

Interacción radiación-materia

Introducción

Módulo de instrumentación

Reina Camacho (CNRS, Francia)
Carlos Sandoval (UNAL/UAN, Colombia)



Latin American alliance for
Capacity building in Advanced physics

LA-CoNGA physics



Cofinanciado por el
programa Erasmus+
de la Unión Europea

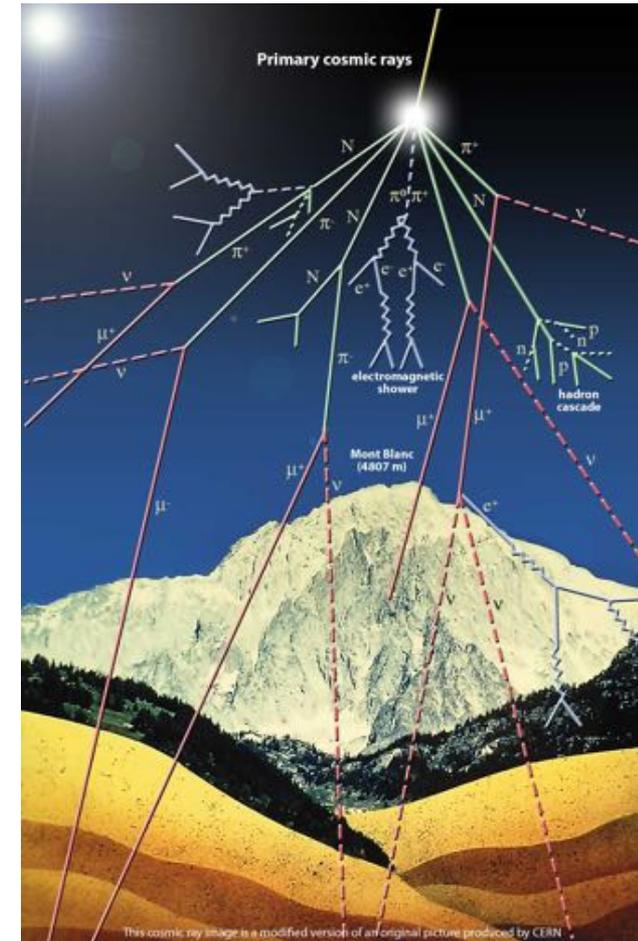




FUENTES DE RADIACIÓN

Origen Natural

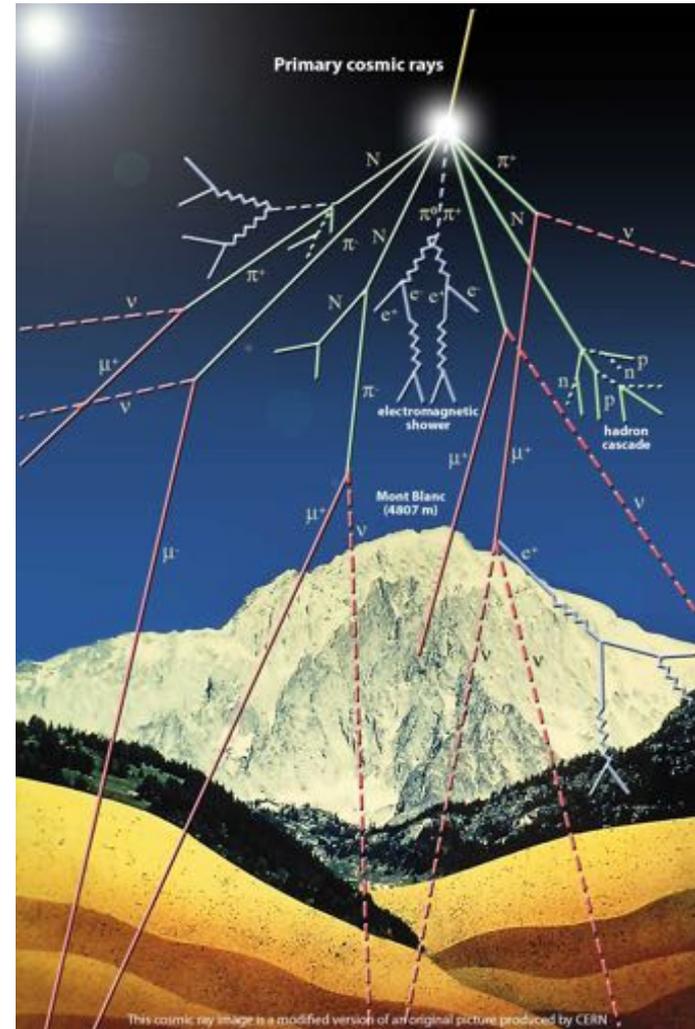
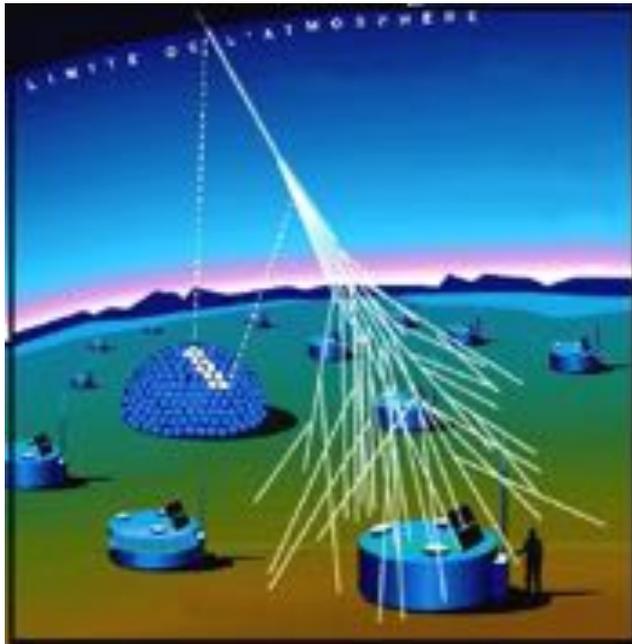
- Rayos C3smicos (altas energías):
 - Radiaci3n c3smica y solar proveniente del espacio que atraviesa la atm3sfera de la tierra
 - Principalmente fotones, n3cleos ligeros y electrones
 - La interacci3n con la atm3sfera produce part3culas secundarias: piones y muones
- Decaimientos nucleares (baja energ3a):
 - Radiaci3n α , β , γ





FUENTES DE RADIACIÓN

- Rayos cósmicos

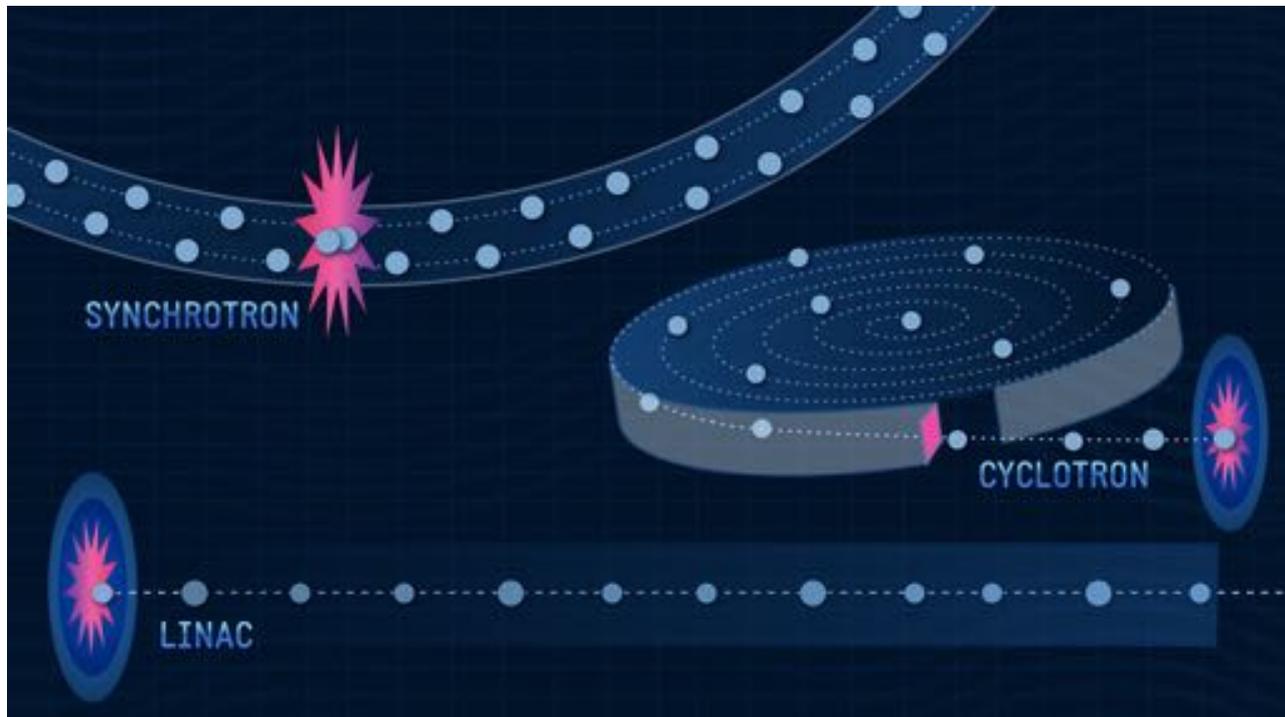




FUENTES DE RADIACIÓN

Origen no-natural

- Aceleradores de partículas:
 - Colisionadores
 - Experimentos de blanco fijo
 - Energías más altas que decaimientos naturales





RANGOS DE ENERGÍA

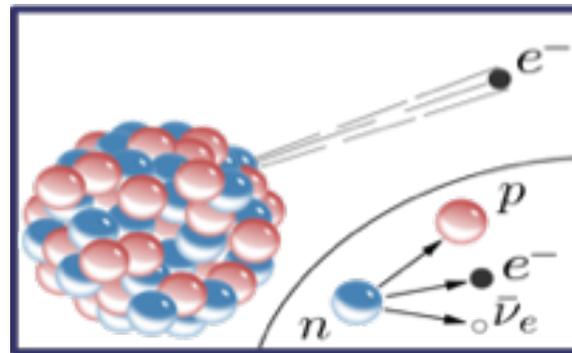
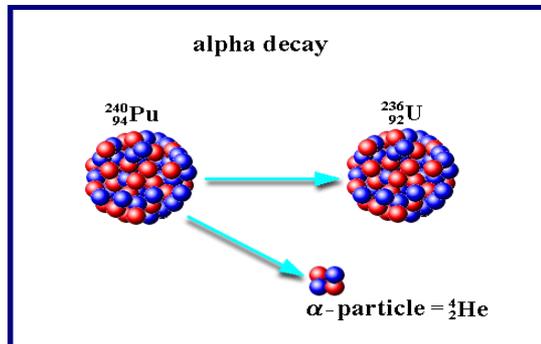
- Medimos la energía en eV:

$$1\text{eV} = e \times 1\text{V} = 1.6 \times 10^{-19}\text{J}$$

- Luz visible:

$$E_\lambda = 500\text{nm} = 2.5\text{ eV}$$

- Estados excitados en átomos: 1 – 100 keV (rayos X)
- Física nuclear: keV – MeV





RANGOS DE ENERGÍA

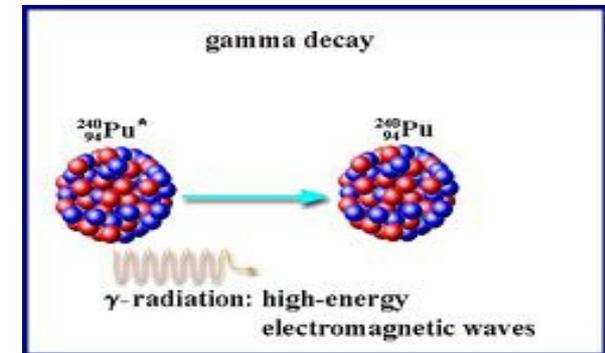
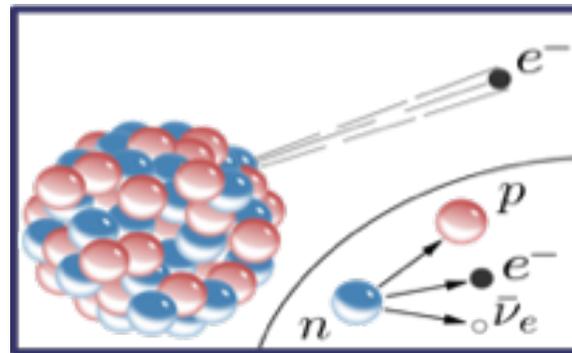
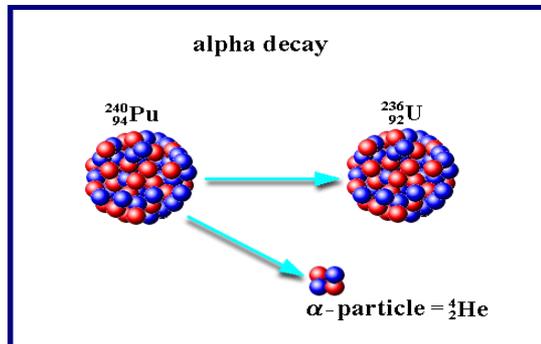
- Medimos la energía en eV:

$$1\text{eV} = e \times 1\text{V} = 1.6 \times 10^{-19}\text{J}$$

- Luz visible:

$$E_\lambda = 500\text{nm} = 2.5\text{ eV}$$

- Estados excitados en átomos: 1 – 100 keV (rayos X)
- Física nuclear: keV – MeV



Estas son “bajas energías”



RANGOS DE ENERGÍA

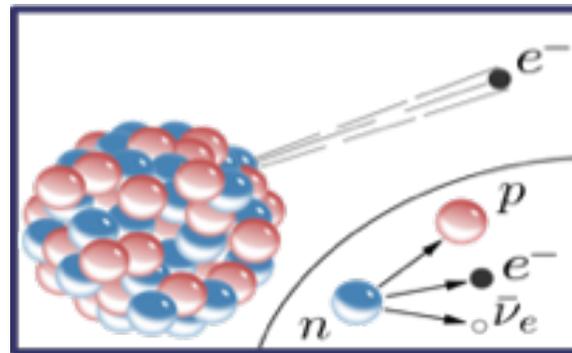
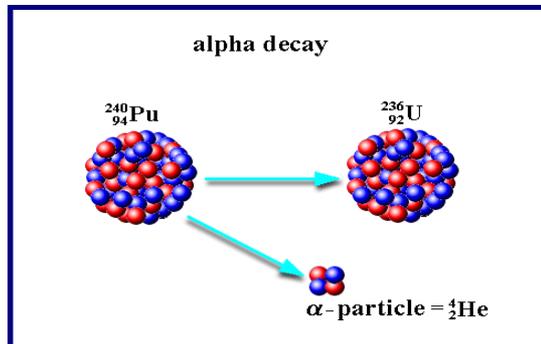
- Medimos la energía en eV:

$$1\text{eV} = e \times 1\text{V} = 1.6 \times 10^{-19}\text{J}$$

- Luz visible:

$$E_\lambda = 500\text{nm} = 2.5\text{ eV}$$

- Estados excitados en átomos: 1 – 100 keV (rayos X)
- Física nuclear: keV – MeV



- Física de partículas: GeV – TeV
- Rayos cósmicos: 10^{20}eV



RANGOS DE ENERGÍA

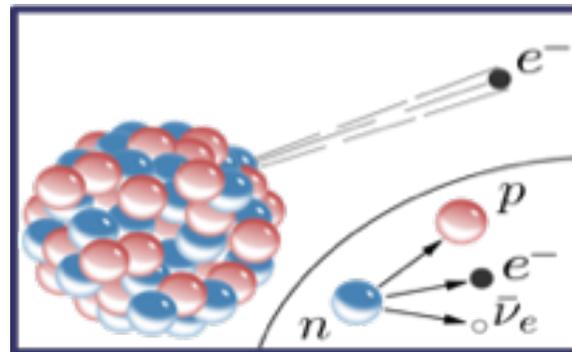
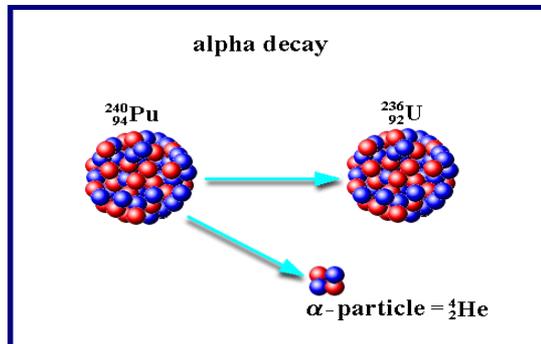
- Medimos la energía en eV:

$$1\text{eV} = e \times 1\text{V} = 1.6 \times 10^{-19}\text{J}$$

- Luz visible:

$$E_{\lambda} = 500\text{nm} = 2.5\text{ eV}$$

- Estados excitados en átomos: 1 – 100 keV (rayos X)
- Física nuclear: keV – MeV



- Física de partículas: GeV – TeV
- Rayos cósmicos: 10^{20}eV

“Altas energías”



RÉGIMEN RELATIVISTA

- Formalismo relativista:

$$E = \gamma m \quad \text{and} \quad \mathbf{p} = \gamma m \boldsymbol{\beta}. \quad \gamma = (1 - \beta^2)^{-\frac{1}{2}} \quad \beta = v/c.$$

$$E^2 - \mathbf{p}^2 = m^2$$

- Transformaciones de Lorentz:

$$\begin{pmatrix} t' \\ x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & 0 & 0 & -\gamma\beta \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\gamma\beta & 0 & 0 & \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

- Cuadri-momento:

$$p^\mu = (E, p_x, p_y, p_z). \quad p^\mu p_\mu = E^2 - \mathbf{p}^2$$
$$p^\mu p_\mu = m^2$$



- Para un sistema de partículas:

$$p^\mu = \sum_{i=1}^n p_i^\mu$$

$$p^\mu p_\mu = \left(\sum_{i=1}^n E_i \right)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \mathbf{p}_i \right)^2$$

es invariante de Lorentz

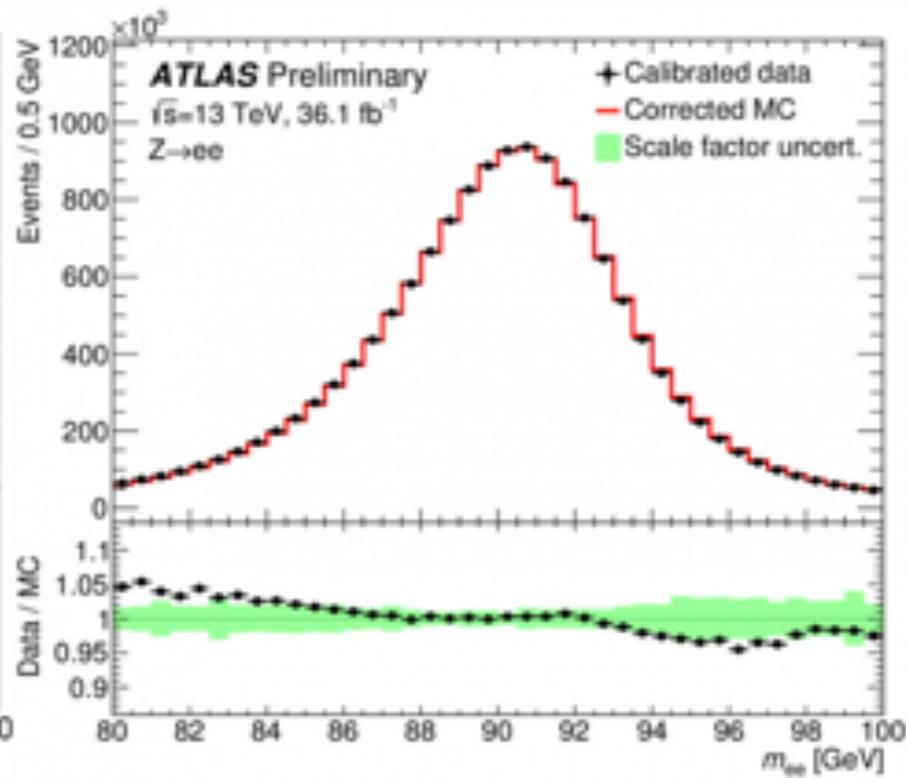
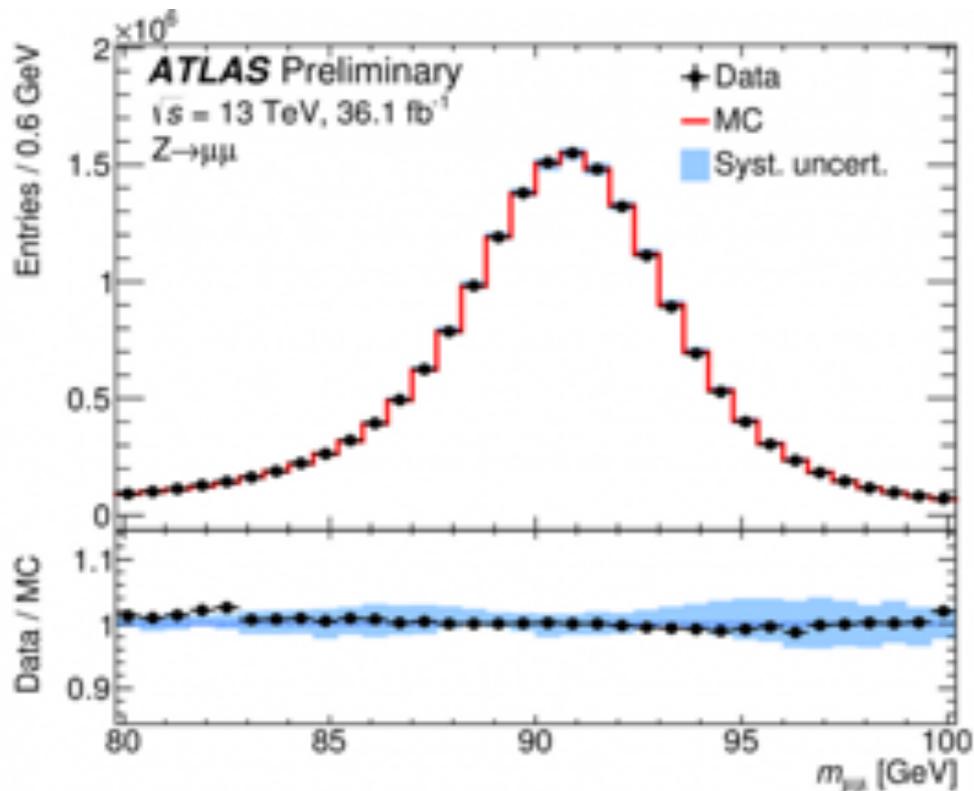
- Para el decaimiento $a \rightarrow 1 + 2$

$$(p_1 + p_2)^\mu (p_1 + p_2)_\mu = p_a^\mu p_{a\mu} = m_a^2.$$



MASA INVARIANTE

- Para identificar/reconstruir una partícula: masa invariante





MASA INVARIANTE

- Considere un pión cargado en reposo que decae $\pi^- \rightarrow \mu^- \nu^-$. Encuentre los momentos de los productos del decaimiento

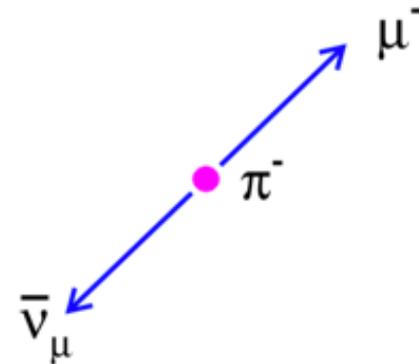
$$\vec{V}_\pi \leftarrow \pi^- \rightarrow \mu^-$$

$$\begin{aligned} \vec{E}_\pi &= \vec{E}_\mu + \vec{E}_\nu \\ \vec{P}_\pi &= \vec{P}_\mu + \vec{P}_\nu = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_\pi &= E_{0\pi} = M_\pi \\ \vec{E}_\nu &= \vec{P}_\nu \end{aligned}$$

$$(E_\pi - E_\mu)^2 = E_\nu^2 = \vec{P}_\nu^2 = \vec{P}_\mu^2$$

$$\begin{aligned} E_\pi^2 - 2E_\pi E_\mu + E_\mu^2 &= \vec{P}_\mu^2 \\ M_\pi^2 + \underline{E_\mu^2} - \vec{P}_\mu^2 &= 2E_\pi E_\mu \end{aligned}$$



$$\frac{M_\pi^2 + M_\mu^2}{2M_\pi} = E_\mu \rightarrow \vec{P}_\mu = \sqrt{E_\mu^2 - M_\mu^2} = |\vec{P}_\nu|$$

$$\textcircled{X_0} \rightarrow \underline{1} + \underline{2}$$

$$\begin{aligned} M_X &= (E_1 + E_2)^2 - (\vec{P}_1 + \vec{P}_2)^2 \\ &= E_1^2 + 2E_1 E_2 + E_2^2 - \vec{P}_1^2 - 2\vec{P}_1 \vec{P}_2 - \vec{P}_2^2 \end{aligned}$$

$$\textcircled{M_X} = M_1^2 + M_2^2 + \underline{2E_1 E_2} - 2|\underline{P_1}| |\underline{P_2}| \cos\theta$$



- Unidades naturales: escogemos la energía como unidad de medida escogiendo $c = \hbar = 1$

Quantity	[kg, m, s]	$[\hbar, c, \text{GeV}]$	$\hbar = c = 1$
Energy	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$	GeV	GeV
Momentum	kg m s^{-1}	GeV/c	GeV
Mass	kg	GeV/c^2	GeV
Time	s	$(\text{GeV}/\hbar)^{-1}$	GeV^{-1}
Length	m	$(\text{GeV}/\hbar c)^{-1}$	GeV^{-1}
Area	m^2	$(\text{GeV}/\hbar c)^{-2}$	GeV^{-2}



DECAIMIENTOS DE PARTÍCULAS

- Tiempo de vida de una partícula (promedio o media)
- Tasa de decaimiento (Γ): probabilidad por unidad de tiempo de que la partícula de interés decaiga
- Si tenemos $N(t)$ partículas, $N\Gamma dt$ partículas decaerían en el siguiente instante dt

$$dN = -\Gamma N dt$$

- Se puede ver que

$$N(t) = N(0)e^{-\Gamma t}$$

- Y el tiempo de vida media:

$$\tau = \frac{1}{\Gamma}$$



DECAIMIENTOS DE PARTÍCULAS

- Las partículas pueden decaer de diferentes formas (modos de decaimiento o canales)
- La tasa total de decaimiento es la suma de las tasas de decaimiento individuales:

$$\Gamma = \sum_j \Gamma_j$$

Contiene información de acoples, de la física

- Razones de decaimiento: frecuencia relativa de cada modo de decaimiento:

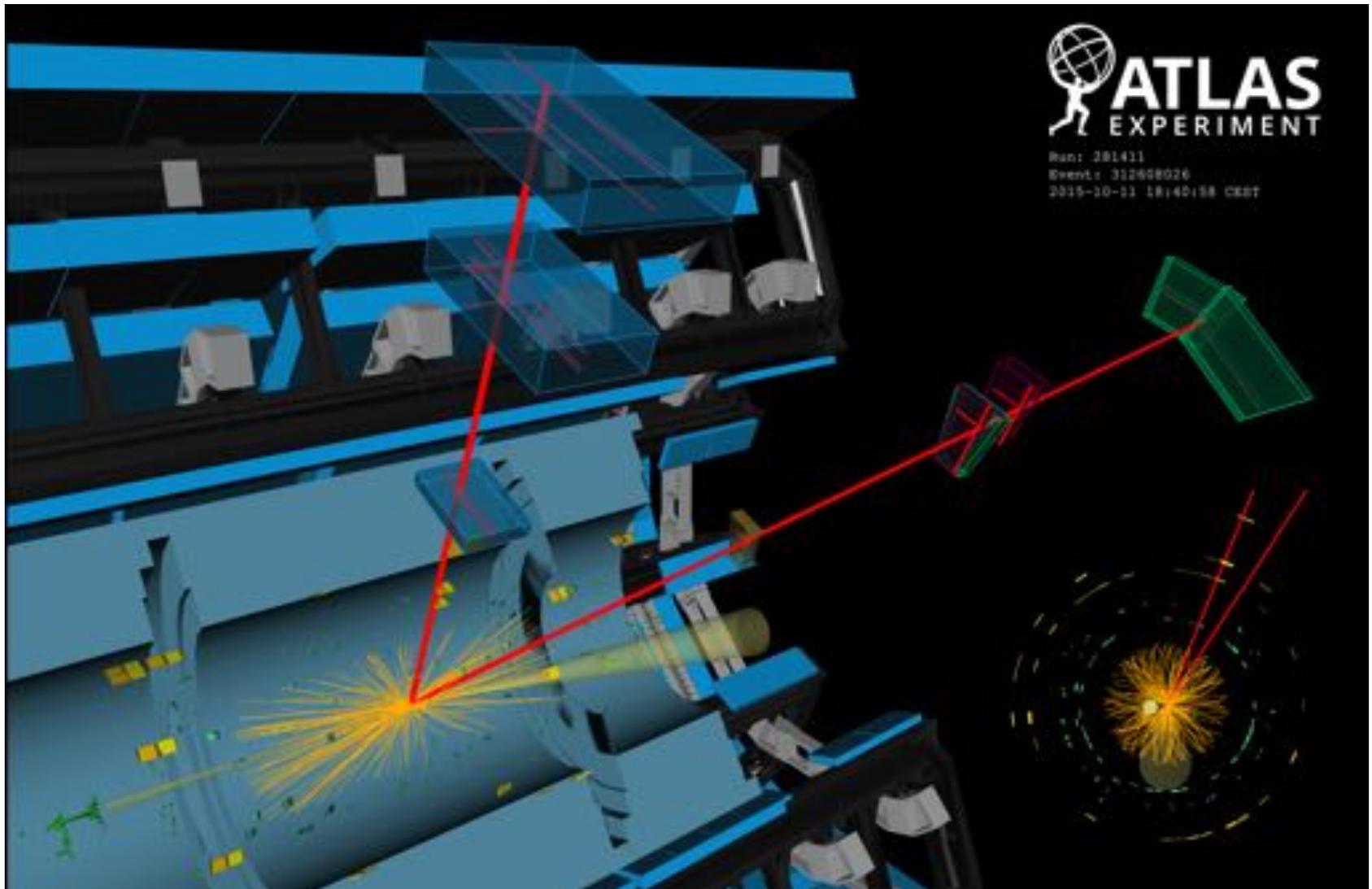
$$BR(j) = \frac{\Gamma_j}{\Gamma}$$

- Los estados de decaimiento no corresponden a un solo valor de energía, tienen un rango:

$$\Delta E \tau \sim \hbar \quad \xrightarrow{\text{yields}} \quad \Delta E \sim \frac{\hbar}{\tau} = \hbar \Gamma$$



DECAIMIENTOS DE PARTÍCULAS





DISPERSIÓN DE PARTÍCULAS

- En la dispersión de partículas nos interesa la tasa de interacción
- La tasa de interacción por cada partícula blanco es proporcional al flujo de partículas incidentes por la **sección eficaz σ**
- Sección eficaz (σ): area de sección de interacción con la partícula blanco – probabilidad de interacción

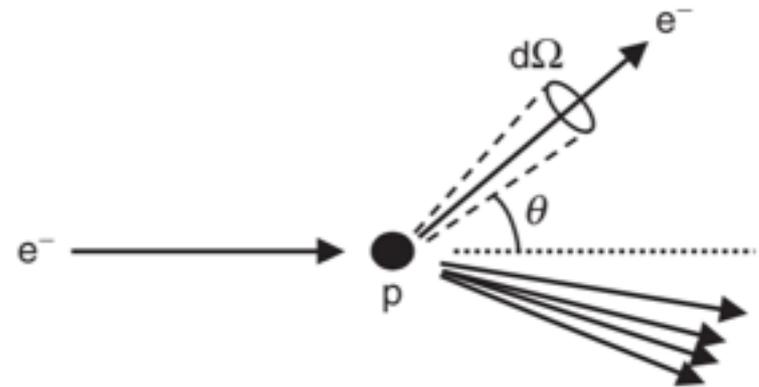
$$\sigma = \frac{\text{number of interactions per unit time per target particle}}{\text{incident flux}}$$

- Parámetro de impacto (b): distancia a la cual la partícula incidente habría pasado sin interactuar con el centro de dispersión
- Unidades: 1 barn (b) = 10^{-28} m²



DISPERSIÓN DE PARTÍCULAS

- Sección eficaz diferencial: medida de la probabilidad de interacción con alguna restricción cinemática
- Ejemplo: distribución angular



$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\text{number of particles scattered into } d\Omega \text{ per unit time per target particle}}{\text{incident flux}}$$

- Pueden ser otras cantidades (energía, momento, etc) $\frac{d\sigma}{dE}$
- Sección eficaz total: $\sigma = \int \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega.$



MIDIENDO PARTÍCULAS

- La lista de partículas elementales y compuestas es muy larga
- Mesones ($q\bar{q}$)
- Bariones (qqq)

Nucleons		Δ particles		Λ particles		Σ particles		Σ and Ω particles		Charmed particles		Bottom particles	
p	$\frac{1}{2}^+$	$\Delta(1232)$	$\frac{3}{2}^+$	Λ	$\frac{1}{2}^+$	Σ^+	$\frac{1}{2}^+$	Σ^0	$\frac{1}{2}^+$	Λ_c^+	$\frac{1}{2}^+$	Λ_b^0	$\frac{1}{2}^+$
n	$\frac{1}{2}^+$	$\Delta(1600)$	$\frac{3}{2}^+$	$\Lambda(1405)$	$\frac{1}{2}^-$	Σ^0	$\frac{1}{2}^+$	Σ^-	$\frac{1}{2}^+$	$\Lambda_c(2280)^0$	$\frac{1}{2}^-$	$\Lambda_b(5812)^0$	$\frac{1}{2}^-$
N(1440)	$\frac{1}{2}^+$	$\Delta(1620)$	$\frac{1}{2}^-$	$\Lambda(1520)$	$\frac{3}{2}^-$	Σ^-	$\frac{1}{2}^+$	$\Sigma(1630)$	$\frac{3}{2}^+$	$\Lambda_c(2620)^+$	$\frac{3}{2}^-$	$\Lambda_b(5820)^0$	$\frac{3}{2}^-$
N(1520)	$\frac{3}{2}^-$	$\Delta(1700)$	$\frac{3}{2}^-$	$\Lambda(1600)$	$\frac{1}{2}^+$	$\Sigma(1385)$	$\frac{3}{2}^+$	$\Sigma(1420)$	*	$\Lambda_c(2760)^+$	*	Λ_b	$\frac{1}{2}^+$
N(1535)	$\frac{1}{2}^-$	$\Delta(1750)$	$\frac{1}{2}^+$	$\Lambda(1670)$	$\frac{1}{2}^-$	$\Sigma(1480)$	*	$\Sigma(1690)$	**	$\Lambda_c(2880)^+$	$\frac{3}{2}^+$	Λ_b	$\frac{3}{2}^+$
N(1650)	$\frac{1}{2}^-$	$\Delta(1900)$	$\frac{1}{2}^-$	$\Lambda(1690)$	$\frac{3}{2}^-$	$\Sigma(1540)$	**	$\Sigma(1820)$	$\frac{3}{2}^-$	$\Lambda_c(2940)^+$	$\frac{3}{2}^-$	Λ_b	$\frac{1}{2}^+$
N(1675)	$\frac{3}{2}^-$	$\Delta(1905)$	$\frac{3}{2}^+$	$\Lambda(1710)$	$\frac{1}{2}^+$	$\Sigma(1580)$	$\frac{3}{2}^-$	$\Sigma(1950)$	**			$\Lambda_b(5935)^0$	$\frac{1}{2}^+$
N(1680)	$\frac{3}{2}^+$	$\Delta(1910)$	$\frac{1}{2}^+$	$\Lambda(1800)$	$\frac{1}{2}^-$	$\Sigma(1620)$	$\frac{1}{2}^-$	$\Sigma(2000)$	$\frac{3}{2}^+$	$\Lambda_c(2455)$	$\frac{1}{2}^+$	$\Lambda_b(5945)^0$	$\frac{3}{2}^+$
N(1700)	$\frac{3}{2}^-$	$\Delta(1920)$	$\frac{3}{2}^+$	$\Lambda(1810)$	$\frac{1}{2}^+$	$\Sigma(1660)$	$\frac{1}{2}^+$	$\Sigma(2120)$	*	$\Lambda_c(2520)$	$\frac{3}{2}^+$	$\Lambda_b(5950)^0$	$\frac{3}{2}^+$
N(1710)	$\frac{1}{2}^+$	$\Delta(1930)$	$\frac{3}{2}^-$	$\Lambda(1820)$	$\frac{3}{2}^+$	$\Sigma(1670)$	$\frac{3}{2}^-$	$\Sigma(2250)$	**	$\Lambda_c(2800)$	**	Λ_b	$\frac{1}{2}^+$
N(1720)	$\frac{3}{2}^+$	$\Delta(1940)$	$\frac{3}{2}^-$	$\Lambda(1830)$	$\frac{3}{2}^-$	$\Sigma(1690)$	**	$\Sigma(2370)$	**			$\Lambda_b(4380)^+$	*
N(1860)	$\frac{3}{2}^+$	$\Delta(1950)$	$\frac{1}{2}^+$	$\Lambda(1890)$	$\frac{3}{2}^+$	$\Sigma(1730)$	$\frac{3}{2}^+$	$\Sigma(2500)$	*	Λ_c^+	$\frac{1}{2}^+$	$\Lambda_b(4450)^+$	*
N(1875)	$\frac{3}{2}^-$	$\Delta(2000)$	$\frac{3}{2}^+$	$\Lambda(2000)$	*	$\Sigma(1750)$	$\frac{1}{2}^-$			Λ_c^0	$\frac{1}{2}^+$		
N(1880)	$\frac{1}{2}^+$	$\Delta(2150)$	$\frac{1}{2}^-$	$\Lambda(2030)$	$\frac{1}{2}^-$	$\Sigma(1770)$	$\frac{1}{2}^+$	Ω^-	$\frac{3}{2}^+$	Σ_c^+	$\frac{1}{2}^+$		
N(1890)	$\frac{1}{2}^-$	$\Delta(2200)$	$\frac{1}{2}^-$	$\Lambda(2090)$	$\frac{3}{2}^-$	$\Sigma(1770)$	$\frac{3}{2}^-$	$\Omega(2360)^-$	**	Σ_c^0	$\frac{1}{2}^+$		
N(1900)	$\frac{3}{2}^+$	$\Delta(2300)$	$\frac{3}{2}^+$	$\Lambda(2100)$	$\frac{1}{2}^-$	$\Sigma(1840)$	$\frac{3}{2}^+$	$\Omega(2360)^-$	**	$\Sigma_c(2648)$	$\frac{3}{2}^+$		
N(1990)	$\frac{1}{2}^+$	$\Delta(2350)$	$\frac{1}{2}^-$	$\Lambda(2110)$	$\frac{3}{2}^+$	$\Sigma(1880)$	$\frac{1}{2}^+$	$\Omega(2470)^-$	**	$\Sigma_c(2790)$	$\frac{1}{2}^-$		
N(2000)	$\frac{3}{2}^+$	$\Delta(2390)$	$\frac{1}{2}^+$	$\Lambda(2325)$	$\frac{3}{2}^-$	$\Sigma(1900)$	$\frac{1}{2}^-$			$\Sigma_c(2818)$	$\frac{3}{2}^-$		
N(2040)	$\frac{3}{2}^+$	$\Delta(2400)$	$\frac{3}{2}^-$	$\Lambda(2350)$	$\frac{3}{2}^+$	$\Sigma(1915)$	$\frac{3}{2}^+$			$\Sigma_c(2930)$	*		
N(2060)	$\frac{3}{2}^-$	$\Delta(2420)$	$\frac{1}{2}^+$	$\Lambda(2585)$	**	$\Sigma(1940)$	$\frac{3}{2}^+$			$\Sigma_c(2980)$	**		
N(2100)	$\frac{1}{2}^+$	$\Delta(2750)$	$\frac{1}{2}^-$			$\Sigma(1940)$	$\frac{3}{2}^-$			$\Sigma_c(3055)$	**		
N(2120)	$\frac{3}{2}^-$	$\Delta(2950)$	$\frac{1}{2}^+$			$\Sigma(2000)$	$\frac{1}{2}^-$			$\Sigma_c(3080)$	**		
N(2180)	$\frac{1}{2}^-$					$\Sigma(2030)$	$\frac{1}{2}^+$			$\Sigma_c(3123)$	*		
N(2220)	$\frac{3}{2}^+$					$\Sigma(2070)$	$\frac{3}{2}^+$						
N(2250)	$\frac{3}{2}^-$					$\Sigma(2080)$	$\frac{3}{2}^+$			Ω_c^0	$\frac{1}{2}^+$		
N(2300)	$\frac{1}{2}^+$					$\Sigma(2100)$	$\frac{1}{2}^-$			$\Omega_c(2770)^0$	$\frac{3}{2}^+$		
N(2370)	$\frac{3}{2}^-$					$\Sigma(2250)$	**			$\Omega_c(3000)^0$	**		
N(2600)	$\frac{1}{2}^-$					$\Sigma(2455)$	**			$\Omega_c(3065)^0$	**		
N(2700)	$\frac{1}{2}^+$					$\Sigma(2620)$	**			$\Omega_c(3065)^0$	**		
						$\Sigma(3000)$	*			$\Omega_c(3090)^0$	**		

- La lista de partículas elementales y compuestas es muy larga
 - Mesones ($q\bar{q}$)
 - Bariones (qqq) cientos de partículas
 - Partículas del ME

- La lista de partículas elementales y compuestas es muy larga
 - Mesones ($q\bar{q}$)
 - Bariones (qqq)
 - Partículas del ME
- 27 de estas partículas tiene un tiempo de vida suficiente para ser medidas directamente ($c\tau \geq 1\mu\text{m}$)
- 13 de estas partículas tienen $c\tau < 500\mu\text{m}$ – Trazas cortas: detectores de vértice
- De las 14 partículas restantes, las más frecuentes son:

$$e^{\pm}, \mu^{\pm}, \gamma, \pi^{\pm}, K^{\pm}, K^0, p^{\pm}, n$$

un detector de partículas debe ser capaz de identificar estas partículas y medir su energía y/o momentum

- La lista de partículas elementales y compuestas es muy larga
 - Mesones ($q\bar{q}$)
 - Bariones (qqq)
 - Partículas del ME
- Un detector de partículas debe ser capaz de identificar estas partículas y medir su energía y/o momentum

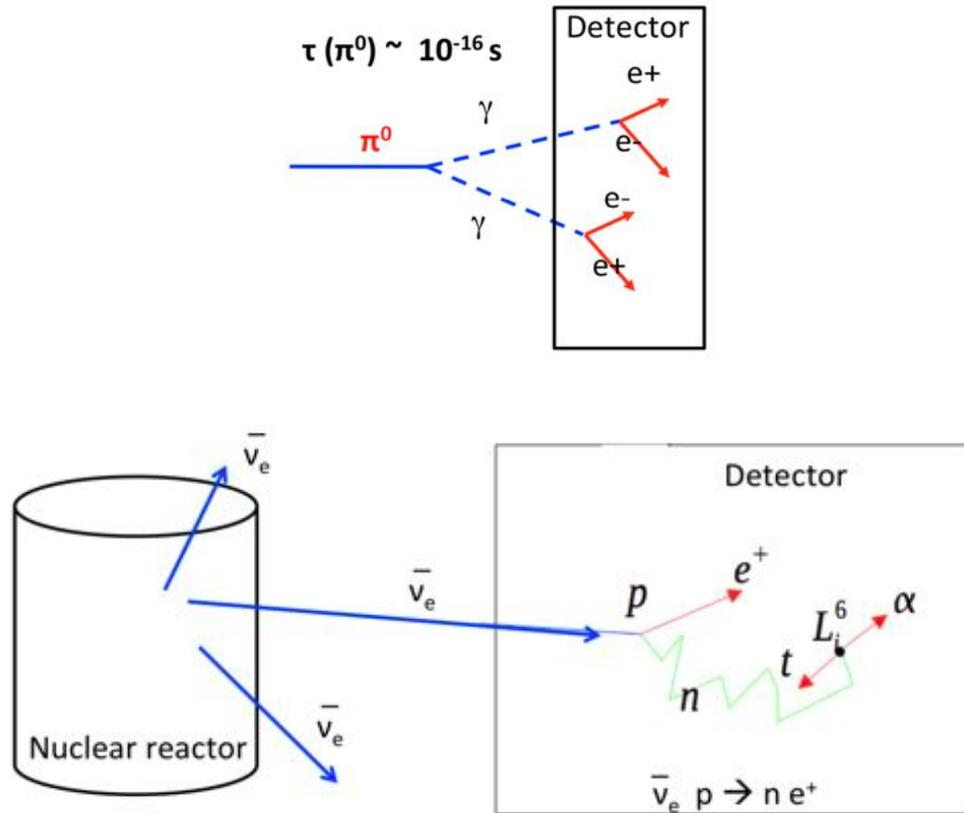
$$e^{\pm}, \mu^{\pm}, \gamma, \pi^{\pm}, K^{\pm}, K^0, p^{\pm}, n$$

- Todas las demás partículas se reconstruyen a través de sus decaimientos
 - Masa invariante del sistema de partículas
 - Separación del vértice de decaimiento del punto de interacción (para algunas partículas que interactúan débilmente)



EJEMPLOS

Algunos ejemplos: detección de fotones(γ), $\pi^0(2\gamma)$, neutrones (n), neutrinos (ν)

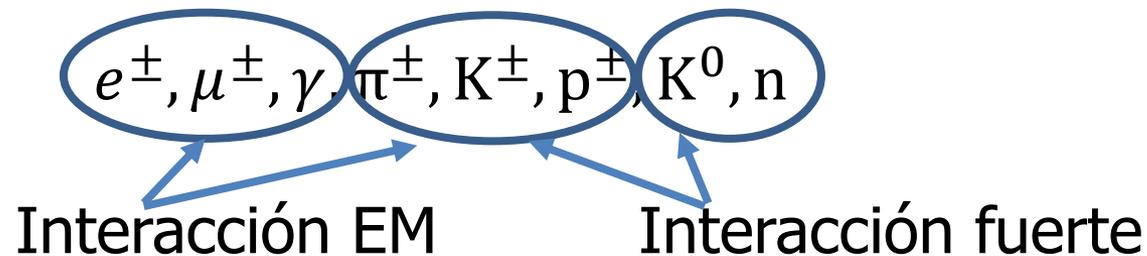


Las señales son inducidas por las interacciones electromagnéticas de las partículas cargadas en los detectores



DETECCIÓN DE PARTÍCULAS

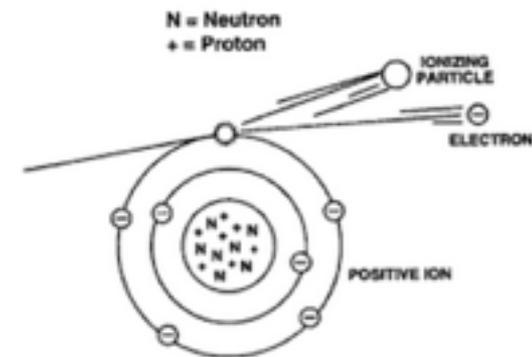
- Los electrones ionizan el medio y pierden energía por Bremsstrahlung
- Los fotones no ionizan pero producen pares que generan cascadas electromagnéticas
- Hadrones cargados ionizan y producen una cascada hadrónica
- Hadrones neutros no ionizan pero también producen una cascada hadrónica
- Los muones ionizan el medio pero no producen una cascada





DETECCIÓN DE PARTÍCULAS

- Principio de la medición: Un sistema desconocido interactúa con un sistema de prueba. La respuesta del sistema de prueba se usa para inferir el valor de alguna cantidad física del sistema desconocido
- Cualquier dispositivo que vaya a detectar una partícula necesita interactuar con esta de alguna manera
- La detección se basa en la interacción de partículas con la materia

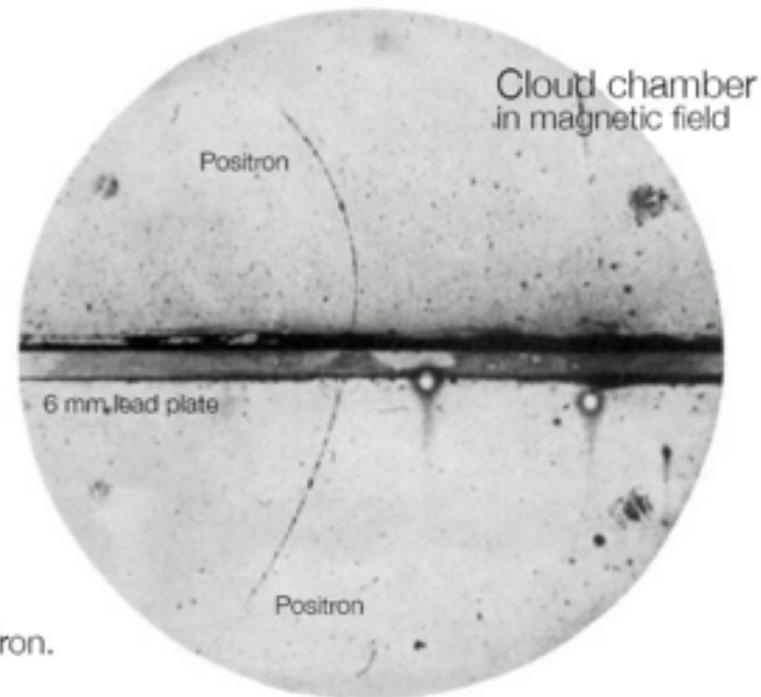




DETECCIÓN DE PARTÍCULAS

- Medidas no-destructivas: la partícula atraviesa el dispositivo dejando algo de su energía
- Ejemplo: el momento de una partícula cargada se puede medir de la curvatura de su trayectoria cuando se aplica un campo magnético (trackers)

Discovery of antimatter
[Anderson 1932; Nobel prize 1936]



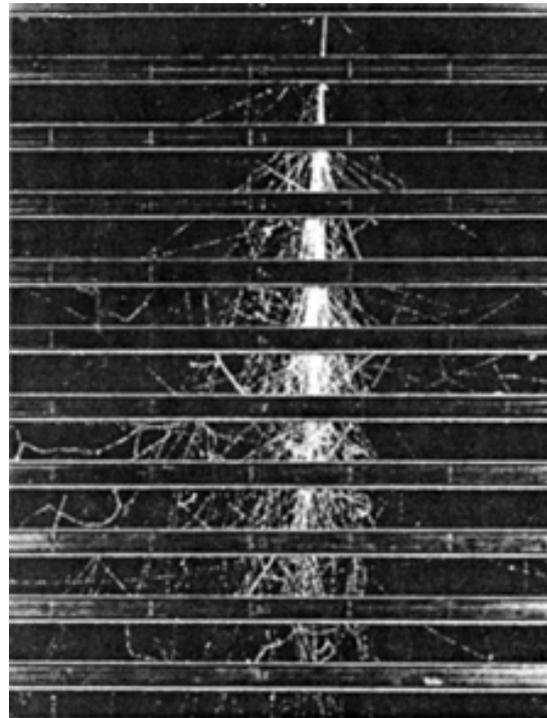
63 MeV positron passing through
lead plate emerging as 23 MeV positron.

The length of this latter pass is at least ten times
greater than the possible length of a proton path of this curvature.



DETECCIÓN DE PARTÍCULAS

- Medidas destructivas: la partícula deja toda su energía y se detiene dentro del detector
- Ejemplo: La energía se mide deteniendo la partícula y asumiendo que la pérdida de energía se debe a la densidad de electrones en el medio (calorímetros)





PRINCIPALES PROCESOS DE INTERACCIÓN

Interacciones de partículas cargadas:

- **Ionización:** colisión inelástica con los electrones de los átomos
- **Bremsstrahlung:** emisión de radiación de fotones por una interacción de carga acelerada
- **Dispersión múltiple:** colisión elástica con el núcleo
- **Efectos Cerenkov y de radiación de transición:** emisión de fotones
- **Interacciones nucleares (p, n, K):** procesos mediados por interacciones fuertes)

Interacciones de partículas neutras:

- Fotones: **efectos fotoeléctricos y Compton, producción de pares e+ e-**
- Hadrones neutros de alta energía con $\tau > \sim 10^{-10}$ s (n, K⁰, ..) : **interacciones nucleares**
- Neutrones de energía moderada/baja: **dispersión** (moderación), **absorción, fisión**
- Neutrinos: procesos mediados por **interacciones débiles**

Tras la interacción, las partículas pierden su energía y/o cambian de dirección o "desaparecen"



EJERCICIOS

- Cuando se expresa en unidades naturales, el tiempo de vida del bosón W es aproximadamente $\tau \approx 0.5 \text{ GeV}^{-1}$. Cuál es el valor correspondiente en unidades S.I.?
- La sección eficaz total de aniquilación e^+e^- puede ser escrita en unidades naturales como

$$\sigma = \frac{4 \pi \alpha^2}{3 s}$$

Donde $\alpha = 1/137$ es la llamada constante de estructura fina y \sqrt{s} es la energía de centro de masa. Estime σ a una energía de centro de masa igual a la masa del bosón Z ($m_Z = 91.2 \text{ GeV}/c^2$). Calcule su respuesta en unidades naturales y luego conviértala a barns.

- Considere el decaimiento de una partícula X en dos partículas a y b . Muestre que en el Sistema de referencia donde X está en reposo, la energía de la partícula a puede escribirse en unidades naturales como:

$$E_a = \frac{m_X^2 + m_a^2 - m_b^2}{2m_X}$$

- Calcule la fracción de decaimiento (branching ratio) para el decaimiento $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0$, dado el ancho de decaimiento parcial de $\Gamma(K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0) = 1.2 \times 10^{-8} \text{ eV}$ y la vida media del Kaón de $\tau(K^+) = 1.2 \times 10^{-8} \text{ s}$.



REFERENCIAS

- Dan Green, The physics of particle detectors. Cambridge University Press
- Claus Grupen and Boris Shwartz, Particle detectors. Cambridge University Press
- Introduction to Nuclear and Particle Physics, A. Das and T. Ferbel (2nd edition, 2003)
- Modern Particle Physics, M. A. Thomson (2013)
- Particle Data Group (PDG): <http://pdg.lbl.gov/>,
Reviews, Tables, Plots. Experimental Methods and Colliders



- Cuando se expresa en unidades naturales, el tiempo de vida del bosón W es aproximadamente $\tau \approx 0.5 \text{ GeV}^{-1}$. Cuál es el valor correspondiente en unidades S.I.?

To restore the correct dimensions a factor of \hbar needs to be inserted. Hence

$$\tau = \hbar \times 0.5 \text{ GeV}^{-1} = 0.5 \frac{1.06 \times 10^{-34}}{1.6 \times 10^{-10}} = 3.3 \times 10^{-25} \text{ s}.$$

In natural units, the decay rate

$$\Gamma = \frac{1}{\tau}.$$

Dimensional analysis gives

$$[E] = [T]^{-1},$$

and it is necessary to insert a factor of \hbar on the RHS:

$$\Gamma = \frac{\hbar}{\tau}.$$



- La sección eficaz total de aniquilación e^+e^- puede ser escrita en unidades naturales como

$$\sigma = \frac{4\pi\alpha^2}{3s}$$

Donde $\alpha = 1/137$ es la llamada constante de estructura fina y \sqrt{s} es la energía de centro de masa. Estime σ a una energía de centro de masa igual a la masa del bosón Z ($m_Z = 91.2 \text{ GeV}/c^2$). Calcule su respuesta en unidades naturales y luego conviértala a barns.

In natural units

$$\sigma = \frac{4\pi\alpha^2}{3s} = \frac{4\pi/137^2}{3 \cdot 50^2} = 8.9 \times 10^{-8} \text{ GeV}^{-2}.$$

To convert to natural units, either insert the missing factor of $(\hbar c)^2$ or use the conversion factor $\hbar c = 0.197 \text{ GeV fm}$ and $1 \text{ fm}^2 = 10^{-30} \text{ m}^2 = 10^{-2} \text{ b}$, therefore

$$\sigma = 8.9 \times 10^{-8} \text{ GeV}^{-2} \times 0.197^2 \times 0.01 \text{ b} = 34 \text{ pb}.$$

This is a factor of approximately 10^9 smaller than the *strong* interaction pp cross section.



- Considera el decaimiento de una partícula X en dos partículas a y b . Muestra que en el Sistema de referencia donde X está en reposo, la energía de la partícula a puede escribirse en unidades naturales como:

$$E_a = \frac{m_X^2 + m_a^2 - m_b^2}{2m_X}$$

$$1) \quad X \rightarrow a + b$$

$$P_X = P_a + P_b$$

$$E_X = E_a + E_b \quad ; \quad \text{but in C.M. of } X \quad E_X = M_X$$

$$M_X = E_a + E_b$$

$$\vec{P}_X = \vec{P}_a + \vec{P}_b = 0$$

$$\vec{P}_a = -\vec{P}_b$$

$$\sqrt{E_a^2 - m_a^2} = \sqrt{E_b^2 - m_b^2}$$

$$M_X^2 = E_a^2 + 2E_a E_b + E_b^2$$

$$\rightarrow M_X^2 - E_a^2 - 2E_a (M_X - E_a) = E_b^2$$

$$M_X^2 + E_a^2 - 2E_a M_X = E_b^2$$

and also

$$E_a^2 - m_a^2 + M_b^2 = E_b^2$$

$$M_X^2 + \cancel{E_a^2} - 2E_a M_X = \cancel{E_a^2} - m_a^2 + M_b^2$$

$$E_a = \frac{M_X^2 + m_a^2 - M_b^2}{2M_X}$$



- Calcule la fracción de decaimiento (branching ratio) para el decaimiento $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0$, dado el ancho de decaimiento parcial de $\Gamma(K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0) = 1.2 \times 10^{-8}$ eV y la vida media del Kaón de $\tau(K^+) = 1.2 \times 10^{-8}$ s.

The branching ratio is related to the total decay width Γ by

$$BR(K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0) = \frac{\Gamma(K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0)}{\Gamma},$$

where (in natural units) $\Gamma = 1/\tau$ or in S.I units (as given here) $\Gamma = \hbar/\tau$. Hence

$$\begin{aligned} BR(K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0) &= \frac{\tau}{\hbar} \times \Gamma(K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0) \\ &= \frac{1.2 \times 10^{-8}}{1.06 \times 10^{-34}} \cdot 1.2 \times 10^{-8} \cdot 1.6 \times 10^{-19} = 21 \% . \end{aligned}$$