

Introducción a la física de partículas

Programa HST, Julio 2004

Michelangelo Mangano
División de Física Teórica
CERN, Ginebra
michelangelo.mangano@cern.ch



Hubble Ultra Deep Field
Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

NASA, ESA, S. Beckwith (STScI) and the HUDF Team

STScI-PRC04-07a

Las preguntas hechas por la Física de Partículas son las mismas que guiaron el desarrollo de la Filosofía Natural durante el transcurso de la Historia

- 
- ¿Cómo funciona el Universo?
 - ¿De dónde proviene?
 - ¿A dónde se dirige?
 - ¿Cuáles son los componentes últimos de la materia?
 - ¿Cómo se “mueven”?
 - ¿Qué “los mueve”?

¡La más ambiciosa de todas las ciencias!

Incluso el acercamiento seguido por los filósofos antiguos es similar al usado por el físico moderno:

Identificar algunos principios fundamentales de los cuales puedan derivarse las propiedades de todos los fenómenos naturales, tanto del macrocosmos (el cielo, el Universo) como de aquello a escala humana

Lo que ha cambiado en el transcurso de la historia es la percepción de la verdadera complejidad de las cosas, la habilidad para llevar a cabo mediciones cuantitativas y los criterios epistemológicos que establecen la completitud de una cierta explicación y su entendimiento

En común, la identificación de dos categorías:

a) Los componentes de la materia

b) Las fuerzas que gobiernan sus comportamientos

Ejemplo

Componentes:

aire, agua, fuego,
tierra

Fuerzas:

- aire y fuego empujados hacia
arriba

- tierra y agua empujados hacia
abajo

Juicio de corrección:

¿cómo es que un árbol cae en el agua, y sin embargo es empujado hacia arriba y flota?

Reevaluación de una teoría (Arquímedes)

- **toda** la materia es empujada hacia abajo, pero con intensidad proporcional a su peso:

Un cuerpo inmerso en agua recibe un empujón hacia arriba equivalente al peso del agua desplazada

El aire es más ligero que una roca, por lo tanto, flota sobre ésta.

El aire caliente es más ligero que el aire frío, y por éste es empujado hacia arriba

Obsérvese que no hay una garantía a-priori de que la Naturaleza pueda ser descrita por un número limitado de principios, o de que éstos se apliquen en todas partes en todo momento.

Por ejemplo, los primeros estudios cuantitativos sobre los decaimientos beta del núcleo en los años 1920-30 pusieron en duda la ley de la Conservación de la energía

El gran éxito de la física moderna reside en su increíblemente precisa y unificada descripción de una multitud de fenómenos naturales observados

Nosotros, por lo tanto, esperamos hoy que todas las ramas de la física y de otras ciencias sean, a final de cuentas, reducibles a la física de partículas

- El entendimiento del **Big Bang** y de lo que le antecedió requiere a su vez del entendimiento del comportamiento de la Naturaleza en presencia de campos gravitacionales de intensidad similar a la de las fuerzas nucleares (Gravedad Cuántica).
- Las fuentes de **Inflación** y de la **Materia Oscura** y la **Energía Oscura**, las cuales, respectivamente, configuraron y determinarán el futuro de la estructura a gran escala del Universo, deben ser encontradas dentro del espectro de partículas, las cuales formarán nuestra final *“teoría de Todo”*

N.B.

Para introducir la física de partículas no seguiré un camino histórico. Más bien, usaré una visión retrospectiva, la cual creo es más apropiada como herramienta didáctica.

Después de todo, los bebés pequeños aprenden sobre los objetos y sus usos/peligros (fuego, lápices, pelotas...) mientras éstos aparecen frente a ellos, ¡sin preocuparse mucho cuál de los objetos ha sido descubierto primero!

En particular, no revisaré los distintos intentos para formular una teoría de las fuerzas fundamentales. Lo importante a saber es que la teoría que presentaré, conocida como **El Modelo Estándar**, es la **única** teoría capaz de explicar el mundo tal como lo conocemos.

Nivel 0: ¿Qué? ¿Cómo?

- ¿Existen bloques fundamentales de construcción?
- Si así es, ¿qué son?
- ¿Cómo interactúan?
- ¿Cómo determinan las propiedades del Universo?

Nivel 1: ¿Por qué?

- ¿Por qué bloques fundamentales de construcción?
- ¿Por qué interactúan del modo como lo hacen?
- ¿Por qué vivimos en 3+1 dimensiones?
- ¿Hay acaso alternativas posibles?
-

¿Por qué **algo** en vez de **nada**?

Principales resultados conceptuales

- ***Simplicidad*** (de los bloques constitutivos y sus interacciones): la complejidad emerge de una gran variedad de combinaciones de grandes agregados de objetos elementales (¡como en los juegos de LEGO!)
- ***Unidad*** (de las leyes de interacción)
- ***Unidad*** (de los elementos): “un protón es un protón es un protón”
- ***Unificación*** (de las leyes fundamentales): independencia del sitio, tiempo y condiciones externas

Los principios fundamentales de la Física y las partículas elementales

Las partículas elementales están sujetas a los mismos principios fundamentales que enseñas en la secundaria:

- causalidad (la causa antecede al efecto)
- conservación de la energía (E), momento, (p_i) y momento angular (L_i) (invariancia de las leyes físicas en las translaciones en el espacio y el tiempo)
- la velocidad de la luz es constante en todos los sistemas de referencia (principio de la relatividad especial)
- mecánica cuántica (dualidad onda-partícula, principio de incertidumbre, cuantización de la energía, etc...)
- “ $F=ma$ ” (principio de mínima acción):

$$\delta \int_{t_0}^{t_1} dt L(x, dx/dt) = 0 \Rightarrow \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial dx_i/dt} = \frac{\partial L}{\partial x_i}$$
$$L = \frac{1}{2}mv^2 - V(x) \Rightarrow \frac{dp_i}{dt} = -\frac{\partial V(x)}{\partial x_i} \Rightarrow F_i = ma_i$$

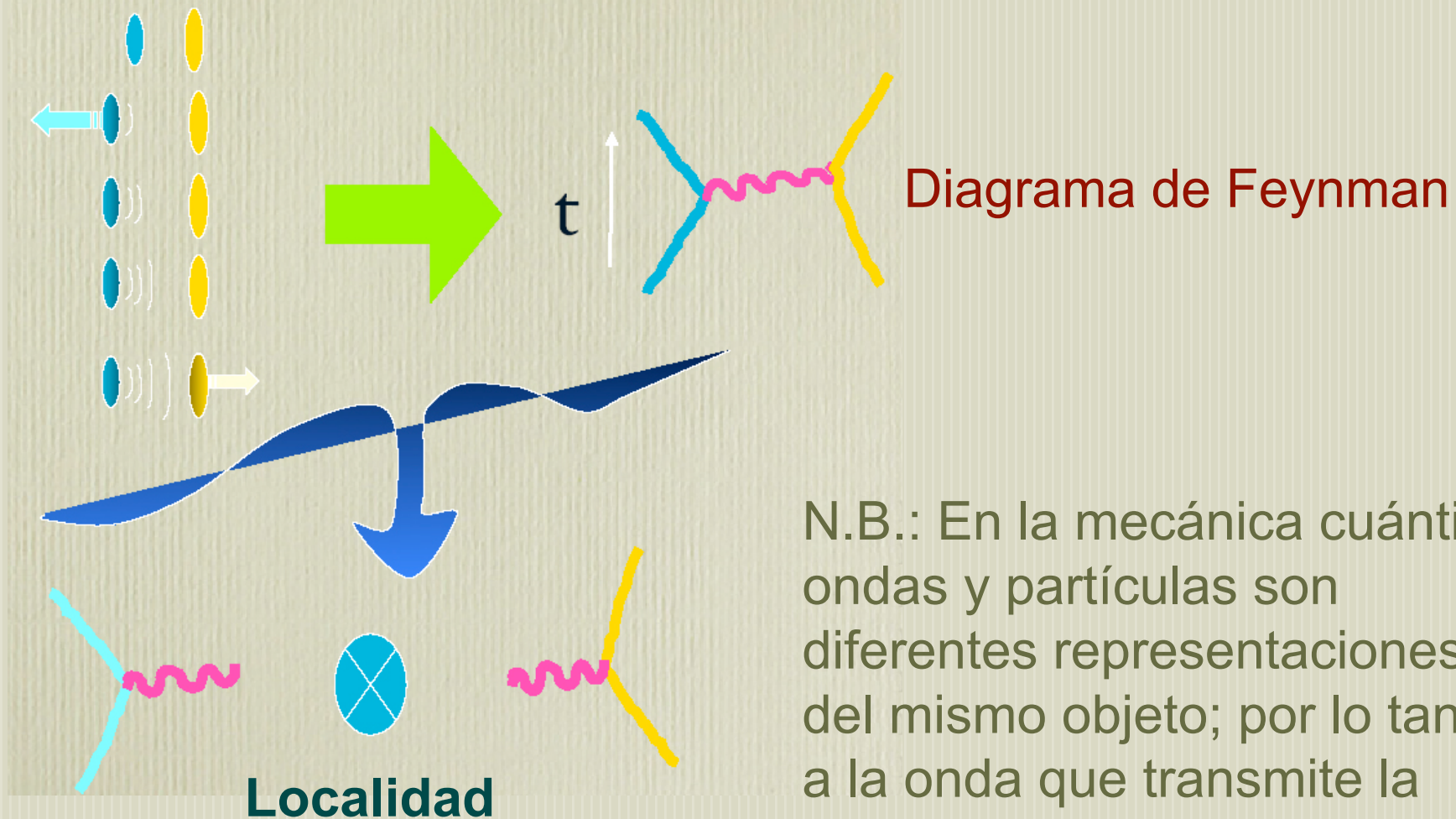
Interacciones (o “fuerzas”)

- Responsables de:
 - Formación de los estados ligados ($E < 0$):
 - Tierra-Sol
 - Electrón-núcleo
 - Dispersión ($E > 0$):
 - El movimiento de un electrón en un metal
 - Propagación de la luz
 - Deflexión de partículas cargadas disparadas a través de un campo electromagnético
 - Transmutaciones:
 - Transiciones atómicas (emisión de radiación mientras un electrón cambia de orbital)
 - Decaimientos ($n^- \rightarrow p$ e neutrino)

El papel de la relatividad especial

- Las partículas elementales tienen masas muy pequeñas, y las fuerzas presentes en los aceleradores, así como en el Universo, pueden fácilmente acelerarlas a velocidades cercanas a la de la luz. **Los efectos relativistas, por lo tanto, son esenciales**, y la descripción del comportamiento de las partículas elementales debería ser consistente con las leyes de la relatividad especial.
- En particular, cualquier modelo de interacciones debería satisfacer el principio de que las fuerzas no pueden ser transmitidas a distancia de manera **instantánea**.

La representación de las interacciones



N.B.: En la mecánica cuántica, ondas y partículas son diferentes representaciones del mismo objeto; por lo tanto, a la onda que transmite la señal de una interacción deberemos asociarle una partícula correspondiente.

Propiedades de las interacciones

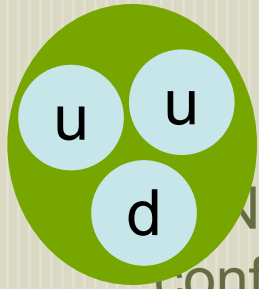
- **Localidad** (las propiedades de la interacción únicamente dependen de las propiedades de los participantes en un punto en el espacio-tiempo.)
- **Causalidad** (el efecto sigue a la causa. La causa no puede manifestarse antes del tiempo que le toma a la luz cubrir la distancia entre la causa y el efecto.)
- **Universalidad** (la interacción entre dos partículas se factoriza en términos de las propiedades independientes [por ejemplo, las cargas] de las partículas individuales.)

Los bloques de construcción fundamentales: fermiones, espín=1/2 $\hbar/2\pi$

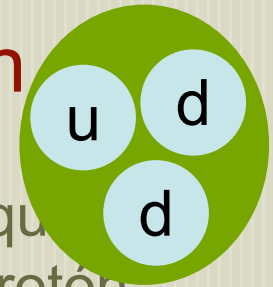
	Quarks		Leptones	
	Q=2/3 e	Q=-1/3 e	Q=-e	Q=0
materia ordinaria	up (0.004 pequeño*)	down (0.006)	e (0.0005)	ν_e (muy
	charm (1.5)	strange (0.5)	μ (0.1)	ν_μ (muy pequeño)
copias idénticas (masa distinta)	top (175 pequeño)	bottom (4.5)	τ (1.8)	ν_τ (muy

(Valores de masas en GeV)

* *muy pequeño*: menos de 10^{-9}
pero distinto de 0



Nota sobre la masa del protón/neutrón



Nótese que la suma de las masas de los tres quarks que conforman el protón es mucho menor que la masa del protón.

$$2m_u + m_d \approx 15 \text{ MeV} \ll 938 \text{ MeV}$$

Esto es, en efecto, otra manifestación de la identificación entre la masa y la energía: la masa de un sistema compuesto está dada por su energía total en reposo, y esto incluye la masa en reposo de sus componentes, así como su energía cinética y la energía potencial promedio. En el caso de los quarks dentro del protón, la enorme fuerza de unión y la masa ligera de los quarks los hace altamente relativistas. Por lo tanto, la mayor parte de la masa del protón proviene de la energía cinética de los quarks confinados dentro.

Una agradable comprobación de la consistencia de este escenario se obtiene observando la **diferencia de la masa neutrón-protón**. Las interacciones fuertes entre los quarks no hacen distinción entre los quarks up y down. Así, esperamos que las contribuciones de la energía cinética y potencial de los quarks a las masas de protones y neutrones debiera ser la misma. Como resultado:

$$m_n - m_p \approx [(T+U)_n + (m_u + 2m_d)] - [(T+U)_p + (2m_u + m_d)] \quad m_{\bar{d}} = m_u \quad 2\text{MeV}$$

Lo cual es consistente con el resultado observado de $m_n = 940 \text{ MeV}$

Las interacciones fundamentales:

bosones vectoriales, espín= $h/2\pi$

FUERZA	SE ACOPLA CON:	TRANSPORTA LA FUERZA:
Electromagnetismo	carga eléctrica	fotón ($m=0$)
fuerza “débil” ($m=91$)	carga “débil”	$W^\pm$ ($m=80$) Z^0
fuerza “fuerte”	“color”	8 gluones ($m=0$)

bosón tensorial, espín= $2h/2\pi$

gravedad	energía	gravitón ($m=0$)
----------	---------	--------------------

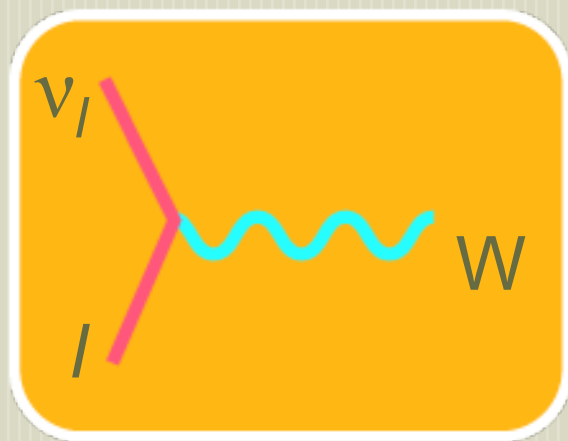
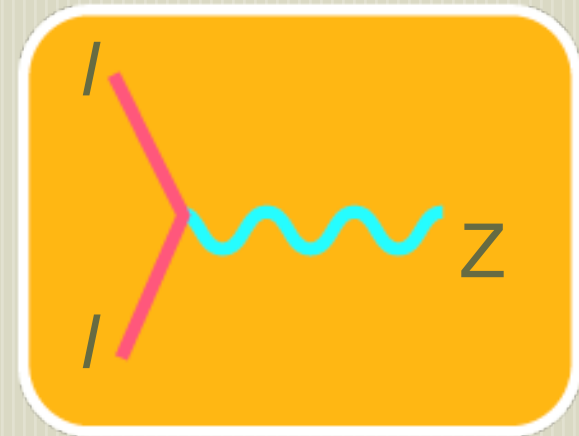
bosón escalar, espín=0

($m=????$)	masa	Higgs
--------------	------	--------------

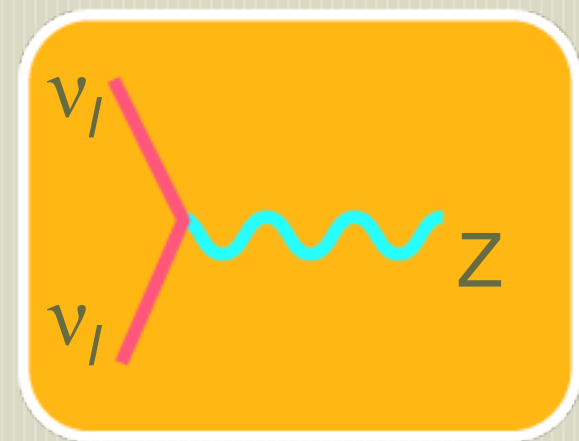
Interacciones de leptones ($l=e,\mu,\tau$)



$\propto -e = \text{carga eléctrica}$



$\propto g_W = \text{carga débil}$



Interacciones de quarks



$$\propto \frac{2}{3} e$$



$$\propto -\frac{1}{3} e$$



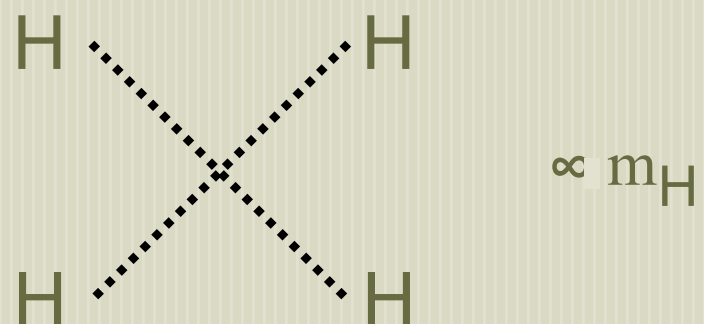
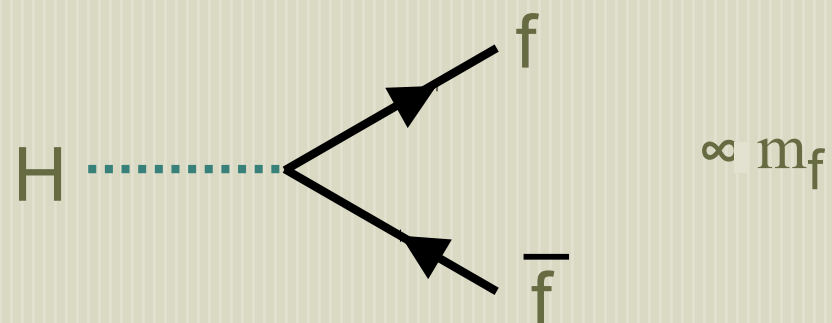
$$\propto g_W M_{qq'}$$

$M_{qq'}$	u	c	t
d	0.97	-0.22	
~ 0.001 s	0.22	0.97	
~ 0.05 b	~ 0.001	~ 0.05	~ 1



$$\propto g_S = \text{acoplamiento fuerte}$$

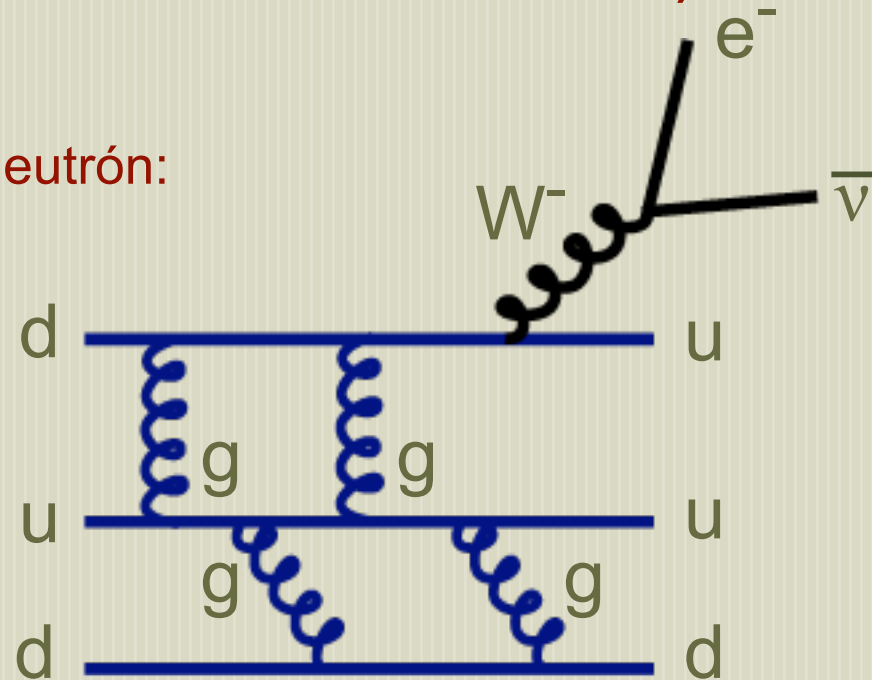
Interacciones de Higgs



Interacciones más complejas se pueden construir a partir de estos bloques fundamentales al reforzar las leyes de la conservación de la energía, el momento y la carga. Las reglas de cálculo asociadas a cada vértice y la propagación de los estados intermedios (las líneas que conectan los diferentes vértices) permiten calcular de forma única todas las propiedades de interacciones más complejas.

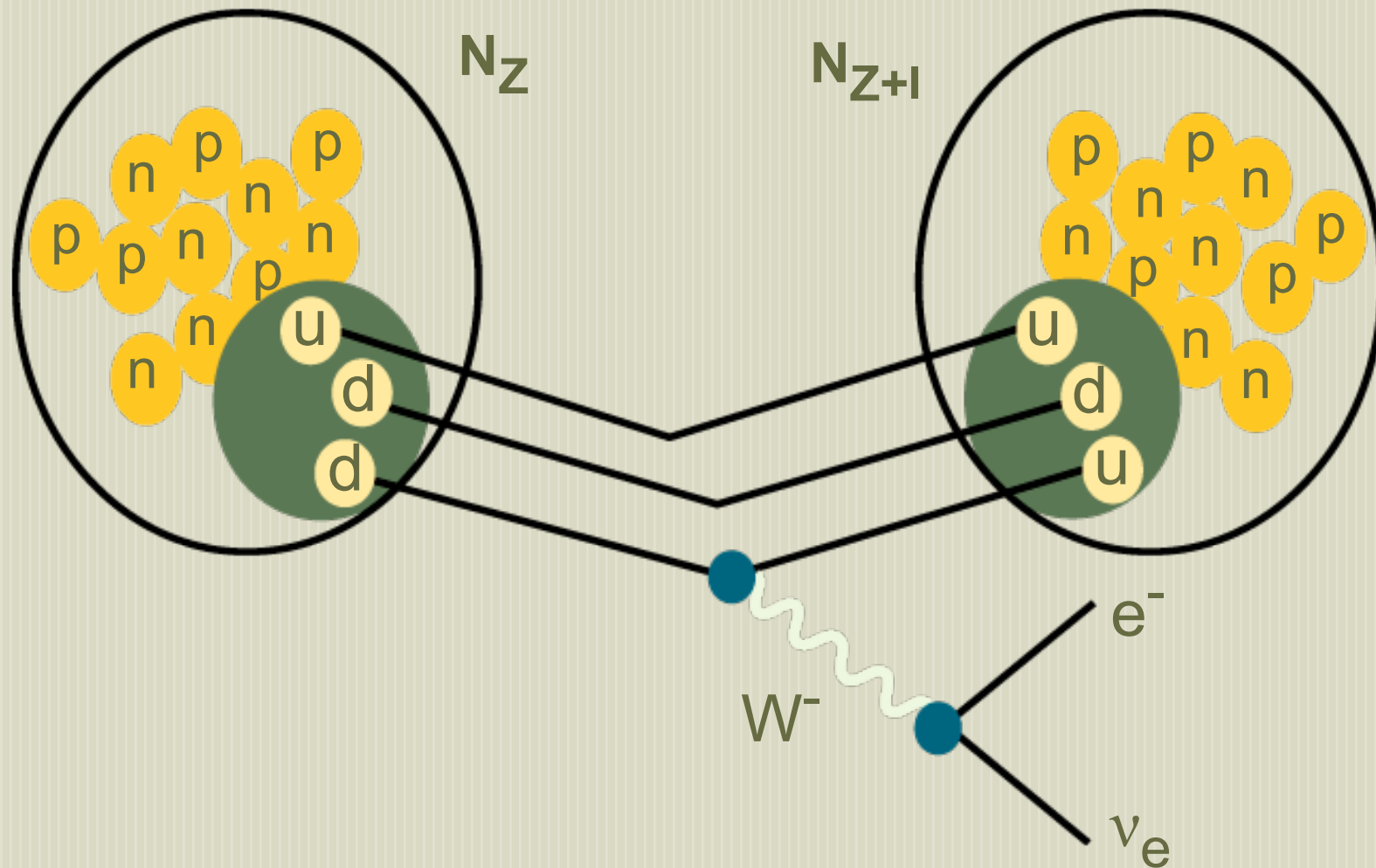
Todos los fenómenos observados en la naturaleza pueden ser reducidos, en un nivel fundamental, a este esquema, y son, por tanto, calculables (y en concordancia con los datos)

Ejemplo. Decaimiento de neutrón:

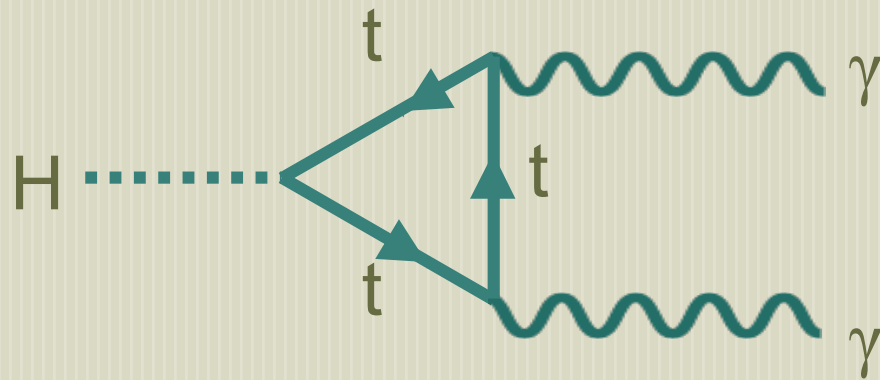


Ejemplo: radioactividad

$$N_Z \rightarrow N_{Z+1} e^- \bar{\nu}_e$$



Ejemplo: Higgs $\rightarrow$ 2 fotones



$$\propto m_t (2/3e_t)^2$$

t = quark top

γ = fotón

2 Repaso de las transformaciones de Lorentz

$V_\mu = (V_0, V_1, V_2, V_3)$: 4 -vector

En un sistema de referencia moviéndose con velocidad v en dirección del eje V_μ , V_μ se transforma como sigue:

$$V'_0 = \frac{V_0 - \beta V_1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad \text{donde } \beta = \frac{v}{c} \quad \text{y} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$V'_1 = \frac{V_1 - \beta V_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad V'_{2,3} = V_{2,3}$$

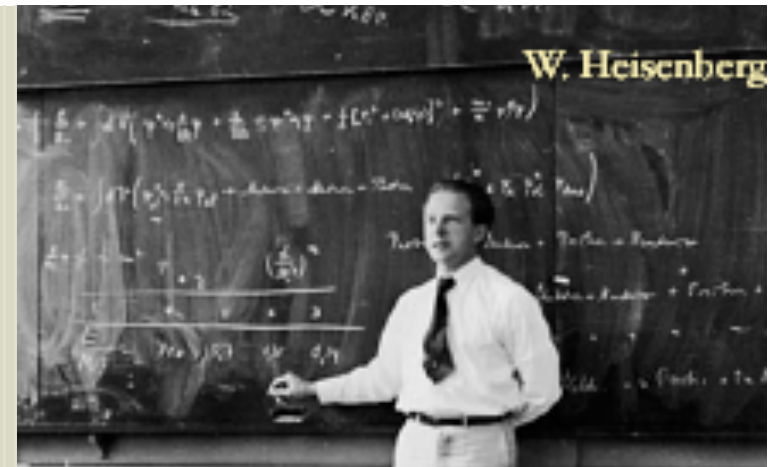
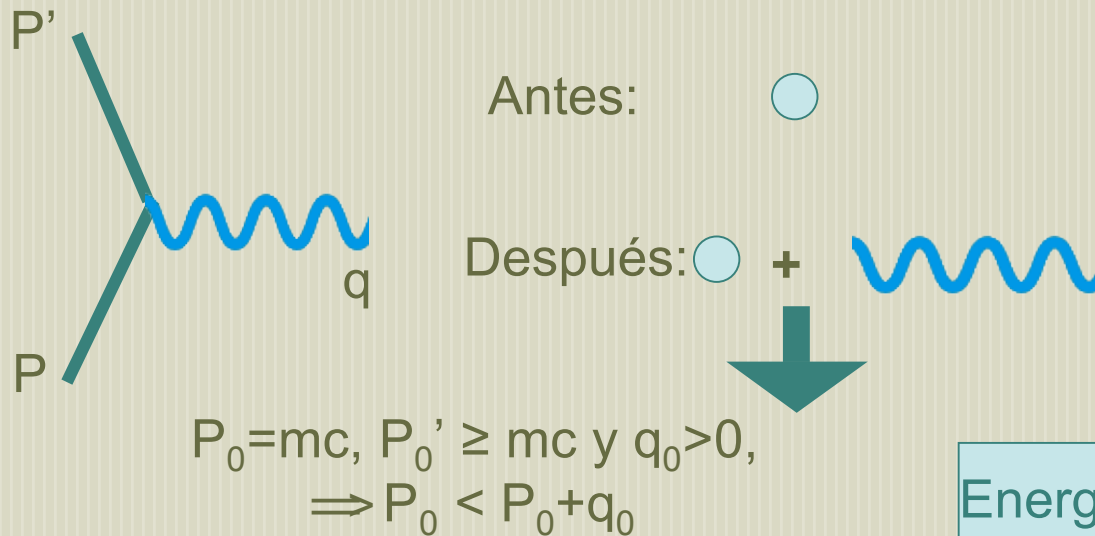
Obsérvese que $V_0^2 - V_1^2 - V_2^2 - V_3^2$ es invariante. En el caso del **vector del cuadrimomento** $(E, \mathbf{p})$, esta invariante es la masa:

$$p_0^2 - p_1^2 - p_2^2 - p_3^2 = m^2$$

La energía de una partícula moviéndose con velocidad β es, por lo tanto, **$E = \gamma m$** (en vista de que m es la energía en su sistema en reposo), y su tiempo de vida τ , medido por un observador en reposo, es **$\tau = \gamma \tau_0$** (donde τ_0 es su tiempo de vida en reposo)

Podemos por lo tanto escribir: **$\tau = E/m\tau_0$**

Simple,... ¡pero sutil!

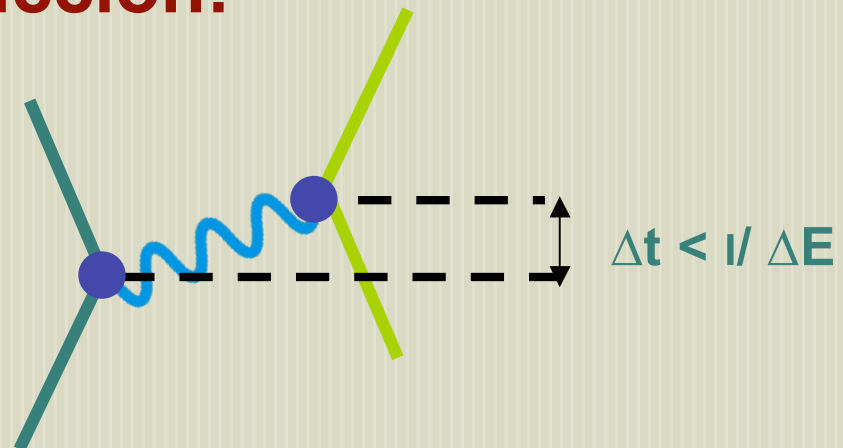


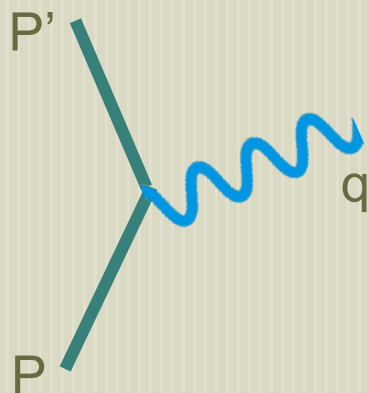
Energía (antes) $\neq$ Energía (después)

La mecánica cuántica resuelve esta contradicción:

Principio de incertidumbre:

Una medición de la energía realizada en un tiempo corto Δt puede, cuando mucho, tener una exactitud de $\Delta E \geq 1 / \Delta t$





Alternativamente:

$$P = P' + q \text{ y} \\ P^2 = P'^2 = M^2$$



$$Q^2 < 0$$

NB: la relatividad especial exige que la energía de los estados con $q^2 < 0$ sean o positivos o negativos, dependiendo del sistema de referencia. La existencia de estados con $E < 0$ requiere la existencia de *antipartículas*.

Llamamos a estados con $q^2 < 0$, *virtuales*. Su existencia está limitada a tiempos consistentes con el principio de incertidumbre

Dos formulaciones alternativas, pero equivalentes:

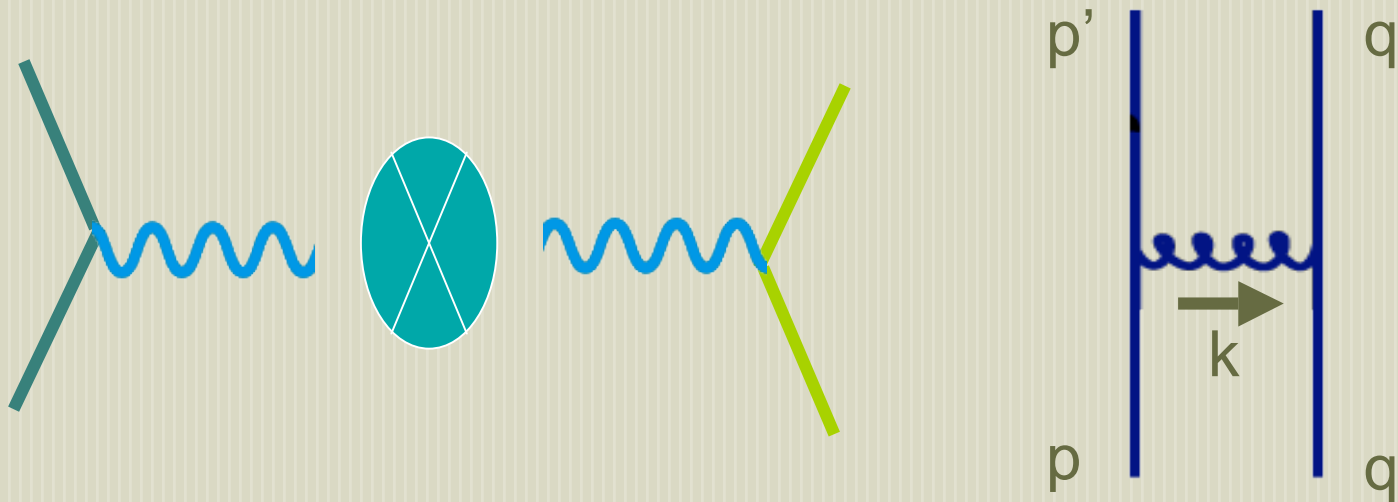
(I) anterior: la conservación de (E, p_i) es violada sobre los períodos de tiempo $\Delta t < h/2\pi\Delta E$ (*)

(*) ¿Cómo es que el signo de desigualdad aquí es opuesto al estándar, $>$, encontrado en el principio de incertidumbre?

(II) moderna: (E, p_i) siempre son conservados; sin embargo, la relación $m = E/c^2$ es violada durante un intervalo de tiempo más corto que $\Delta t < h/2\pi\{mc^2 - E\}$

Los principios de conservación y la relación $m^2 c^4 = E^2 - p^2 c^2$ son válidos durante intervalos de tiempo suficientemente largos como para no ser influenciados por los detalles de los procesos de medición, al tratar de establecer su validez. La confirmación de estos principios en una escala de tiempo muy corta no puede realizarse sin perturbar al sistema tanto, que haga que la medición misma sea inválida

Después de su emisión, una partícula virtual (es decir, una partícula con $p^2 \neq m^2$) debe ser rápidamente reabsorbida. Puede ser reabsorbida por una partícula distinta a aquélla que la emitió, dando lugar a una interacción:

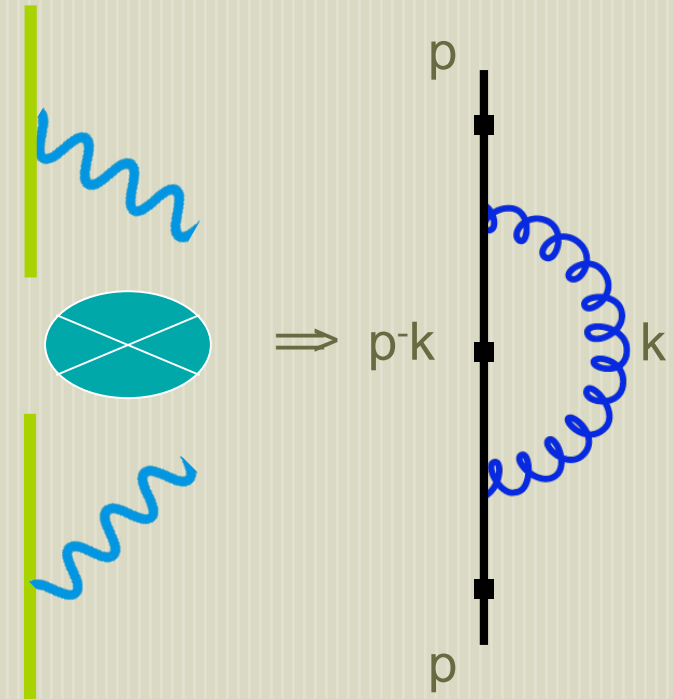


En este caso, el momento que lleva la partícula virtual corresponde al momento intercambiado durante la interacción:

$$\mathbf{k} = \mathbf{p}' - \mathbf{p} = \mathbf{q} - \mathbf{q}'$$

Alternativamente, puede ser reabsorbida por la propia partícula (**autointeracción**: por ej., en el caso de la interacción de un electrón con un campo eléctrico generado por sí mismo):

En este caso, **el momento de la partícula virtual no está determinado**, y todos los procesos posibles de emisión y absorción de los fotones con momento arbitrario deben ser considerados al calcular el efecto de la autointeracción:



¡El hecho de que las propiedades de una partícula con masa m dependan de las propiedades de la teoría a escalas de energía arbitrarias, en particular, escalas mucho más grandes que m , es uno de los aspectos más esotéricos y problemáticos de la física de partículas, haciendo que la construcción de una teoría consistente no sea, en absoluto, trivial!

Incluso tú puedes cualitativamente estimar los efectos de esas contribuciones altamente virtuales:

$$\Delta \propto e^2 \sum_E N(\Delta E) \times \Delta t(E)$$

Donde:

e^2 representa la fuerza de la interacción (una potencia de e por cada vértice)
 $N(\Delta E)$ es el número de estados por volumen de unidad dentro del intervalo de energía $(E, E+\Delta E)$. La mecánica cuántica nos dice que $N(\Delta E) = \Delta E/h$.
 $\Delta t(E)$ es el tiempo de vida de esos estados, dados de acuerdo con el principio de incertidumbre por h/E .

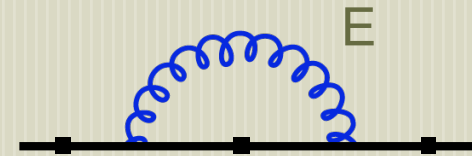
Poniendo todo junto obtenemos:

$$\Delta \propto e^2 \int^\infty \frac{dE}{E} \sim e^2 \log(\Lambda) |_{\Lambda \rightarrow \infty}$$

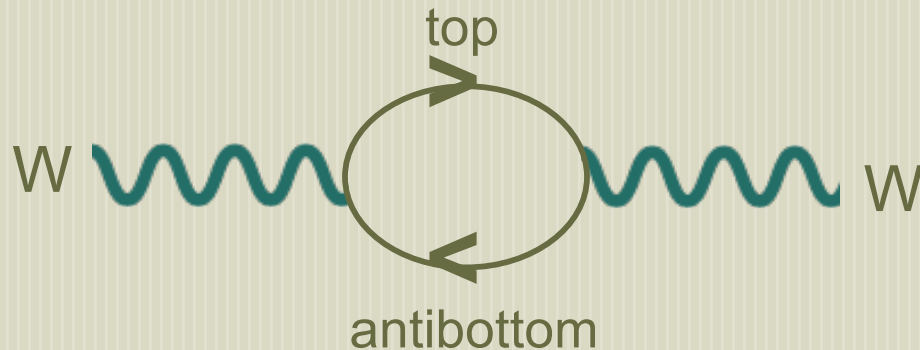
En el caso de la emisión y absorción de radiación gravitacional, el problema es todavía más serio. La fuerza de la interacción es proporcional a la energía, y la física a energías infinitamente altas domina:

$$\Delta \propto \int^\infty E^2 \frac{dE}{E} \sim \Lambda^2 |_{\Lambda \rightarrow \infty}$$

Este comportamiento anómalo a altas energías está en el origen de las dificultades para formular una teoría cuántica de la gravedad consistente y satisfactoria.



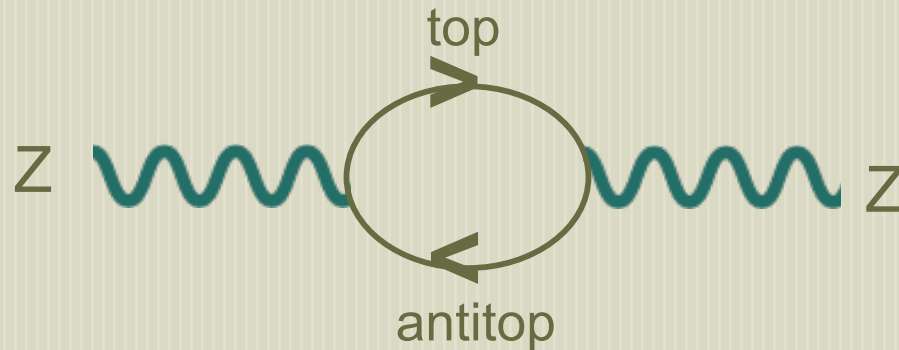
Realidad de las partículas virtuales: la predicción de la masa del quark top



$$m_W = 80 \ll m_t + m_b = 180 \text{ GeV}$$

top virtual

$$\Delta m_W = f(m_t, m_b)$$



$$m_Z = 91 \ll 2m_t = 350 \text{ GeV}$$

tops virtuales

$$\Delta m_Z = g(m_t)$$

Input teórico: $m_W/m_Z = h(m_t, m_b)$

Input experimental: determinación directa de m_W/m_Z

Output: determinación indirecta de m_{top} , confirmado por la medición directa del quark top después de su descubrimiento

Observables y cantidades fundamentales

- **Masa:**
 - Partículas compuestas $\rightarrow$ origen dinámico, calculable: $M=E/c^2$, $E=T+U$
 - Partículas fundamentales $\rightarrow$ parámetro asignado; ¿¿origen??
 - Medición:
 - en decaimientos: $P=\sum p_i$, $M^2=P^2$
 - en producción: M = energía mínima necesaria para la creación
- **Carga:**
 - ¿Qué tipo (eléctrica, débil, fuerte)?
 - ¿Hay otras cargas? ¿Cuál es el origen de la carga?
 - Medición: fortaleza de la interacción
 - Tiempo de vida de una partícula antes de decaer
 - probabilidades de reacción (**rate counting**)
- **Spin** (momento angular intrínseco)
 - Entero $\rightarrow$ bosones; semientero $\rightarrow$ fermiones
 - ¿Origen?
 - Principio de Pauli (dos fermiones idénticos no pueden ocupar el mismo estado cuántico) en el origen de la estabilidad y diversidad de la materia
 - Medición: distribuciones angulares en los procesos de dispersión y decaimiento

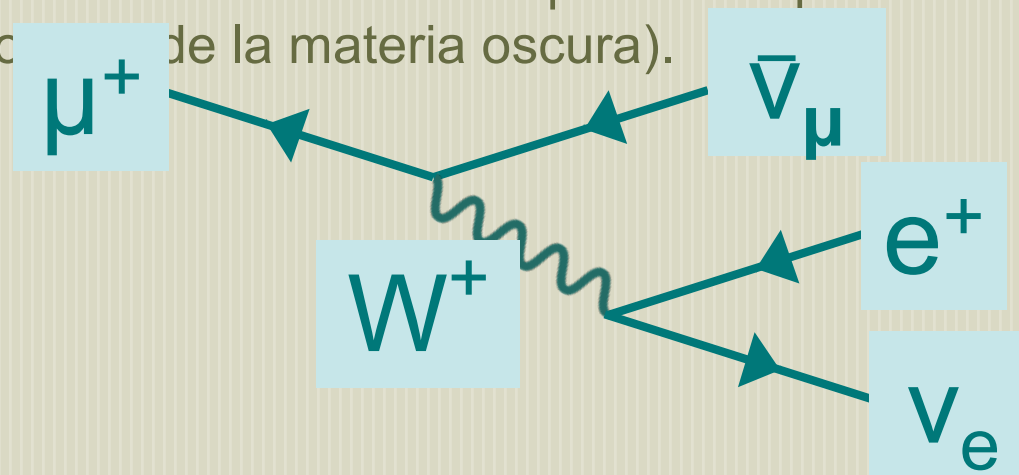
Decaimientos y tiempos de vida

Si los acoplamientos de una partícula **A** le permiten transformarse a sí misma en una serie de partículas **B**₁, ..., **B**_n, y si $m_A > m_{B_1} + \dots + m_{B_n}$,

A decae a B₁+...+B_n.

Sólo las partículas para las cuales no hay un canal de decaimiento abierto pueden ser estables. Hasta la fecha, sólo sabemos de dos ejemplos: el electrón y el protón (si bien hay teorías que predicen que el protón decae en un tiempo de vida de aproximadamente 10^{34} años, así como teorías en las cuales las partículas pesadas estables explican el contenido de la materia oscura).

• Ejemplo:

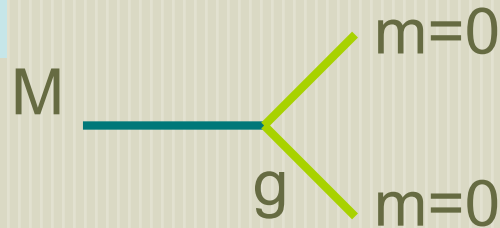


• Mientras más fuertes sean los acoplamientos y más grande sea la diferencia de masa, más pronto ocurre el decaimiento:

$$N(t) = N(0)e^{-t/\tau} \quad \text{donde } \tau = \tau(M, G) \text{ es el tiempo de vida}$$

Ejemplo

$A \rightarrow BB$



$$T \propto (g^2 M)^{-1}$$

Esto será
mostrado en más
detalle la próxima
vez

Si el tiempo de vida de **A** es T , no podemos medir la masa M con mejor precisión que h/T . Por lo tanto la masa de una partícula inestable se define con una incertidumbre inversamente proporcional a su tiempo de vida:

$$\Gamma = h/T$$

Alternativamente: una partícula con un tiempo de vida finito puede ser producida con una energía ligeramente diferente a $E=mc^2$ (de nuevo, una partícula virtual). La diferencia en energía (o masa) es “tomada temporalmente” gracias al principio de incertidumbre. Mientras más corto sea el tiempo de vida, más grande es la posible violación de la conservación de la energía.

Las consecuencias experimentales son muy claras: el número de partículas **A** producidas como una función de la energía tiene una distribución que es equivalente a

$$\Gamma = h/T$$

Análisis dimensional, constantes fundamentales, órdenes de magnitud

Velocidad de la luz: $c=3 \times 10^{10} \text{ cm/s}$

En la física de partículas, expresamos las velocidades en unidades de c , y ponemos $c=1$ en nuestras expresiones. Las distancias, por lo tanto, pueden ser medidas en unidades de tiempo y viceversa (esto es algo que también hacemos inconscientemente en la vida diaria cuando manejamos: en vista de que sabemos que más o menos manejamos a 120 km/h (o 75mph en los Estados Unidos), sabemos que si estamos a 120 km de nuestro destino, significa que nos resta más o menos una hora de camino.)

Esto es muy útil cuando pensamos en la conexión entre el tiempo de vida de una partícula y la distancia que cubrirá antes de decaer:

$$10^{-10} \text{ s} \iff L = \gamma \times 3 \text{ cm}$$

Otra consecuencia es que podemos expresar los valores de masa en unidades de energía y viceversa. Ejemplo:

$$E^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4 \implies E^2 - p^2 = m^2 \text{ (en el sistema en reposo, } E=m)$$

$$m_{\text{proton}} = 1.67 \times 10^{-24} \text{ gr} \rightarrow E_{\text{proton}} = 1.67 \times 10^{-24} \times 9 \times 10^{20} \text{ gr cm}^2 \text{ s}^{-2} \approx 1.5 \times 10^{-10} \text{ J}$$

En física de partículas la mejor unidad de energía es el eV (energía adquirida por una partícula con una carga $=e$ cuando se mueve a través de una diferencia de potencial de 1 voltio):

$$1 \text{ eV} \approx 1.6 \times 10^{-19} \text{ J} \implies E_{\text{proton}} = 938 \times 10^6 \text{ eV} = 938 \text{ MeV} - m_{\text{proton}} = 938 \text{ MeV}$$

Constante de Planck: h $[h]=[E][t]$ (acción) $\Rightarrow$ [erg s] o [MeV s]

Numéricamente: $=h/2 = 6.58 \times 10^{-22}$ MeV s

Como en el caso de la luz, usamos como unidad fundamental la *acción*, siendo $= 1$. Como resultado podemos ahora expresar el tiempo en términos de energía y viceversa:

$$1\text{MeV} = \{6.58 \times 10^{-22} \text{s}\}^{-1}$$

$$1\text{s} = \{6.58 \times 10^{-22} \text{MeV}\}^{-1}$$

Es útil extraer rápidamente la relación entre la amplitud de una partícula (es decir, la **????** en su masa permitido por el principio de incertidumbre) y su tiempo de vida. Una amplitud de 1MeV corresponde a un tiempo de vida de $6.58 \times 10^{-22} \text{s}$.

En unidades donde $c=1$ y $\hbar=1$, la carga eléctrica es un número puro. De hecho:

$$V(r) = e^2/4\pi r \Rightarrow \{e^2\} = \{\text{Tiempo de Energía}\} \{L/\text{Tiempo}\} = \{\text{acción}\} \{\text{velocidad}\} = 1$$

Así podemos medir la carga eléctrica en términos de la cantidad de energía potencial del campo eléctrico generado por dos cargas e puestas a una distancia r , e integradas sobre un tiempo t igual al tiempo necesario para que la luz recorra la distancia r , todo expresado en unidades de:

$$V(r) = e^2/4\pi r \Rightarrow r/c V(r)/\hbar = e^2/4\pi c \Rightarrow \quad \quad \quad e^2/4\pi c = (\hbar/c) \quad$$

**Carga del
electrón**

$\Rightarrow$

$$\alpha \equiv e^2/4\pi c = 1/137$$

Algunos números útiles en física de partículas

$$c = 200 \text{ MeV fm} \quad (1 \text{ fm} = 10^{-13} \text{ cm}) \Rightarrow$$

$$10^{-13} \text{ cm} \Leftrightarrow 200 \text{ MeV}$$

$$m(\text{electrón}) = 511 \text{ keV} \sim 0.5 \text{ MeV}$$

$$m(\mu^\pm) = 105.7 \text{ MeV}, \quad \tau = 2 \cdot 10^{-6} \text{ s} \Leftrightarrow 600 \text{ m}$$

$$m(\pi^\pm) = 139.6 \text{ MeV}, \quad \tau = 3 \cdot 10^{-8} \text{ s} \Leftrightarrow 10 \text{ m}$$

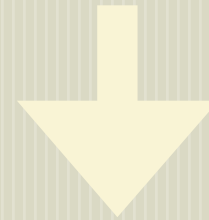
$$m(\pi^0) = 135 \text{ MeV}, \quad \tau = 8.4 \cdot 10^{-17} \text{ s} \Leftrightarrow 2 \cdot 10^{-9} \text{ cm}$$

$$m(Z) = 91.2 \text{ GeV}, \quad \Gamma(W) = 2.5 \text{ GeV} \Rightarrow \tau = 3 \cdot 10^{-25} \text{ s} \Leftrightarrow 10^{-14} \text{ cm}$$

$$m(W) = 80.4 \text{ GeV}, \quad \Gamma(W) = 2.1 \text{ GeV} \Rightarrow \tau = 3 \cdot 10^{-25} \text{ s} \Leftrightarrow 10^{-14} \text{ cm}$$

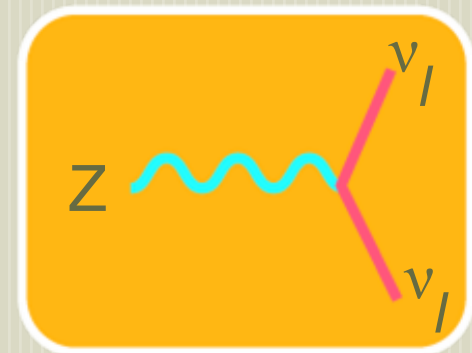
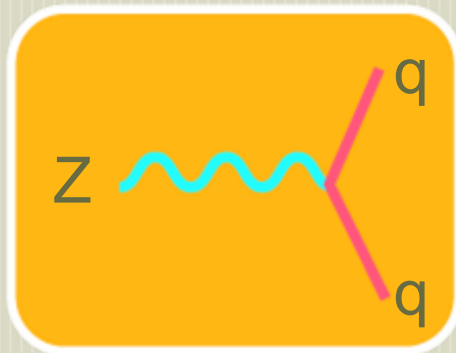
Ejemplo: contar el número de neutrinos

$\tau \propto 1/(\text{número de agujeros}) \sim 1/(\text{número de canales de decaimiento})$

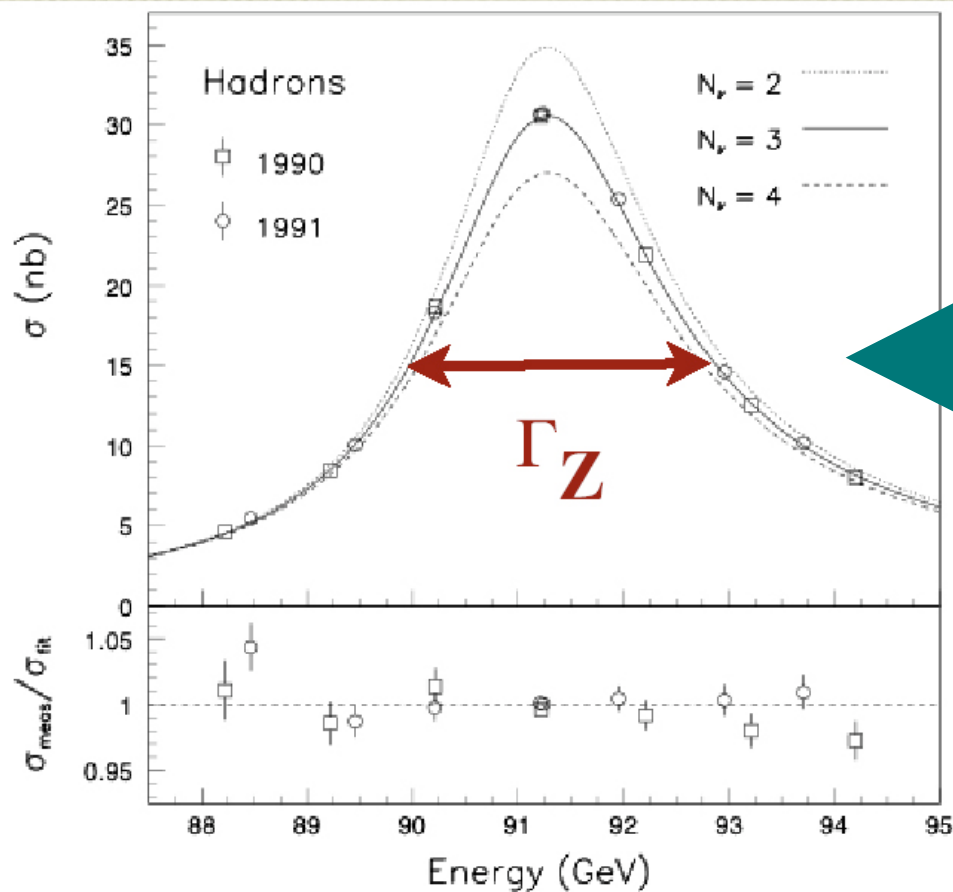


$\tau(Z) \propto \text{número de canales de decaimiento}$

$$\Gamma(Z) = \sum_{q \setminus m_q < m_Z/2} \Gamma(Z \rightarrow q\bar{q}) + \sum_{\ell \setminus m_\ell < m_Z/2} \Gamma(Z \rightarrow \ell^+\ell^-) + \sum_{\nu \setminus m_\nu < m_Z/2} \Gamma(Z \rightarrow \nu\bar{\nu})$$



$$N_{\text{eventos}} (e^+e^- \rightarrow Z^0) \propto [(S - M_Z^2)^2 + M_Z^2 \Gamma_Z^2]^{-1}$$



$$\sqrt{S} = \text{Energía}(e^+ e^-)$$

datos de LEP $e^+ e^- \rightarrow Z^0$
mostrando que el número
de especies neutrino $N_V=3$

¡La medición de la amplitud nos
puede decir algo acerca de lo
que no se observa
directamente!

En general, la medición de la amplitud nos dará la fuerza del acoplamiento de la partícula que decae en los productos del decaimiento. La amplitud (tiempo de vida) en sí misma no es, por tanto, una propiedad fundamental de una partícula, pero es una consecuencia de su masa y de sus acoplamientos.

Los tiempos de vida más cortos que 10^{-21} seg. dan lugar a amplitudes del orden de unos cuantos MeV, lo cual puede ser medido experimentalmente a través de la forma del **índice de producción**

Una partícula inestable viajando con velocidad v viajará a una distancia equivalente a $\tau = L/v\gamma$ antes de decaer, donde:

$$\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}: \text{dilatación del tiempo de Lorentz}$$

Con $v \sim c = 3 \times 10^{10}$ cm/s y un L medible del orden de un mm, un factor de dilatación del orden de 10 permite una medición de **tiempos de vida más larga que 10^{-12} seg**

Por alguna elección bizarra de la Naturaleza, prácticamente no hay partículas con tiempos de vida en el rango de $10^{-12} - 10^{-21}$ seg., es decir ¡en el rango en el cual no podríamos medirlos!

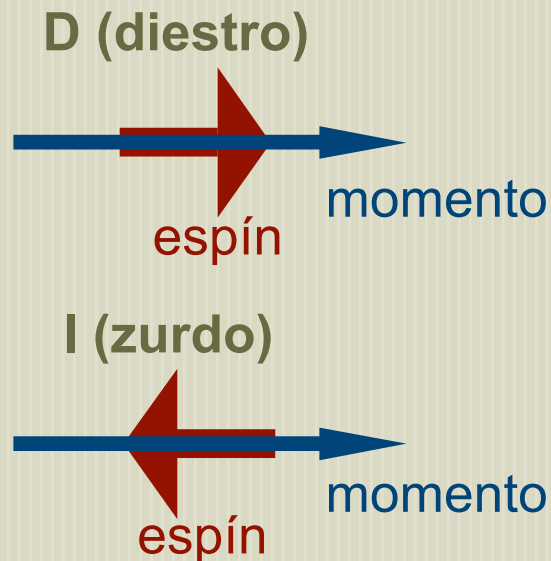
la única remarcable excepción es el pión neutro, π^0 , cuyo tiempo de vida fue medido por J. Steinberger

Algunos puntos importantes sobre las cantidades fundamentales

- La mecánica cuántica y la relatividad requieren que la masa, la carga y el espín sean las únicas propiedades fundamentales de una partícula elemental. No obstante, no pueden disponer sus valores de un modo único
- Los principios de simetría proveen ciertas restricciones:
 - Conservación de la carga $\Rightarrow M(\text{fotón})=0$
 - Conservación de **chirality** $\Rightarrow M(\text{neutrino})=0$

Pero a veces las simetrías se rompen, y las restricciones pierden:

Ejemplo:



Si $m=0$, los estados L y D de una partícula no interactúan entre ellos, y pueden tener propiedades (por ejemplo, simetrías y cargas) diferentes. Si $m \neq 0$, L y D están inevitablemente mezclados, y las simetrías independientes para los dos estados no están permitidas.

Ejemplos de preguntas abiertas

- ¿Por qué hay fuerzas asociadas a partículas vectoriales, con interacciones definidas por principios de simetría?
- ¿Por qué $m(\text{top}) \sim 10^8 m(e)$?
- ¿Por qué $m(\text{neutrino}) \sim 10^{-9} m(e)$?
- ¿Por qué tres familias de quarks y leptones?
- Por qué $F_{\text{gravedad}} \sim 10^{-40} F_{\text{eléctrico}}$?
- ¿Son las partículas realmente **puntuales**? ¿Cuerdas?
¿Membranas?
- ¿Por qué **$D=3+1$** ?
- ¿Es la **gravedad** consistente con la mecánica cuántica?
- ¿Cómo sucedió realmente el **Big Bang**?
- Etc, etc, etc...