

# 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



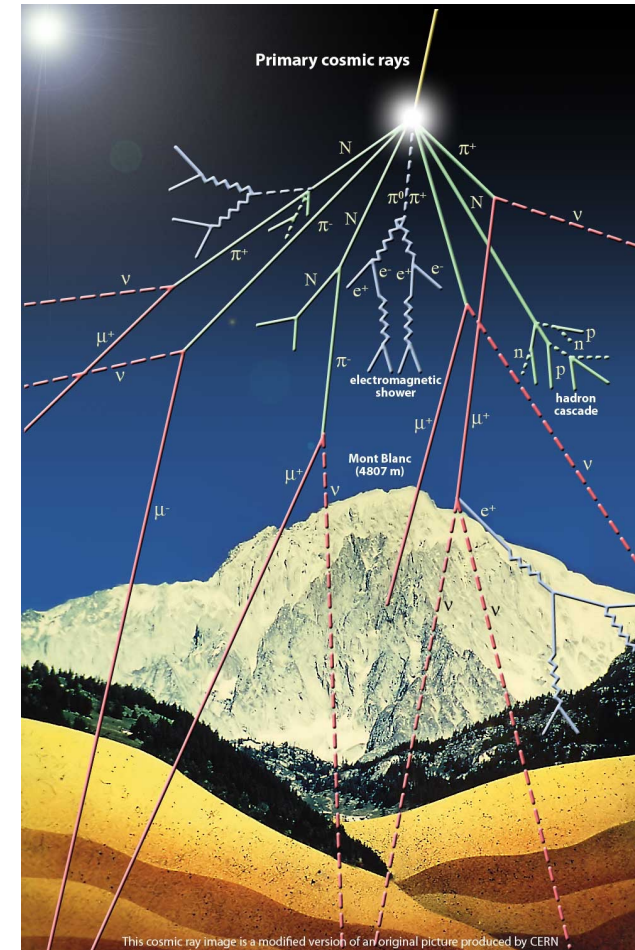
Cofinanciado por el  
programa Erasmus+  
de la Unión Europea





## Origen Natural

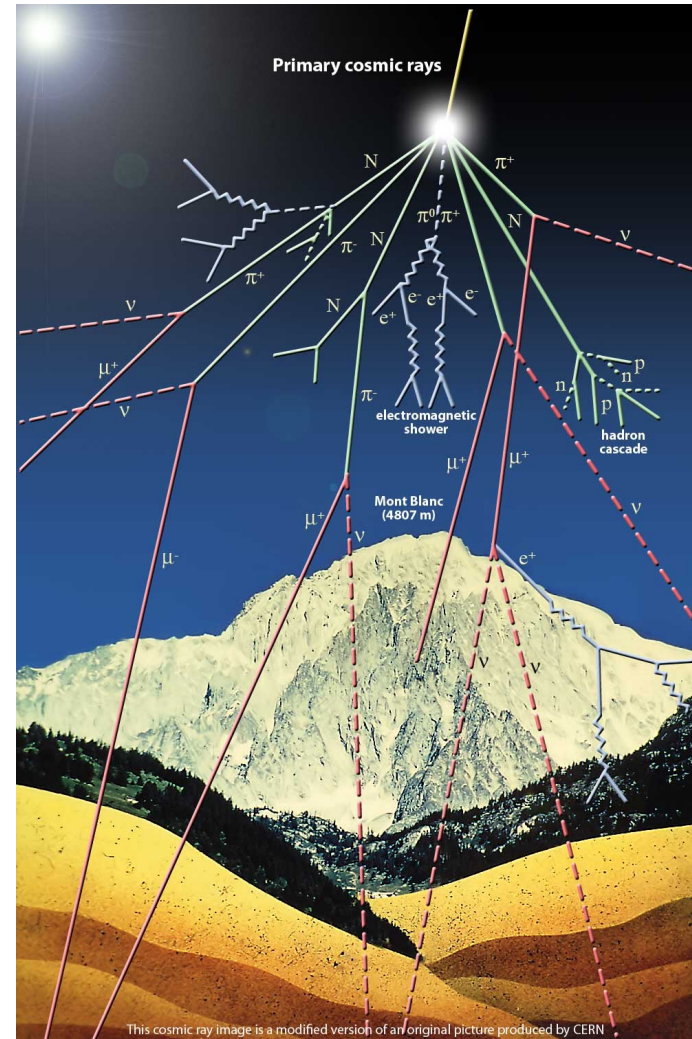
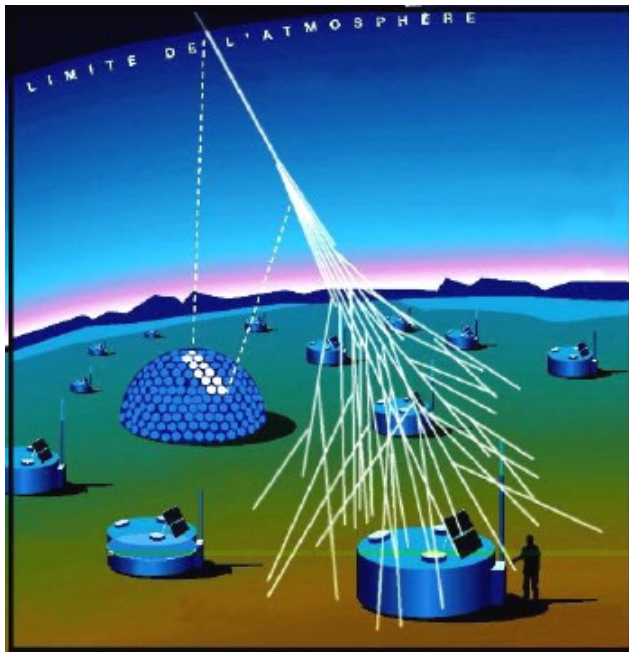
- Rayos C3smicos (altas energías):
  - Radiaci3n c3smica y solar proveniente del espacio que atraviesa la atm3sfera de la tierra
  - Principalmente fotones, n3cleos ligeros y electrones
  - La interacci3n con la atm3sfera produce part3culas secundarias: piones y muones
- Decaimientos nucleares (baja energía):
  - Radiaci3n  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$





# FUENTES DE RADIACIÓN

## ■ Rayos cósmicos

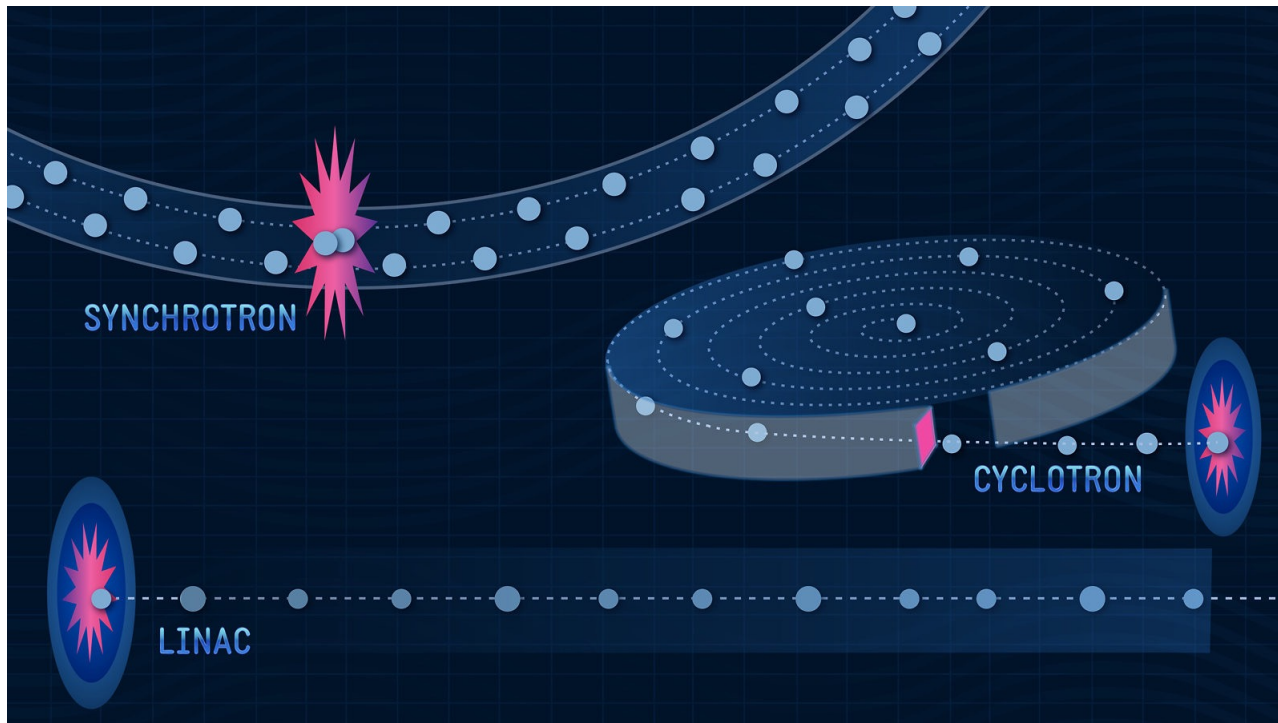




# FUENTES DE RADIACIÓN

## Origen no-natural

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





# RANGOS DE ENERGÍA

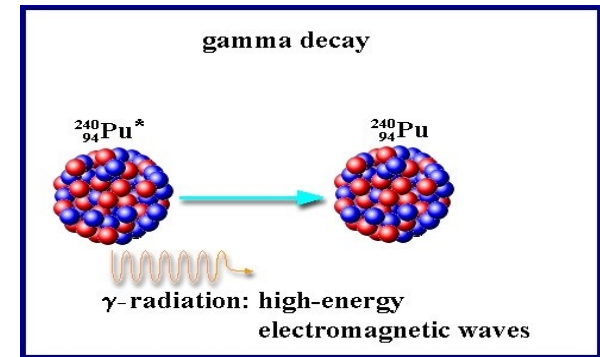
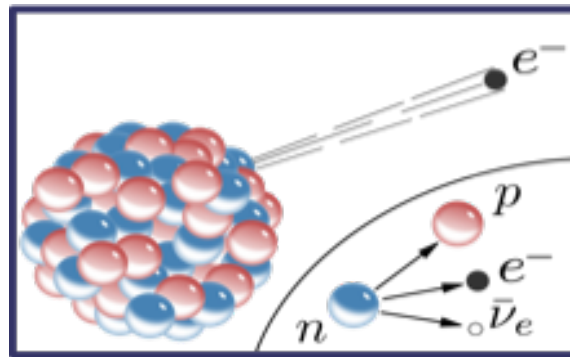
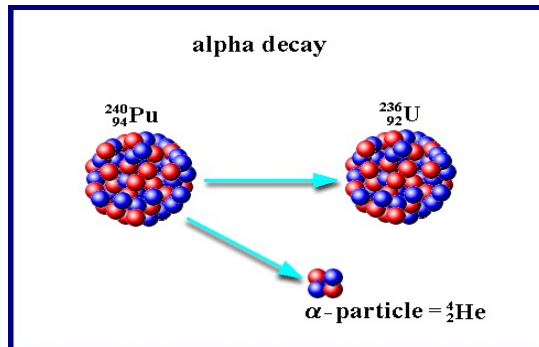
- Medimos la energía en eV:

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

- 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

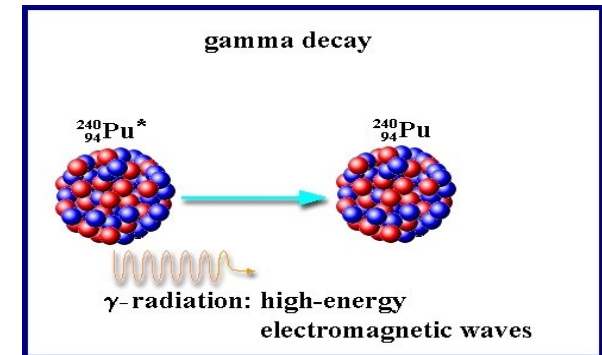
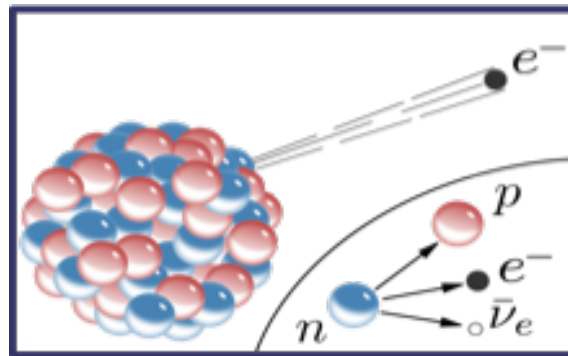
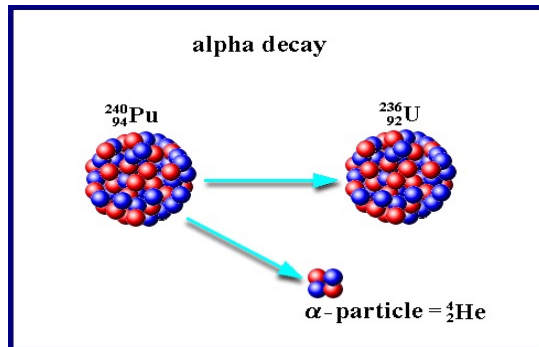
- Medimos la energía en eV:

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

- 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

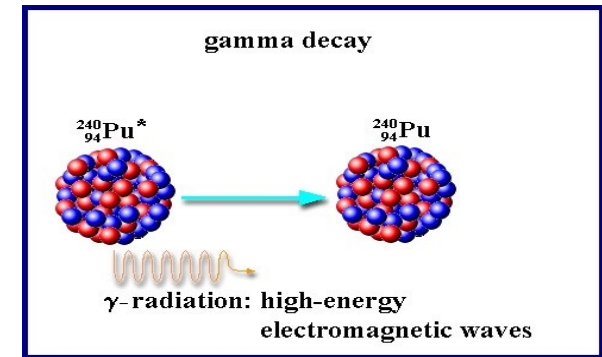
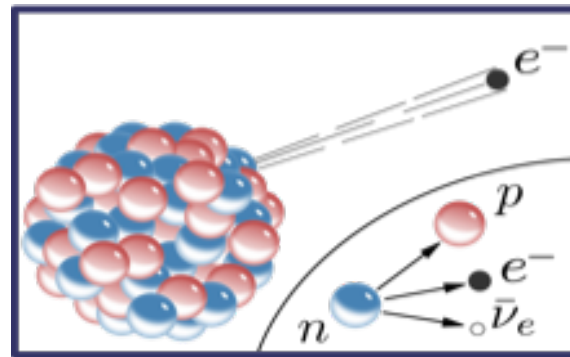
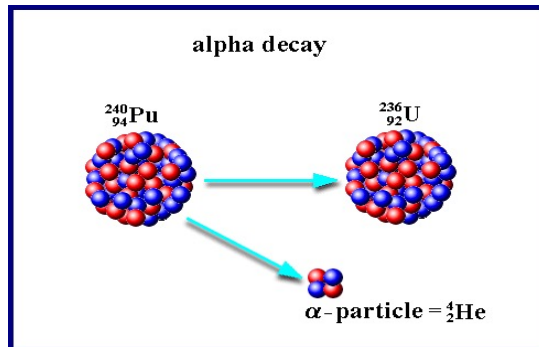
- Medimos la energía en eV:

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

- 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:  $10^{20}\text{eV}$



# RANGOS DE ENERGÍA

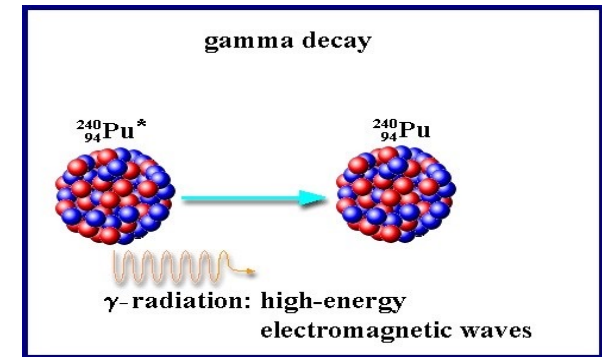
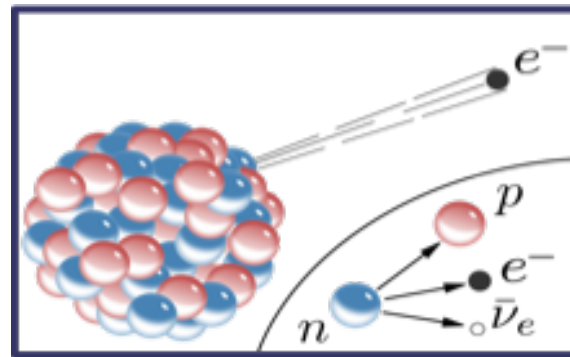
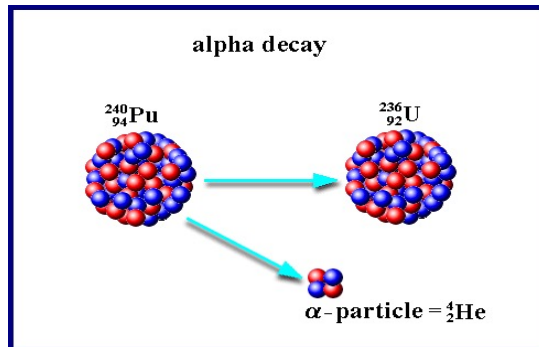
- Medimos la energía en eV:

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

- 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:  $10^{20}\text{eV}$

“Altas energías”





- 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:

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

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

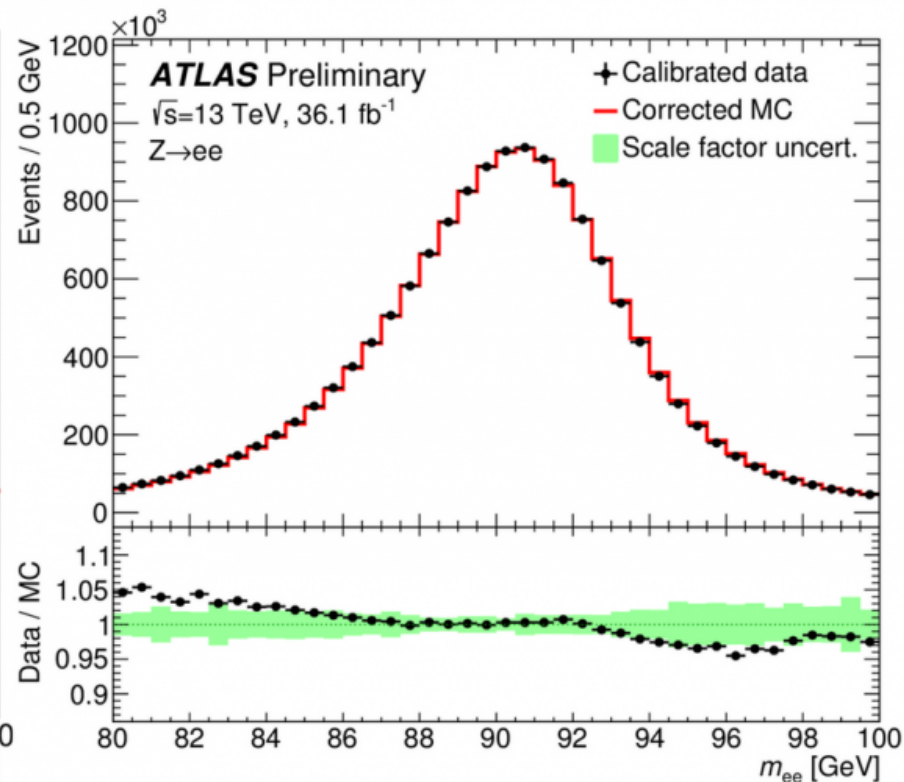
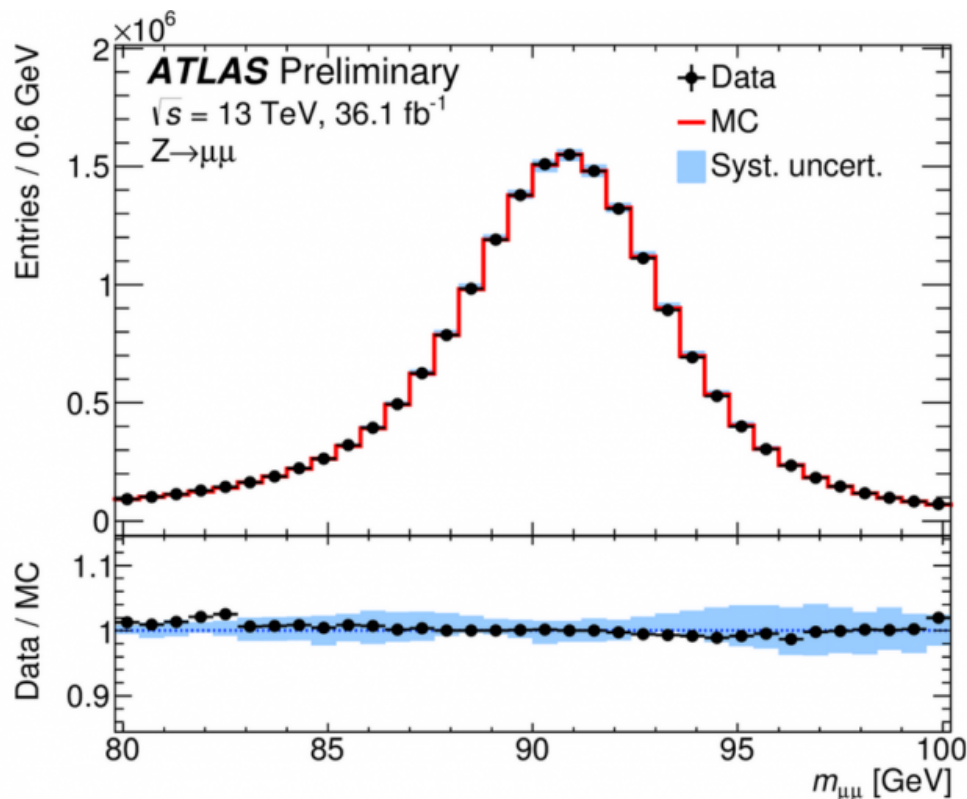
es invariante de Lorentz

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

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



- 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

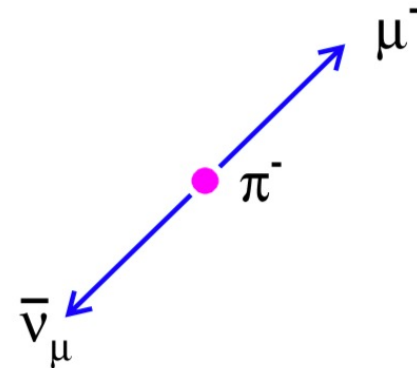
$$\vec{V}_\pi \leftarrow \pi^- \rightarrow \mu^-$$

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

$$\begin{aligned} E_\pi &= E_{0\pi} = M_\pi \\ E_\nu^2 &= p_\nu^2 \end{aligned}$$

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

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



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

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

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

$$\textcircled{M_X} = M_1^2 + M_2^2 + 2\underline{E_1 E_2} - 2\underline{|\vec{p}_1| |\vec{p}_2| \cos\theta}$$



- 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	$\text{kg m s}^{-1}$	GeV/c	GeV
Mass	kg	$\text{GeV}/c^2$	GeV
Time	s	$(\text{GeV}/\hbar)^{-1}$	$\text{GeV}^{-1}$
Length	m	$(\text{GeV}/\hbar c)^{-1}$	$\text{GeV}^{-1}$
Area	$\text{m}^2$	$(\text{GeV}/\hbar c)^{-2}$	$\text{GeV}^{-2}$



# DECAIMIENTOS DE PARTÍCULAS

- Tiempo de vida de una partícula (promedio o media)
- Tasa de decaimiento ( $\Gamma$ ): 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:

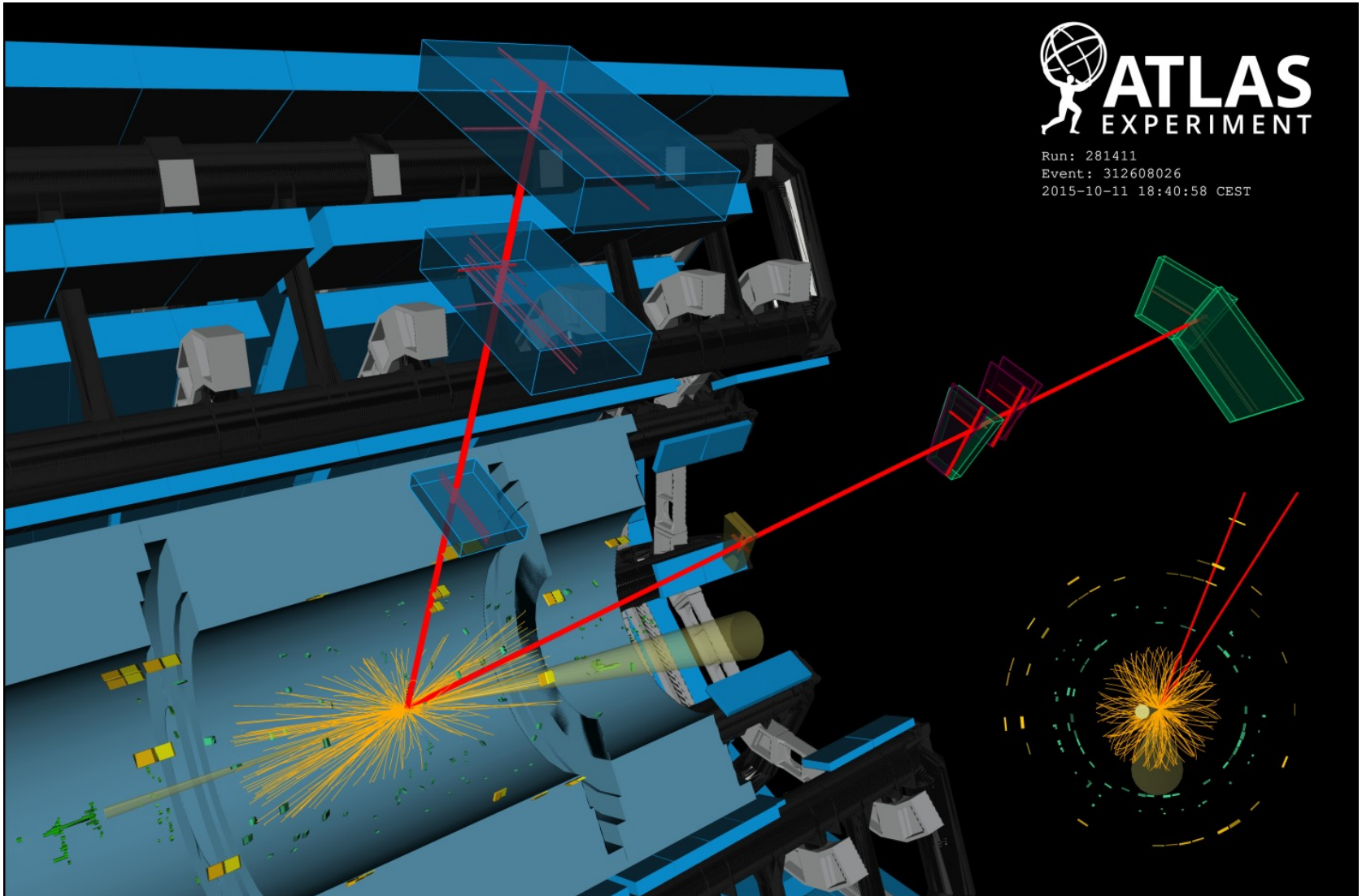
$$BR(j) = \frac{\Gamma_j}{\Gamma}$$

- 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  $\sigma$**
- Sección eficaz ( $\sigma$ ): area de sección de interacción con la partícula blanco – probabilidad de interacción

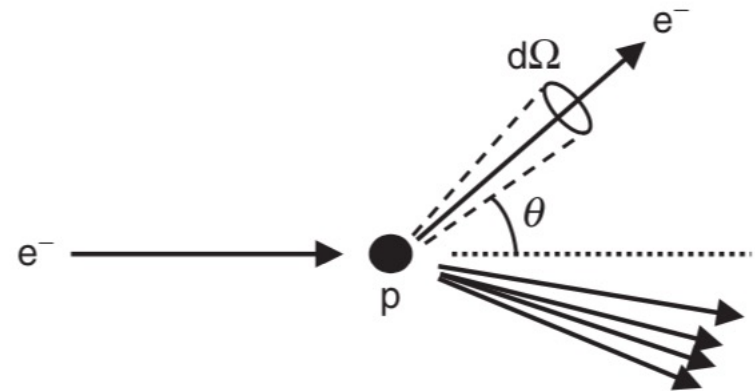
$$\sigma = \frac{\text{number of interactions per unit time per target particle}}{\text{incident flux}}$$

- Parámetro de impacto ( $b$ ): distancia a la cual la partícula incidente habría pasado sin interactuar con el centro de dispersión
- Unidades: 1 barn ( $b$ ) =  $10^{-28}$  m<sup>2</sup>



# 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:  $\sigma = \int \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega.$

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

	Light unflavoured (S=C=B=0)		Strange (S=±1, C=B=0)		Charmed, strange (C=S=±1)		$c\bar{c}$		
	$I^G(J^{PC})$	$I^G(J^{PC})$	$I^G(J^{PC})$	$I^G(J^{PC})$	$I^G(J^{PC})$	$I^G(J^{PC})$	$I^G(J^{PC})$	$I^G(J^{PC})$	
$\pi^\pm$	$1^-(0^-)$	$\Phi(1680)$	$0^-(1^-)$	$K^\pm$	$1/2(0^-)$	$D_S^\pm$	$0(0^-)$	$\eta_c(1S)$	$0^+(0^-)$
$\pi^0$	$1^-(0^+)$	$\rho_3(1690)$	$1^+(3^-)$	$K^0$	$1/2(0^-)$	$D_S^\pm$	$0(?)$	$J/\psi(1S)$	$0^-(1^-)$
$\eta$	$0^+(0^+)$	$\rho(1700)$	$1^+(1^-)$	$K_S^0$	$1/2(0^-)$	$D_{S0}^*(2317)^\pm$	$0(0^+)$	$X_{c0}(1P)$	$0^+(0^{++})$
$f_0(500)$	$0^+(0^{++})$	$a_2(1700)$	$1^-(2^{++})$	$K_L^0$	$1/2(0^-)$	$D_{S1}(2460)^\pm$	$0(1^+)$	$X_{c1}(1P)$	$0^+(1^{++})$
$\rho(770)$	$1^+(1^-)$	$f_0(1710)$	$0^+(0^{++})$	$K_0^*(800)$	$1/2(0^+)$	$D_{S1}(2536)^\pm$	$0(1^+)$	$h_c(1P)$	$?^?(1^{++})$
$\omega(782)$	$0^-(1^-)$	$\eta(1760)$	$0^+(0^-)$	$K^*(892)$	$1/2(1^-)$	$D_{S2}(2573)$	$0(?)$	$X_{c2}(1P)$	$0^+(2^{++})$
$\eta'(958)$	$0^+(0^-)$	$\pi(1800)$	$1^-(0^-)$	$K_1(1270)$	$1/2(1^+)$	$D_{S1}(2700)^\pm$	$0(1^-)$	$\eta_c(2S)$	$0^+(0^-)$
$f_0(980)$	$0^+(0^{++})$	$f_2(1810)$	$0^+(2^{++})$	$K_1(1400)$	$1/2(1^+)$	$D_{S1}^*(2860)^\pm$	$0(?)$	$\psi(2S)$	$0^-(1^-)$
$a_0(980)$	$1^-(0^{++})$	$X(1835)$	$?^?(?^+)$	$K^*(1410)$	$1/2(1^-)$	$D_{S1}(3040)^\pm$	$0(?)$	$\psi(3770)$	$0^-(1^-)$
$\Phi(1020)$	$0^-(1^-)$	$X(1840)$	$?^?(?^?)$	$K_0^*(1430)$	$1/2(0^+)$	<b>Bottom (B=±1)</b>		$X(3823)$	$?^?(?^-)$
$h_1(1170)$	$0^-(1^+)$	$\Phi_3(1850)$	$0^-(3^-)$	$K_2^*(1430)$	$1/2(2^+)$				$X(3872)$
$b_1(1235)$	$1^+(1^+)$	$\eta_2(1870)$	$0^+(2^-)$	$K(1460)$	$1/2(0^-)$	$B^\pm$	$1/2(0^-)$	$X(3900)^\pm$	$?(1^+)$
$a_1(1260)$	$1^-(1^+)$	$\pi_2(1880)$	$1^-(2^-)$	$K_2(1580)$	$1/2(2^-)$	$B^0$	$1/2(0^-)$	$X(3900)^0$	$?(?)$
$f_2(1270)$	$0^+(2^{++})$	$\rho(1900)$	$1^+(1^-)$	$K(1630)$	$1/2(?)$	$B^\pm/B^0$ Admixture		$X_{c0}(2P)$	$0^+(0^{++})$
$f_1(1285)$	$0^+(1^+)$	$f_2(1910)$	$0^+(2^{++})$	$K_1(1650)$	$1/2(1^+)$	$B^\pm/B^0/B_S^0/b$ -baryon		$X_{c2}(2P)$	$0^+(2^{++})$
$\eta(1295)$	$0^+(0^+)$	$f_2(1950)$	$0^+(2^{++})$	$K^*(1680)$	$1/2(1^-)$	Admixture		$X(3940)$	$?^?(?^?)$
$\pi(1300)$	$1^-(0^+)$	$\rho_3(1990)$	$1^+(3^-)$	$K_2(1770)$	$1/2(2^-)$	$V_{cb}$ and $V_{ub}$ CKM Matrix		$X(4020)^\pm$	$?(?)$
$a_2(1320)$	$1^-(2^{++})$	$f_2(2010)$	$0^+(2^{++})$	$K_3^*(1780)$	$1/2(3^-)$	Admixture		$\psi(4040)$	$0^-(1^-)$
$f_0(1370)$	$0^+(0^{++})$	$f_0(2020)$	$0^+(0^{++})$	$K_2(1820)$	$1/2(2^-)$	$B^*$	$1/2(1^-)$	$X(4050)^\pm$	$?(?)$
$h_1(1380)$	$?^?(1^+)$	$a_4(2040)$	$1^-(4^{++})$	$K(1830)$	$1/2(0^-)$	$B_J^*(5732)$	$?(?)$	$X(4140)$	$0^+(?^+)$
$\pi_1(1400)$	$1^-(1^+)$	$f_4(2050)$	$0^+(4^{++})$	$K_0^*(1950)$	$1/2(0^+)$	$B_1(5721)^0$	$1/2(1^+)$	$\psi(4160)$	$0^-(1^-)$
$\eta(1405)$	$0^+(0^+)$	$\pi_2(2100)$	$1^-(2^-)$	$K_2^*(1980)$	$1/2(2^+)$	$B_1^*(5721)^0$	$1/2(2^+)$	$X(4160)$	$?^?(?^?)$
$f_1(1420)$	$0^+(1^+)$	$f_0(2100)$	$0^+(0^{++})$	$K_0^*(2045)$	$1/2(4^+)$	<b>Bottom, strange (B=±1, S=±1)</b>		$X(4250)^\pm$	$?(?)$
$\omega(1420)$	$0^-(1^-)$	$f_2(2150)$	$0^+(2^{++})$	$K_2(2250)$	$1/2(2^-)$			$X(4260)$	$?^?(1^-)$
$f_2(1430)$	$0^+(2^{++})$	$\rho(2150)$	$1^+(1^-)$	$K_3(2320)$	$1/2(3^+)$	$B_S^0$	$0(0^-)$	$X(4350)$	$0^+(?^+)$
$a_0(1450)$	$1^-(0^{++})$	$\Phi(2170)$	$0^-(1^-)$	$K_S^*(2380)$	$1/2(5^-)$	$B_S^*$	$0(1^-)$	$X(4360)$	$?^?(1^-)$
$\rho(1450)$	$1^+(1^-)$	$f_0(2200)$	$0^+(0^{++})$	$k_4(2500)$	$1/2(4^-)$	$B_{S1}(5830)^0$	$0(1^+)$	$\psi(4415)$	$0^-(1^-)$



# MIDIENDO PARTÍCULAS

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

Nucleons				$\Delta$ particles				$\Lambda$ particles				$\Sigma$ particles				$\Xi$ and $\Omega$ particles				Charmed particles				Bottom particles			
p	$1/2^+$	****		$\Delta(1232)$	$3/2^+$	****		$\Lambda$	$1/2^+$	****		$\Sigma^+$	$1/2^+$	****		$\Xi^0$	$1/2^+$	****		$\Lambda_c^+$	$1/2^+$	****		$\Lambda_b^0$	$1/2^+$	***	
n	$1/2^+$	****		$\Delta(1600)$	$3/2^+$	****		$\Lambda(1405)$	$1/2^-$	****		$\Sigma^0$	$1/2^+$	****		$\Xi^-$	$1/2^+$	****		$\Lambda_c(2595)^+$	$1/2^-$	***		$\Lambda_b(5912)^0$	$1/2^-$	***	
N(1440)	$1/2^+$	****		$\Delta(1620)$	$1/2^-$	****		$\Lambda(1520)$	$3/2^-$	****		$\Sigma^-$	$1/2^+$	****		$\Xi(1530)$	$3/2^+$	****		$\Lambda_c(2625)^+$	$3/2^-$	***		$\Lambda_b(5920)^0$	$3/2^-$	***	
N(1520)	$3/2^-$	****		$\Delta(1700)$	$3/2^-$	****		$\Lambda(1600)$	$1/2^+$	***		$\Sigma(1385)$	$3/2^+$	****		$\Xi(1620)$		*		$\Lambda_c(2765)^+$		*		$\Sigma_b$	$1/2^+$	***	
N(1535)	$1/2^-$	****		$\Delta(1750)$	$1/2^+$	*		$\Lambda(1670)$	$1/2^-$	****		$\Sigma(1480)$		*		$\Xi(1690)$		***		$\Lambda_c(2880)^+$	$5/2^+$	***		$\Sigma_b^*$	$3/2^+$	***	
N(1650)	$1/2^-$	****		$\Delta(1900)$	$1/2^-$	***		$\Lambda(1690)$	$3/2^-$	****		$\Sigma(1560)$		**		$\Xi(1820)$	$3/2^-$	***		$\Lambda_c(2940)^+$	$3/2^-$	***		$\Xi_b^0, \Xi_b^-$	$1/2^+$	***	
N(1675)	$5/2^-$	****		$\Delta(1905)$	$5/2^+$	****		$\Lambda(1710)$	$1/2^+$	*		$\Sigma(1580)$	$3/2^-$	*		$\Xi(1950)$		***						$\Xi_b(5935)^-$	$1/2^+$	***	
N(1680)	$5/2^+$	****		$\Delta(1910)$	$1/2^+$	****		$\Lambda(1800)$	$1/2^-$	***		$\Sigma(1620)$	$1/2^-$	*		$\Xi(2030)$	$\approx 5/2^?$	***		$\Sigma_c(2455)$	$1/2^+$	****		$\Xi_b(5945)^0$	$3/2^+$	***	
N(1700)	$3/2^-$	***		$\Delta(1920)$	$3/2^+$	***		$\Lambda(1810)$	$1/2^+$	***		$\Sigma(1660)$	$1/2^+$	***		$\Xi(2120)$		*		$\Sigma_c(2520)$	$3/2^+$	***		$\Xi_b(5955)^-$	$3/2^+$	***	
N(1710)	$1/2^+$	****		$\Delta(1930)$	$5/2^-$	***		$\Lambda(1820)$	$5/2^+$	****		$\Sigma(1670)$	$3/2^-$	****		$\Xi(2250)$		**		$\Sigma_c(2800)$		***		$\Omega_b^-$	$1/2^+$	***	
N(1720)	$3/2^+$	****		$\Delta(1940)$	$3/2^-$	**		$\Lambda(1830)$	$5/2^-$	****		$\Sigma(1690)$		**		$\Xi(2370)$		**						$P_c(4380)^+$		*	
N(1860)	$5/2^+$	**		$\Delta(1950)$	$7/2^+$	****		$\Lambda(1890)$	$3/2^+$	****		$\Sigma(1730)$	$3/2^-$	*		$\Xi(2500)$		*		$\Xi_c^+$	$1/2^+$	***		$P_c(4450)^+$		*	
N(1875)	$3/2^-$	***		$\Delta(2000)$	$5/2^+$	**		$\Lambda(2000)$		*		$\Sigma(1750)$	$1/2^-$	***						$\Xi_c^0$	$1/2^+$	***					
N(1880)	$1/2^+$	***		$\Delta(2150)$	$1/2^-$	*		$\Lambda(2020)$	$7/2^+$	*		$\Sigma(1770)$	$1/2^+$	*		$\Omega^-$	$3/2^+$	****		$\Xi_c^+$	$1/2^+$	***					
N(1895)	$1/2^-$	****		$\Delta(2200)$	$7/2^-$	***		$\Lambda(2050)$	$3/2^-$	*		$\Sigma(1775)$	$5/2^-$	****		$\Omega(2250)^-$		***		$\Xi_c^0$	$1/2^+$	***					
N(1900)	$3/2^+$	****		$\Delta(2300)$	$9/2^+$	**		$\Lambda(2100)$	$7/2^-$	****		$\Sigma(1840)$	$3/2^+$	*		$\Omega(2380)^-$		**		$\Xi_c(2645)$	$3/2^+$	***					
N(1990)	$7/2^+$	**		$\Delta(2350)$	$5/2^-$	*		$\Lambda(2110)$	$5/2^+$	***		$\Sigma(1880)$	$1/2^+$	**		$\Omega(2470)^-$		**		$\Xi_c(2790)$	$1/2^-$	***					
N(2000)	$5/2^+$	**		$\Delta(2390)$	$7/2^+$	*		$\Lambda(2325)$	$3/2^-$	*		$\Sigma(1900)$	$1/2^-$	*						$\Xi_c(2815)$	$3/2^-$	***					
N(2040)	$3/2^+$	*		$\Delta(2400)$	$9/2^-$	**		$\Lambda(2350)$	$9/2^+$	***		$\Sigma(1915)$	$5/2^+$	****						$\Xi_c(2930)$		*					
N(2060)	$5/2^-$	***		$\Delta(2420)$	$11/2^+$	****		$\Lambda(2585)$		**		$\Sigma(1940)$	$3/2^+$	*						$\Xi_c(2980)$		***					
N(2100)	$1/2^+$	***		$\Delta(2750)$	$13/2^-$	**						$\Sigma(1940)$	$3/2^-$	***						$\Xi_c(3055)$		***					
N(2120)	$3/2^-$	***		$\Delta(2950)$	$15/2^+$	**						$\Sigma(2000)$	$1/2^-$	*						$\Xi_c(3080)$		***					
N(2190)	$7/2^-$	****										$\Sigma(2030)$	$7/2^+$	****						$\Xi_c(3123)$		*					
N(2220)	$9/2^+$	****										$\Sigma(2070)$	$5/2^+$	*													
N(2250)	$9/2^-$	****										$\Sigma(2080)$	$3/2^+$	**						$\Omega_c^0$	$1/2^+$	***					
N(2300)	$1/2^+$	**										$\Sigma(2100)$	$7/2^-$	*						$\Omega_c(2770)^0$	$3/2^+$	***					
N(2570)	$5/2^-$	**										$\Sigma(2250)$		***						$\Omega_c(3000)^0$		***					
N(2600)	$11/2^-$	***										$\Sigma(2455)$		**						$\Omega_c(3050)^0$		***					
N(2700)	$13/2^+$	**										$\Sigma(2620)$		**						$\Omega_c(3065)^0$		***					
												$\Sigma(3000)$		*						$\Omega_c(3090)^0$		***					

# MIDIENDO PARTÍCULAS

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

	<p>mass → <math>\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>2/3</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b>u</b></p> <p>up</p>	<p>mass → <math>\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>2/3</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b>c</b></p> <p>charm</p>	<p>mass → <math>\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>2/3</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b>t</b></p> <p>top</p>	<p>mass → 0</p> <p>charge → 0</p> <p>spin → 1</p> <p><b>g</b></p> <p>gluon</p>	<p>mass → <math>\approx 126 \text{ GeV}/c^2</math></p> <p>charge → 0</p> <p>spin → 0</p> <p><b>H</b></p> <p>Higgs boson</p>
<b>QUARKS</b>	<p>mass → <math>\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>-1/3</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b>d</b></p> <p>down</p>	<p>mass → <math>\approx 95 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>-1/3</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b>s</b></p> <p>strange</p>	<p>mass → <math>\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>-1/3</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b>b</b></p> <p>bottom</p>	<p>mass → 0</p> <p>charge → 0</p> <p>spin → 1</p> <p><b><math>\gamma</math></b></p> <p>photon</p>	
<b>LEPTONS</b>	<p>mass → <math>0.511 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>-1</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b>e</b></p> <p>electron</p>	<p>mass → <math>105.7 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>-1</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b><math>\mu</math></b></p> <p>muon</p>	<p>mass → <math>1.777 \text{ GeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>-1</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b><math>\tau</math></b></p> <p>tau</p>	<p>mass → <math>91.2 \text{ GeV}/c^2</math></p> <p>charge → 0</p> <p>spin → 1</p> <p><b>Z</b></p> <p>Z boson</p>	<b>GAUGE BOSONS</b>
	<p>mass → <math>&lt; 2.2 \text{ eV}/c^2</math></p> <p>charge → 0</p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b><math>\nu_e</math></b></p> <p>electron neutrino</p>	<p>mass → <math>&lt; 0.17 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>charge → 0</p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b><math>\nu_\mu</math></b></p> <p>muon neutrino</p>	<p>mass → <math>&lt; 15.5 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>charge → 0</p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b><math>\nu_\tau</math></b></p> <p>tau neutrino</p>	<p>mass → <math>80.4 \text{ GeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>\pm 1</math></p> <p>spin → 1</p> <p><b>W</b></p> <p>W boson</p>	

- 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

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

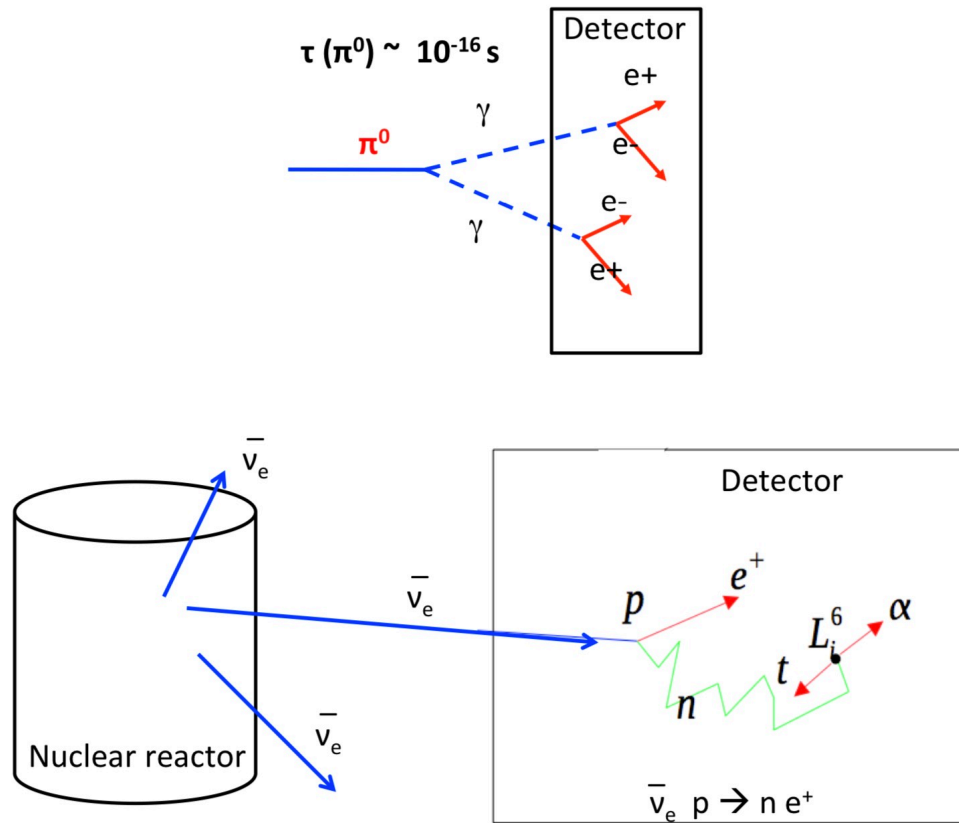
- Todas las demás partículas se reconstruyen a través de sus decaimientos
  - Masa invariante del sistema de partículas
  - Separación del vértice de decaimiento del punto de interacción (para algunas partículas que interactúan débilmente)





# EJEMPLOS

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

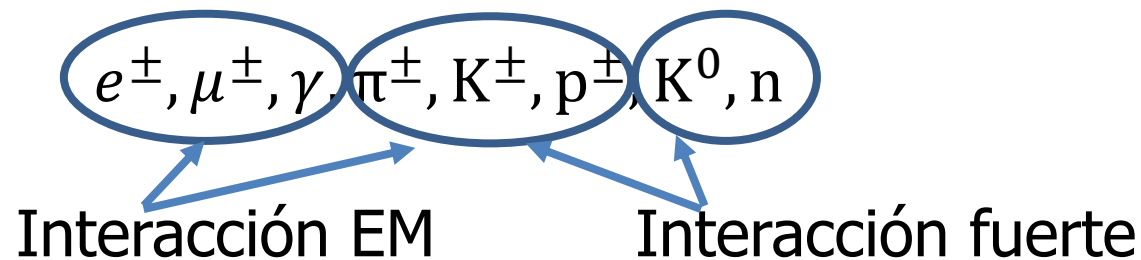


Las señales son inducidas por las interacciones electromagnéticas de las partículas cargadas en los detectores



# DETECCIÓN DE PARTÍCULAS

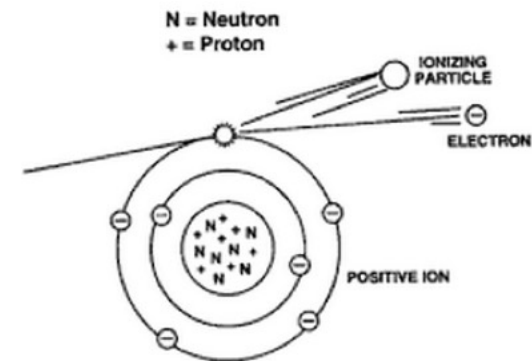
- Los electrones ionizan el medio y pierden energía por Bremsstrahlung
- Los fotones no ionizan pero producen pares que generan cascadas electromagnéticas
- Hadrones cargados ionizan y producen una cascada hadrónica
- Hadrones neutros no ionizan pero también producen una cascada hadrónica
- Los muones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

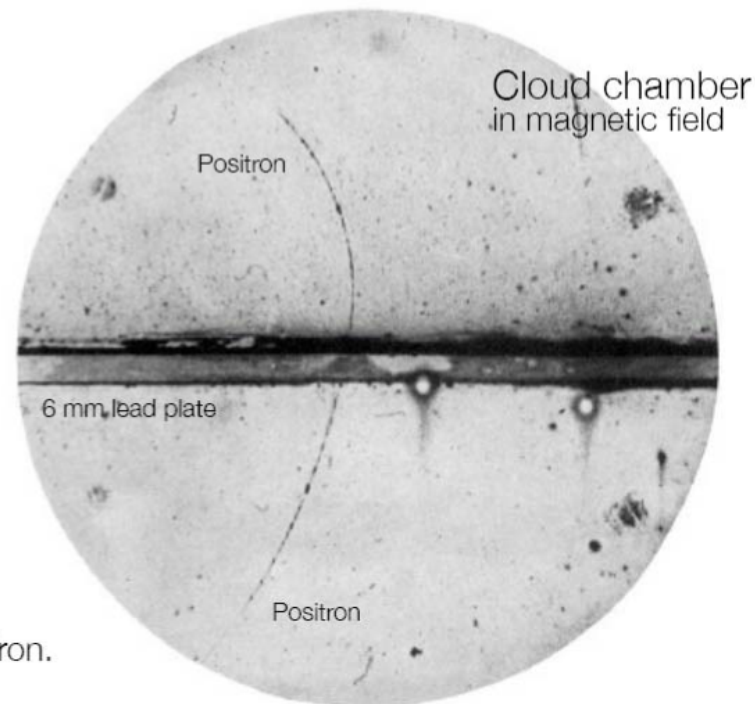




# DETECCIÓN DE PARTÍCULAS

- 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]



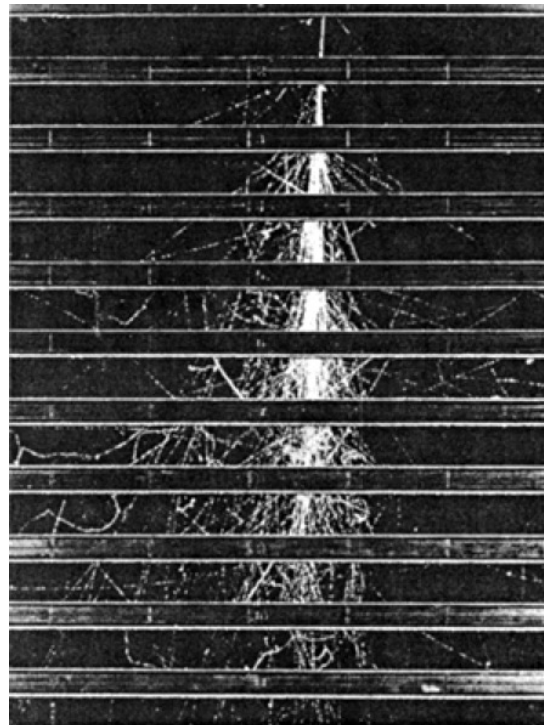
63 MeV positron passing through  
lead plate emerging as 23 MeV positron.

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)





## 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,  $K^0$ , ..) : **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  $\sigma$  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  $\tau(K^+) = 1.2 \times 10^{-8} \text{ s}$ .



- 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 (2<sup>nd</sup> edition, 2003)
- Modern Particle Physics, M. A. Thomson (2013)
- Particle Data Group (PDG): <http://pdg.lbl.gov/>, Reviews, Tables, Plots. Experimental Methods and Colliders