

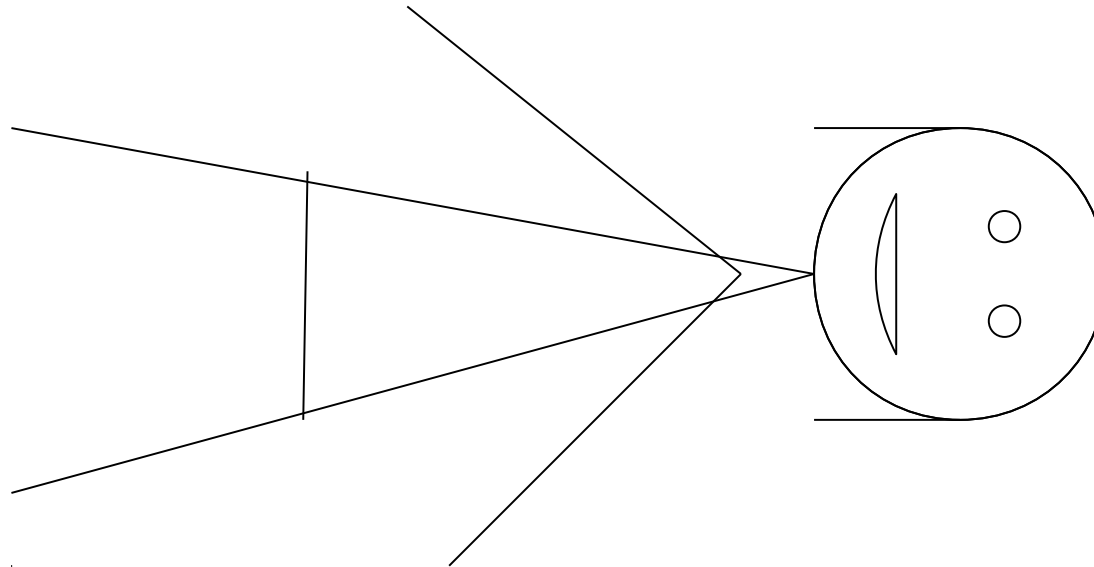
# Física de Partículas 2013

Universidad  
Industrial de  
Santander



- Unidad: 01
- Clase: 02
- Fecha: 20130906V
- Contenido: Interacciones
- Archivo: 01-02-20130906V-HA-interacciones.pdf

# En el episodio anterior



# Una digresión sobre cargas

## Fuerza eléctrica

$$F_E = \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right) \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

$$F_E = \left( k_e \frac{q_1}{r^2} \right) q_2$$

$$F_E = \left( k_e \frac{q_1}{r^2} \right) q_2 = m_2^i \frac{d^2 x}{dt^2}$$

$$F_E = \left( k_e \frac{q_1}{r^2} \right) \frac{q_2}{m_2^i} = \frac{d^2 x}{dt^2}$$

?

## Fuerza Gravedad

$$F_G = G \frac{m_1^g m_2^g}{r^2}$$

$$F_e = G \frac{m_1^g}{r^2} m_2^g$$

$$F_e = \left( G \frac{m_1^g}{r^2} \right) m_2^g = m_2^i \frac{d^2 x}{dt^2}$$

$$F_e = \left( G \frac{m_1^g}{r^2} \right) \frac{m_2^g}{m_2^i} = \frac{d^2 x}{dt^2}$$

$$F_e = \left( G \frac{m_1^g}{r^2} \right) = \frac{d^2 x}{dt^2} = g$$

# Richard Feynman dijo

- *“For those who want to learn just enough about it so they can solve problems, that is all there is to the [special] theory of relativity – it just changes Newton’s laws by introducing a correction factor to the mass”*
- Luego:

$$\vec{F} = \frac{d(m \vec{v})}{dt}$$

- donde

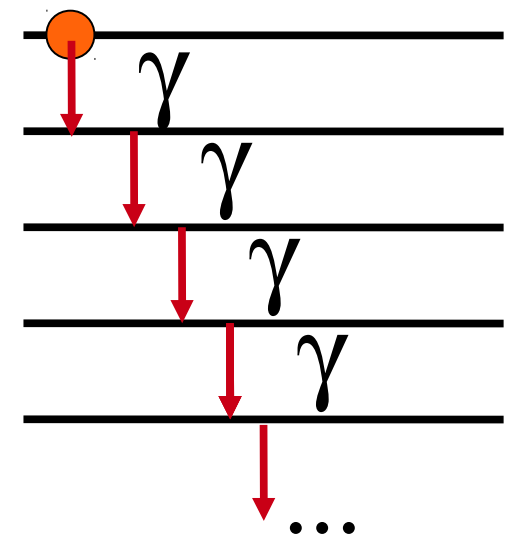
$$m \rightarrow m = \gamma m_0 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

# Peeero...

- También tenemos

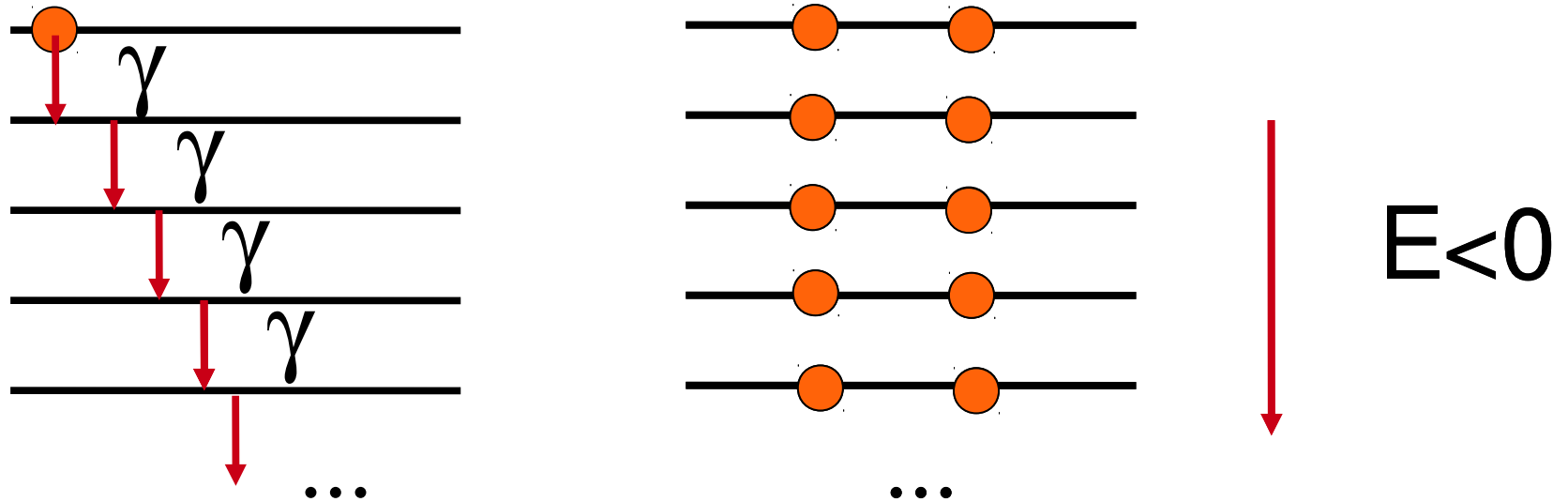
$$E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4 \rightarrow E = -\sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4}$$

- La relatividad anticipa estados con energía total negativa... → **PROBLEMAS**
- Y encima son infinitos → **MÁS PROBLEMAS**
- Aquí no tengo “estado fundamental”
- COLAPSO**

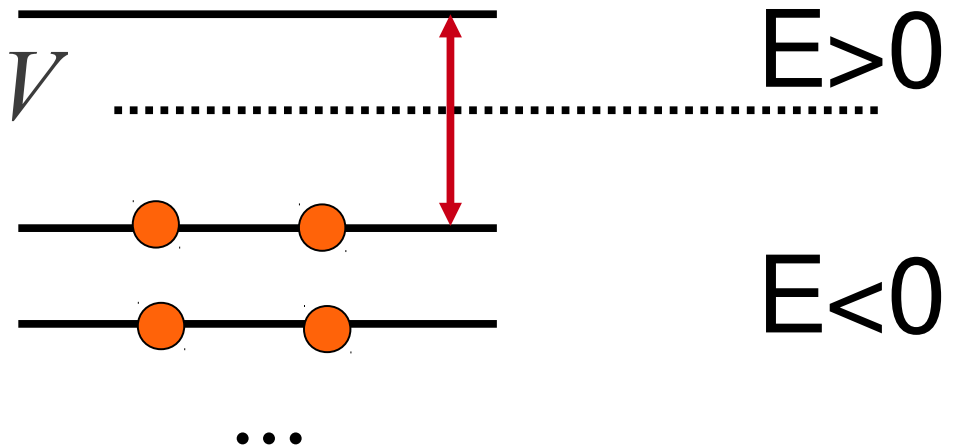


# Felicidad

- No hay colapso porque no hay estados vacíos

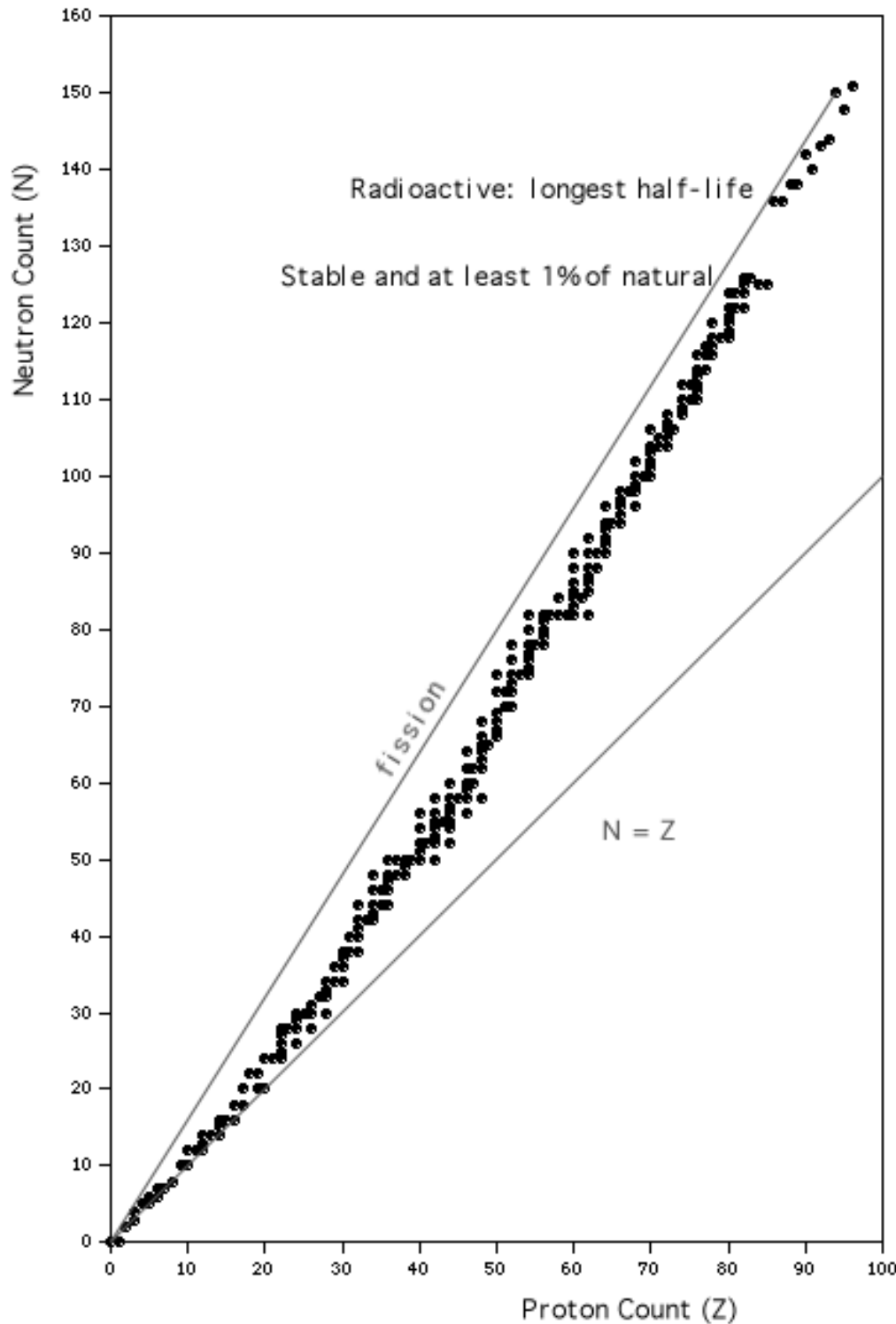


$$E = 2 m_0 c^2 = 1.022 \text{ MeV}$$



$$E = \pm m_0 c^2$$

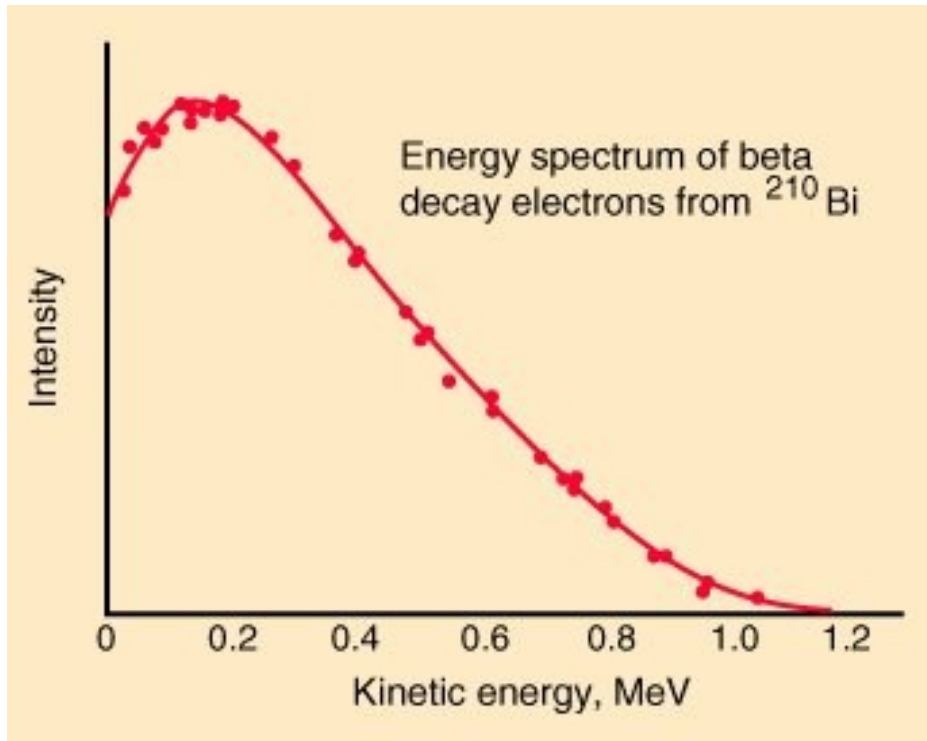
# Tabla de nucléidos



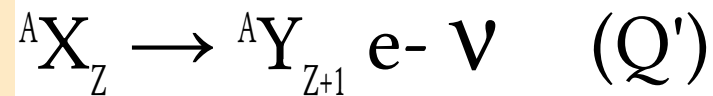
- $F_E \sim Z^2$
- Neutrones sin carga
- ${}^1\text{H}_1$      ${}^4\text{He}_2$      ${}^{238}\text{U}_{92}$
- Los neutrones ayudan a la cohesión
- Nueva fuerza para mantener unidas cosas que no quieren estarlo:

**Matrimonio**  
**Fuerza Fuerte**

# El decaimiento beta



- Oops...
- Bohr: La energía no se conserva
- Pauli: La energía se conserva si existe otra partícula:



$$Q' = (m_{\text{Bi}} - m_{\text{Po}} - m_e - m_\nu) c^2$$

$$Q' \simeq E_e + E_\nu$$



pero dado que  $Q' \sim Q$ ,  $m_\nu \sim 0$

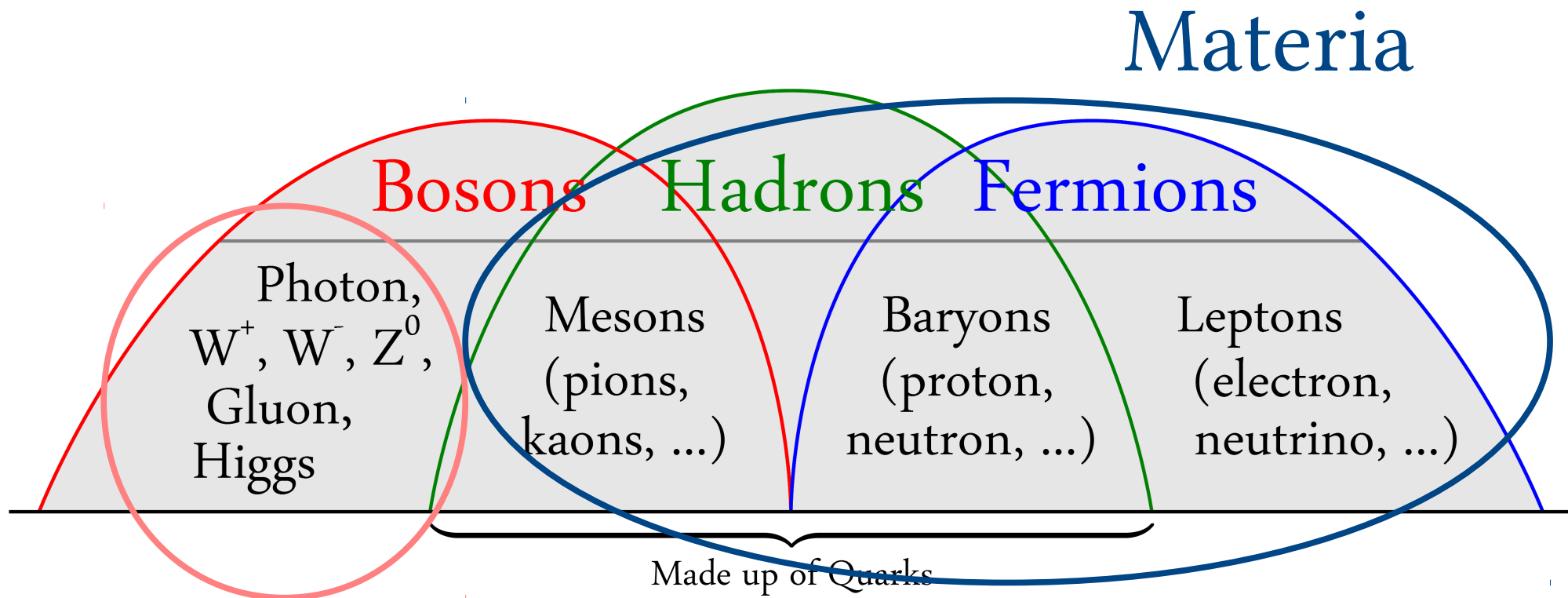


# Tarea Clase 01 (n) – Entrega para Clase 03 (n+2)

- Para dos protones en un núcleo atómico, calcule la relación entre la fuerza electrostática y la fuerza gravitatoria.
- En el sistema de unidades naturales ( $\hbar = c = k_B = 1$ ), determine las unidades para medir el tiempo, la distancia, la masa, y la temperatura.
- Considerando sólo factores energéticos, ¿cuál es la mínima energía del neutrino para que sea viable la reacción beta inversa?
- Resolver 1.1 y 1.8.b, entender problema 1.2

# Clasificación de partículas

- Teorema de Espín-Estadística (Bosones-Fermiones)
- Carga de Fuerza Fuerte (hadrones o



## Interacciones

# La “tabla periódica” de las partículas

## Leptones, quarks y mediadores

three generations of matter (fermions)				
	I	II	III	
mass→	2.4 MeV/c <sup>2</sup>	1.27 GeV/c <sup>2</sup>	171.2 GeV/c <sup>2</sup>	0
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name→	up	charm	top	photon
	4.8 MeV/c <sup>2</sup>	104 MeV/c <sup>2</sup>	4.2 GeV/c <sup>2</sup>	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	down	strange	bottom	gluon
	<2.2 eV/c <sup>2</sup>	<0.17 MeV/c <sup>2</sup>	<15.5 MeV/c <sup>2</sup>	91.2 GeV/c <sup>2</sup>
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	electron neutrino	muon neutrino	tau neutrino	Z boson
	0.511 MeV/c <sup>2</sup>	105.7 MeV/c <sup>2</sup>	1.777 GeV/c <sup>2</sup>	80.4 GeV/c <sup>2</sup>
	-1	-1	-1	$\pm 1$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	electron	muon	tau	W boson

- Materia
- Interacciones
- Masa
- Parece inocente:
  - (6·2) leptones = 12 l
  - ((6·3)·2) quarks = 36 q
  - (1+8+3+1)=13 bosones de calibre (gauge, interacciones)
- 61 partículas “fundamentales”

# Cuatro interacciones cuatro

Force	Strength	Theory	Mediator
Strong	10	Chromodynamics	Gluon
Electromagnetic	$10^{-2}$	Electrodynamics	Photon
Weak	$10^{-13}$	Flavordynamics	<i>W</i> and <i>Z</i>
Gravitational	$10^{-42}$	Geometrodynamics	Graviton

- Dos de largo alcance (infinito) → Gravedad y EM
- Dos de muy corto alcance ( $\sim$ fm) → Débil y fuerte

# Teorema de Noether

- **Simetrías de las ecuaciones  $\leftrightarrow$  Cargas conservadas**
  - Invariancia rotaciones  $\leftrightarrow$  Cons. momento angular
  - Invariancia traslaciones espaciales  $\leftrightarrow$  Cons. momento lineal
  - Invariancia traslaciones temporales  $\leftrightarrow$  Cons. Energía
    - Ver por ejemplo, Landau & Lifshitz, Vol 1 (Mechanics, Cap II)
    - Para simetrías, caldo Knorr, Landay & Lifshitz, Vol 3 (Quantum Mechanics, Non-Relativistic Theory, Cap XII)
- ¡Cuidado! Dice “simetría de las ecuaciones”, no del problema  $\rightarrow$  un cuerpo en rotación puede no tener un sólo eje de simetría pero conserva el impulso angular

**Las ecuaciones de movimiento son simétricas  $\leftrightarrow$   
 $\leftrightarrow$  Hay cargas conservadas**

# Acción, simetrías y cargas

- ¿Qué fue primero, el huevo o la gallina?
- ¿La conservación de la energía o la invariancia temporal?
- Aquí es simple: el huevo fue primero...
- Los principios de conservación se basan en observaciones de los sistemas naturales → “prejuicios”
- Las **ecuaciones movimiento**, y por ende la **acción**, debe tener las **simetrías necesarias para verificar las conservaciones observadas**
- “**La carga [eléctrica] es una magnitud conservada**”
- Significa que nunca en la historia (es decir, *nunca hasta hoy y esperamos que eso no cambie -prejuicio-*) se observó un proceso donde la cantidad de carga [eléctrica] inicial y final difieren
- **Moraleja 1: Nuestra acción deberá incluir alguna simetría que, Noether mediante, contemple la conservación de la carga eléctrica**
- **Moraleja 2: La física es una ciencia natural, de carácter observacional y/o experimental → no es una ciencia “exacta”**

# Nuevas cargas conservadas

- Conservación de la Energía (E)
- Conservación del impulso lineal ( $\mathbf{p}$ )
- Conservación del impulso angular (J)
- Conservación de la carga eléctrica (Q)
- *Conservación del número leptónico (L)*
  - *electrónico ( $L_e$ )*       $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$
  - *muónico ( $L_\mu$ )*
  - *tauónico ( $L_\tau$ )*
- *Conservación del número bariónico (B)*     $p p \rightarrow p p p \bar{p}$
- *Atención: una magnitud conservada hoy podría no haberse conservado en el pasado y viceversa  $\leftrightarrow$  Simetrías rotas*

# Número leptónico

- Sean las siguientes reacciones/decaimiento:

$$p^+ \bar{\nu}_e \rightarrow n e^+ \quad \checkmark$$

$$p^+ \nu_e \rightarrow n e^- \quad \times$$

$$\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu \quad \checkmark$$

$$p^+ \bar{\nu}_\mu \rightarrow n e^+ \quad \times$$

- Algunas se producen, otras no
- La 2da viola la conservación de la carga eléctrica
- ¿Qué pasa con la 4ta?
- La cantidad de leptones (o antileptones) por familia (o sabor) debe conservarse!



# Magnitudes conservadas

LEPTON CLASSIFICATION

$l$	$Q$	$L_e$	$L_\mu$	$L_\tau$
$e$	-1	1	0	0
$\nu_e$	0	1	0	0
$\mu$	-1	0	1	0
$\nu_\mu$	0	0	1	0
$\tau$	-1	0	0	1
$\nu_\tau$	0	0	0	1

$$p^+ \bar{\nu}_e \rightarrow n e^+$$



$$p^+ \nu_e \rightarrow n e^-$$



$$\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$$



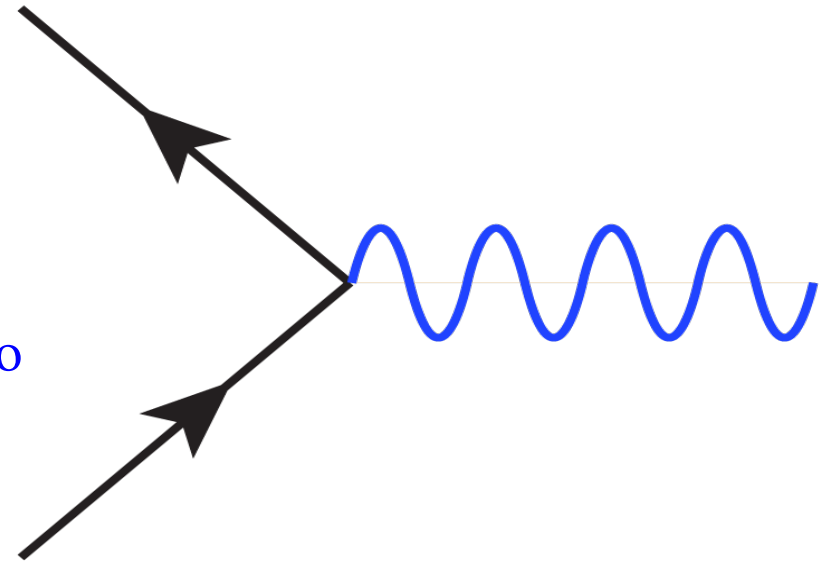
$$p^+ \bar{\nu}_\mu \rightarrow n e^+$$



- Carga eléctrica
- Número leptónico por sabor (flavor)
- Las antipartículas tienen signos opuestos en todos los números
- Entonces, hay “12” leptones diferentes
- **Los números antes y después de la reacción deben conservarse**

# QED (Quantum Electro Dynamics)

- **Electrodinámica cuántica (QED)**: teoría cuántica de campos (relativista) que describe las interacciones EM que ocurren entre partículas con carga eléctrica ( $Q \neq 0$ )
- Diagramáticamente, el proceso elemental en QED puede representarse con el siguiente vértice:
- **Convenciones diagramáticas**
  - El tiempo se dibuja en dirección vertical sentido positivo hacia arriba
  - La línea ondulada representa el intercambio de un fotón
  - La flecha corresponde a una partícula cargada. Si la flecha apunta “contra” el tiempo (sentido hacia abajo), representa a una antipartícula
  - Los trazos no representan las trayectorias de las partículas
  - En los vértices no pueden violarse las leyes de conservación

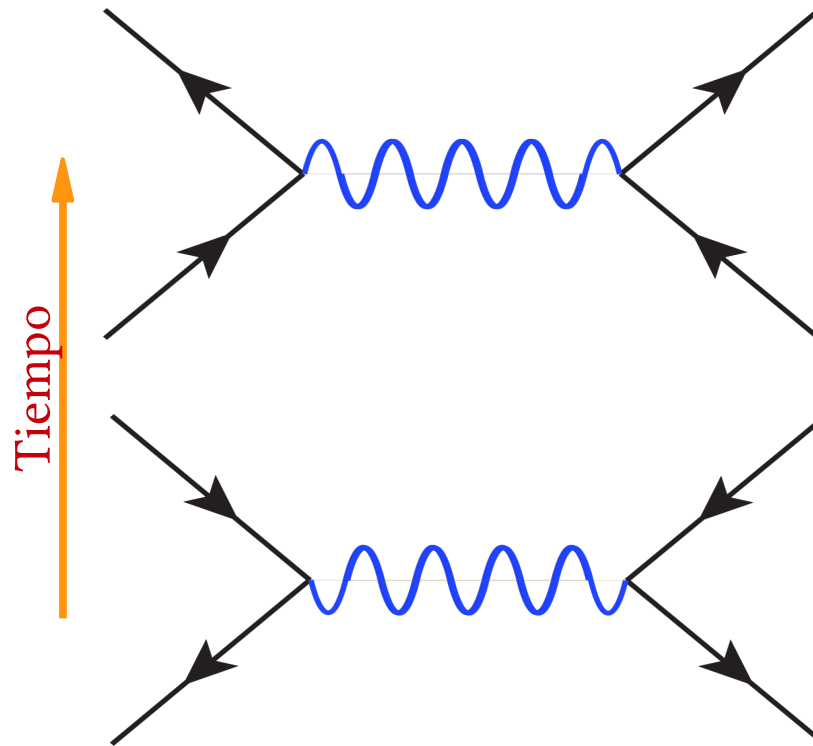


# Teoría diagramática

- Los vértices se combinan para formar reacciones  
( $l$  es un leptón:  $e, \mu, \tau$ )

$$l^- l^- \rightarrow l^- l^-$$

$$l^+ l^+ \rightarrow l^+ l^+$$

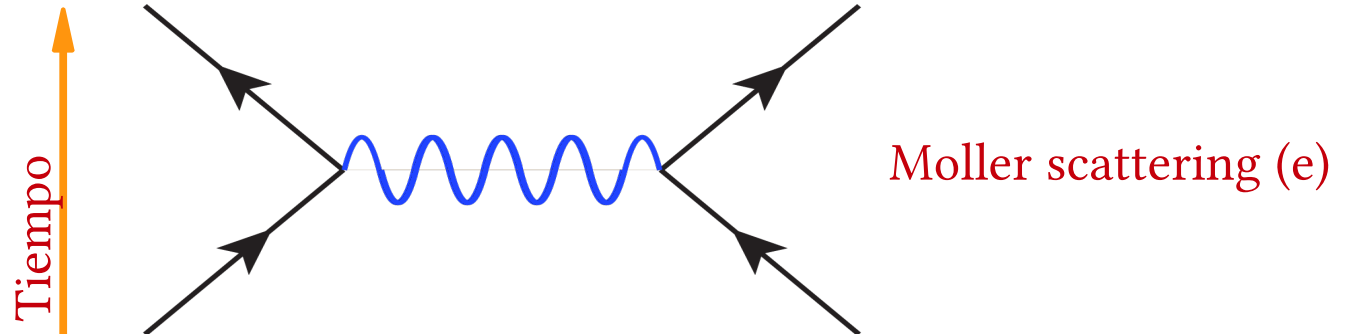


Moller scattering

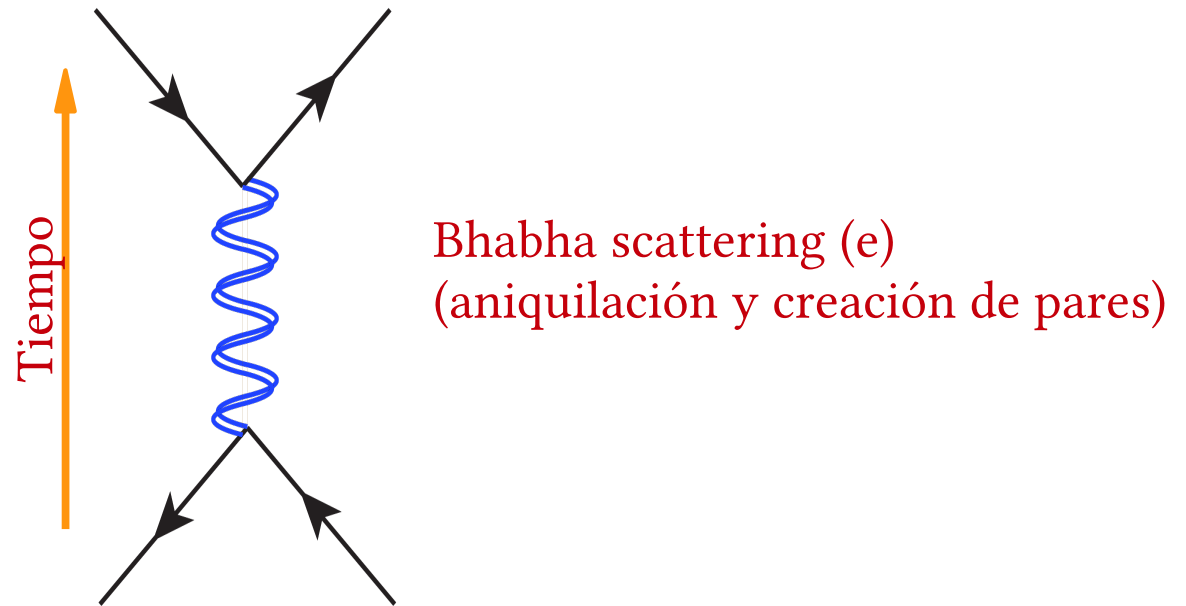
# Teoría diagramática

- Los vértices se combinan para formar reacciones  
( $l$  es un leptón:  $e, \mu, \tau$ )

$$l^- l^- \rightarrow l^- l^-$$

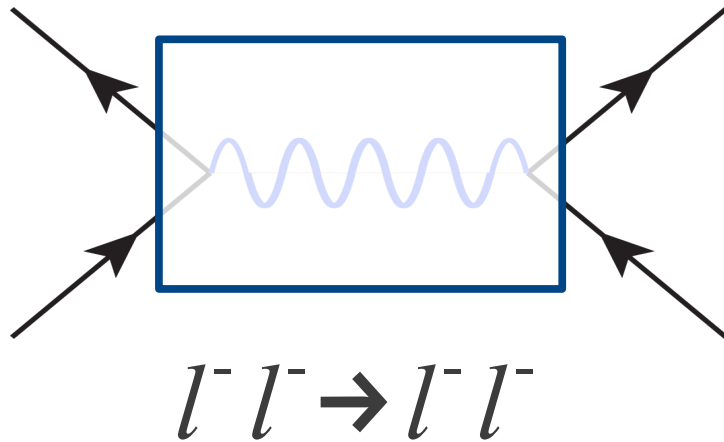


$$l^- l^+ \rightarrow l^- l^+$$

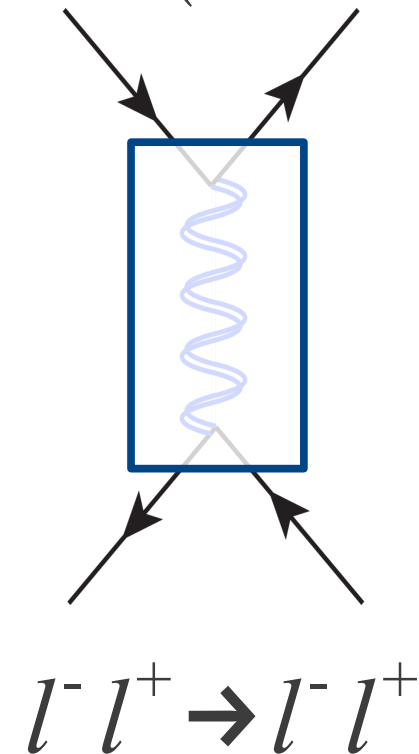


# Teoría diagramática

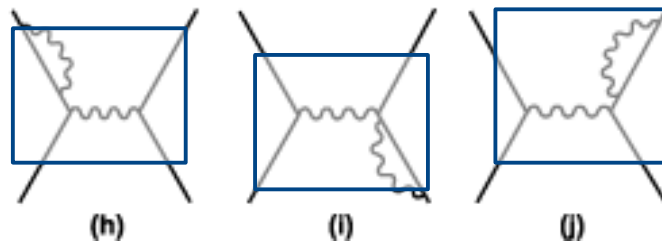
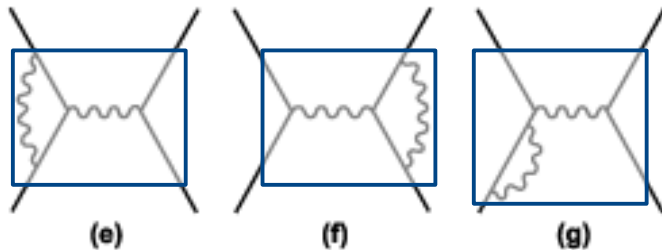
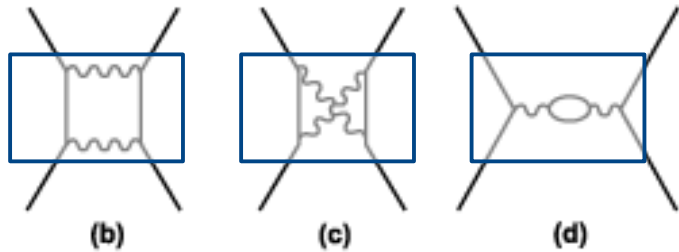
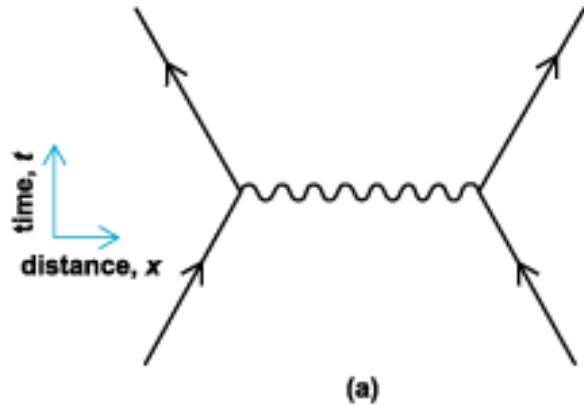
- Los estados intermedios son inaccesibles
  - Las líneas internas representan partículas “virtuales”
- Sólo se observan los estados iniciales y finales (asintóticos en el tiempo)
- Las líneas externas describen partículas “reales” (observables)



**Las líneas externas reflejan el proceso físico que está ocurriendo, las internas describen el mecanismo involucrado**



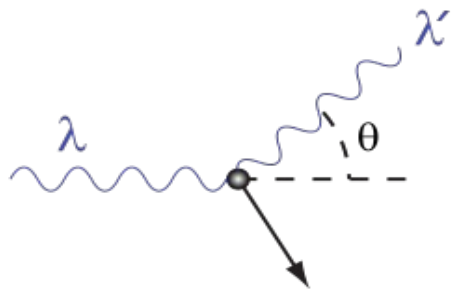
# Muchas contribuciones a un mismo estado



- Todos estos procesos tienen los **mismos estados| asintóticos**
- ¿Cuál de todos ellos ocurrió en realidad?
- Imposible saberlo → **Ocurrieron todos** al mismo tiempo, y las **infinitas posibles combinaciones** también
- En QED, las contribuciones de cada estado al resultado final son cada vez más pequeñas (vértice  $\sim \alpha_{EM} \sim 1/137$ )

## Tarea clase 02, entrega clase 04

- Mostrar que en el vacío, el vértice elemental de QED viola la conservación de la cuadrivector energía-momento, en cualquiera de sus configuraciones. Mostrar que esto no pasa en el interior de un material
- Dibujar el diagrama de Feynman del scattering de Compton. Luego, usando los principios de conservación, deduzca la ecuación de Compton:



$$\lambda' = \lambda + \frac{h}{mc}(1 - \cos \theta)$$

- Resolver los problemas 1.17, 2.2, 2.3 y 2.4