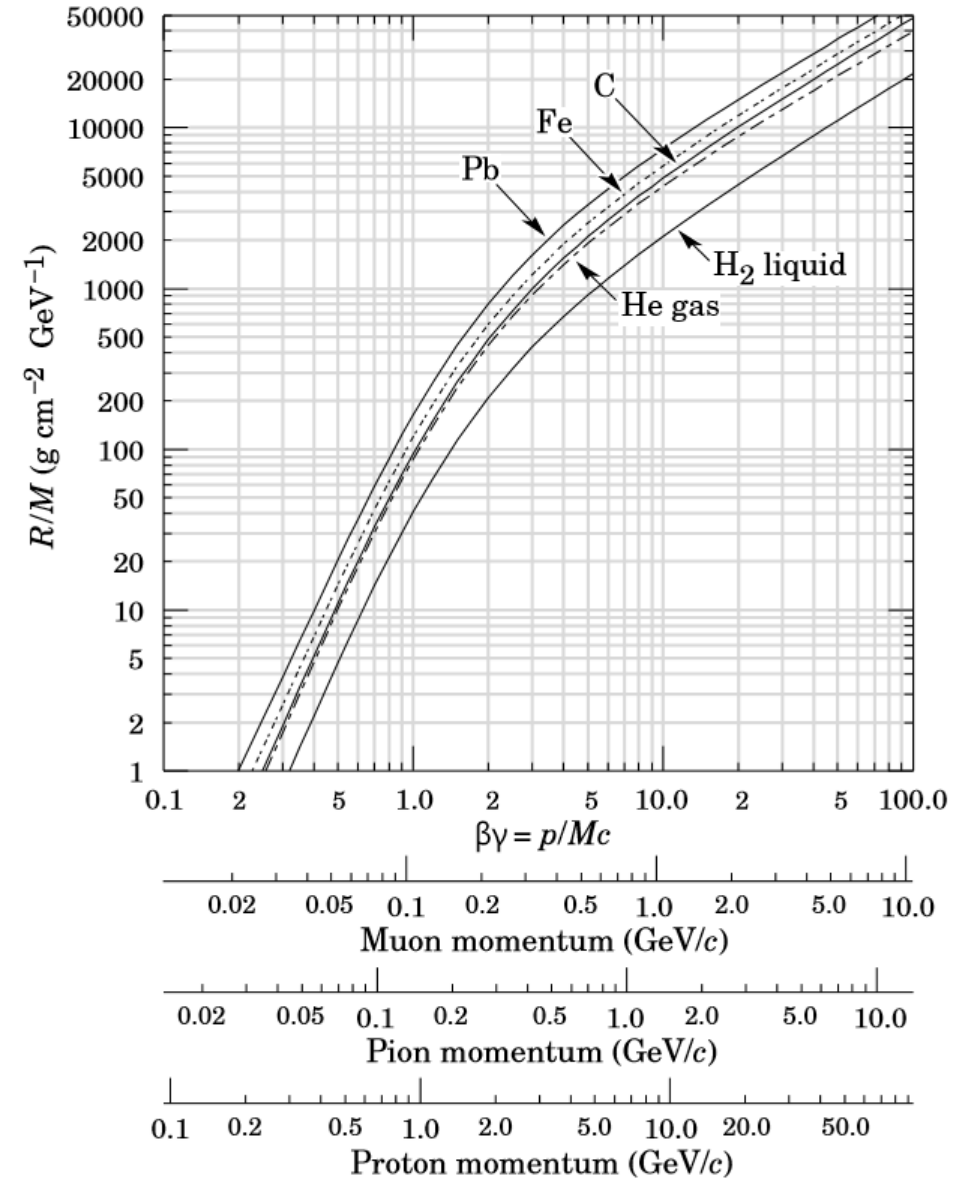
Recordemos:
 dE/dx depende de β .

Alcance medio de las partículas en diversos materiales

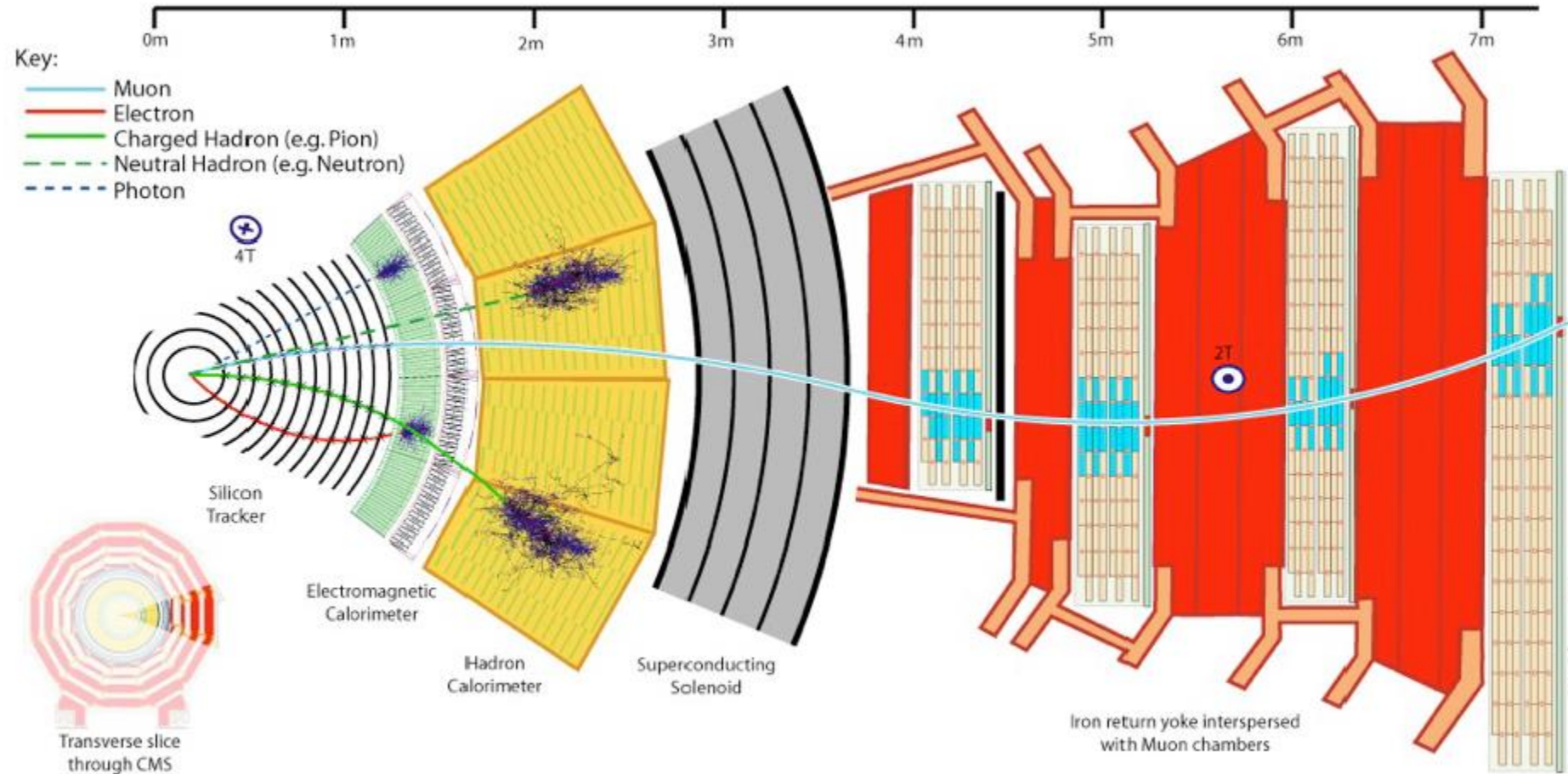
Se integran lo stopping powers dE/dx sobre la pérdida de energía dE desde la energía inicial (incidente) hasta cero de energía (donde alcanza a llegar):

ALCANCE:

$$R = \int_E^0 \left[\frac{dE}{dx} \right]^{-1} \cdot dE$$



Sector del CMS



¡Gracias por su atención!