

Interacción de neutrones con la materia

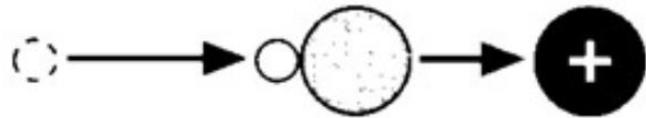
Laura C. Damonte

2024

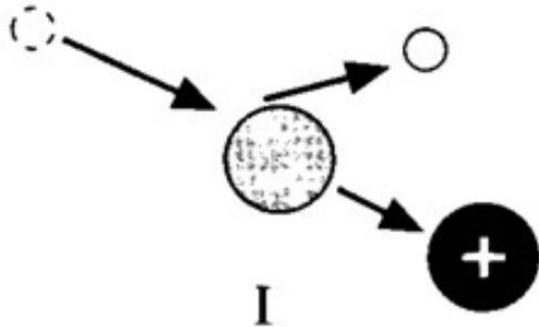
Interacción de neutrones con la materia

- ✓ Descubierta experimentalmente por Chadwick en 1932.
- ✓ La interacción de los neutrones con la materia tiene interés tanto experimental y teórico como también por sus aplicaciones, en particular en la operación de reactores.
- ✓ Desde 1980, terapia por haces de neutrones. Muy costoso.
- ✓ El neutrón carece de carga eléctrica  no está sujeto a interacciones coulombianas.
- ✓ Las interacciones entre neutrones y núcleos se dividen en dos grandes grupos: interacciones de *dispersión* y *absorción*.

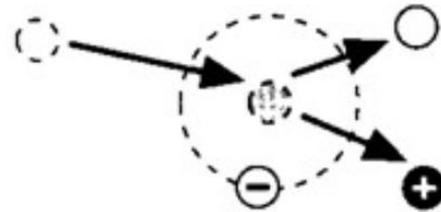
Interacción de los neutrones con la materia



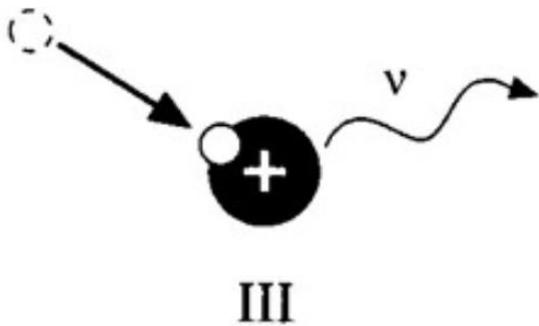
materia



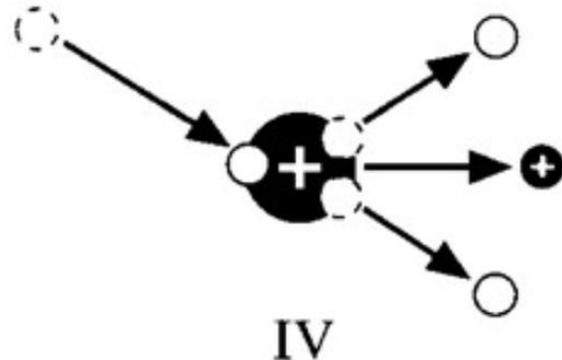
I
Colisión elástica.



II
Colisión elástica con el núcleo de un átomo de hidrógeno.



III
Captura radiactiva.



IV
Transmutación.

Dispersión

Absorción

Neutrones

- Al carecer de carga eléctrica, no producen directamente *ionizaciones* ni *radiación de frenado*
- Las interacciones entre neutrones y núcleos se dividen en dos grandes grupos: interacciones de *dispersión* y *absorción*.
- *Dispersión*: resultado de la interacción es el intercambio de energía entre las partículas que colisionan, permaneciendo libre el neutrón luego del proceso.
- *Absorción*: el neutrón es retenido en el núcleo formándose una nueva partícula.

Estructura de quarks del neutrón



Clasificación

Dado que las interacciones que sufren los neutrones dependen de su energía:

Nomenclatura	Energía
Neutrones de alta energía	$\approx 100\text{MeV}$
Neutrones rápidos	10 MeV-100keV
Neutrones epitérmicos	100keV – 0.1keV
Neutrones térmicos o lentos	1/40 eV
Neutrones fríos o ultra fríos	meV- μeV

Características

- ✓ Al igual que la radiación gamma son capaces de atravesar grandes espesores de material. ($r_N=10^{-13}\text{cm}$)
- ✓ Si un neutrón colisiona con un núcleo atómico y sus masas son muy parecidas, entonces el neutrón pierde una gran cantidad de energía. Mayor será la pérdida de energía mientras más se asemejen sus masas.
- ✓ Los neutrones se pueden desintegrar, formando un protón y un electrón, o bien pueden ser absorbidos por los núcleos de los átomos circundantes, dando lugar a reacciones nucleares, como por ejemplo la fisión nuclear.

Dispersión

- ✓ La principal interacción es a través de colisiones nucleares: choques elásticos e inelásticos.
- ✓ La dispersión elástica ocurre para neutrones con energías menores a 0,1 MeV:

$A(n,n)A$ sólo cambio de E_c

- ✓ En dispersiones inelásticas, los núcleos quedan en un estado excitado, se necesitan energías mayores a 1 MeV:

$A(n,n')A^*$ $A(n,2n')B$, etc

Dispersión elástica

- ✓ Para una dispersión elástica la única condición es que satisfaga el principio de conservación de la energía cinética sin limitaciones en la distribución de energía entre el neutrón y el Núcleo.
- ✓ Hay dos alternativas para este tipo de reacción: la formación o no del núcleo compuesto.
- ✓ En ambos casos el núcleo bombardeado permanece en su estado fundamental y todo el proceso puede analizarse como la interacción de dos partículas clásicas donde se conserva la energía y la cantidad de movimiento.
- ✓ La velocidad de los neutrones se reduce gradualmente luego de sucesivas colisiones elásticas. Su energía cinética media se hace aproximadamente igual a la de los átomos del medio dispersante, que depende de la temperatura, y se llama energía térmica.



Termalización

Moderación de Neutrones

- ✓ Los materiales más efectivos para frenar los neutrones hasta energías térmicas son los compuestos por un gran número de átomos de bajo peso atómico, como el hidrógeno.
- ✓ Estos materiales se llaman moderadores y serán más efectivos cuanto menor sea su sección eficaz de captura para los neutrones.
- ✓ Cuanto más livianos sean los átomos del moderador, mayor energía les será transferida por los neutrones por interacción y menor será el número de choques necesarios para termalizar los neutrones.
- ✓ Materiales para moderadores y blindaje: parafina, agua, etc
- ✓ Neutrones de 1MeV necesitan 111 colisiones en carbono 12 y 17.5 en H, para reducir su energía en 1/40 eV.

Dispersión inelástica

- ✓ Un neutrón rápido experimenta dispersión inelástica, en una primera etapa es absorbido por el núcleo  el núcleo compuesto excitado.
- ✓ Luego es emitido un neutrón de energía cinética menor, quedando el blanco en un estado excitado  emite uno o varios fotones, *rayos de dispersión inelástica*.
- ✓ La energía del neutrón incidente debe ser mayor que la energía del primer nivel excitado.
- ✓ Para elementos de número de masa medio alto, la energía mínima de excitación es del orden de 0,1 MeV. Al disminuir la masa, se aumenta la energía de excitación, por ejemplo, unos 6 MeV para el oxígeno.
- ✓ La probabilidad de que tenga lugar dispersión inelástica aumenta con la energía en comparación con la probabilidad de captura radiactiva u otras alternativas posteriores a la absorción del neutrón incidente.

Captura radiactiva

✓ Son las reacciones del tipo (n,γ) :



✓ Se producen cuando el núcleo absorbe el neutrón y se forma un núcleo compuesto que queda excitado.

✓ El núcleo excitado emite el excedente de energía en forma de radiación gamma. El núcleo resultante puede ser radiactivo o no. (estabilidad alterada por A/Z .)

✓ Todos los átomos, del Hidrógeno (H) al Uranio (U), exhiben captura radiactiva.

✓ Otras reacciones: (n,p) ; (n,d) ; (n,α) ; etc

✓ En los materiales fisibles este proceso es competitivo con el de fisión.

Atenuación de neutrones en la materia

✓ El proceso de atenuación de un haz de neutrones por la materia

$$N = N_0 e^{-x/\lambda}$$

Donde , $1/\lambda = N\sigma_{\text{tot}}$

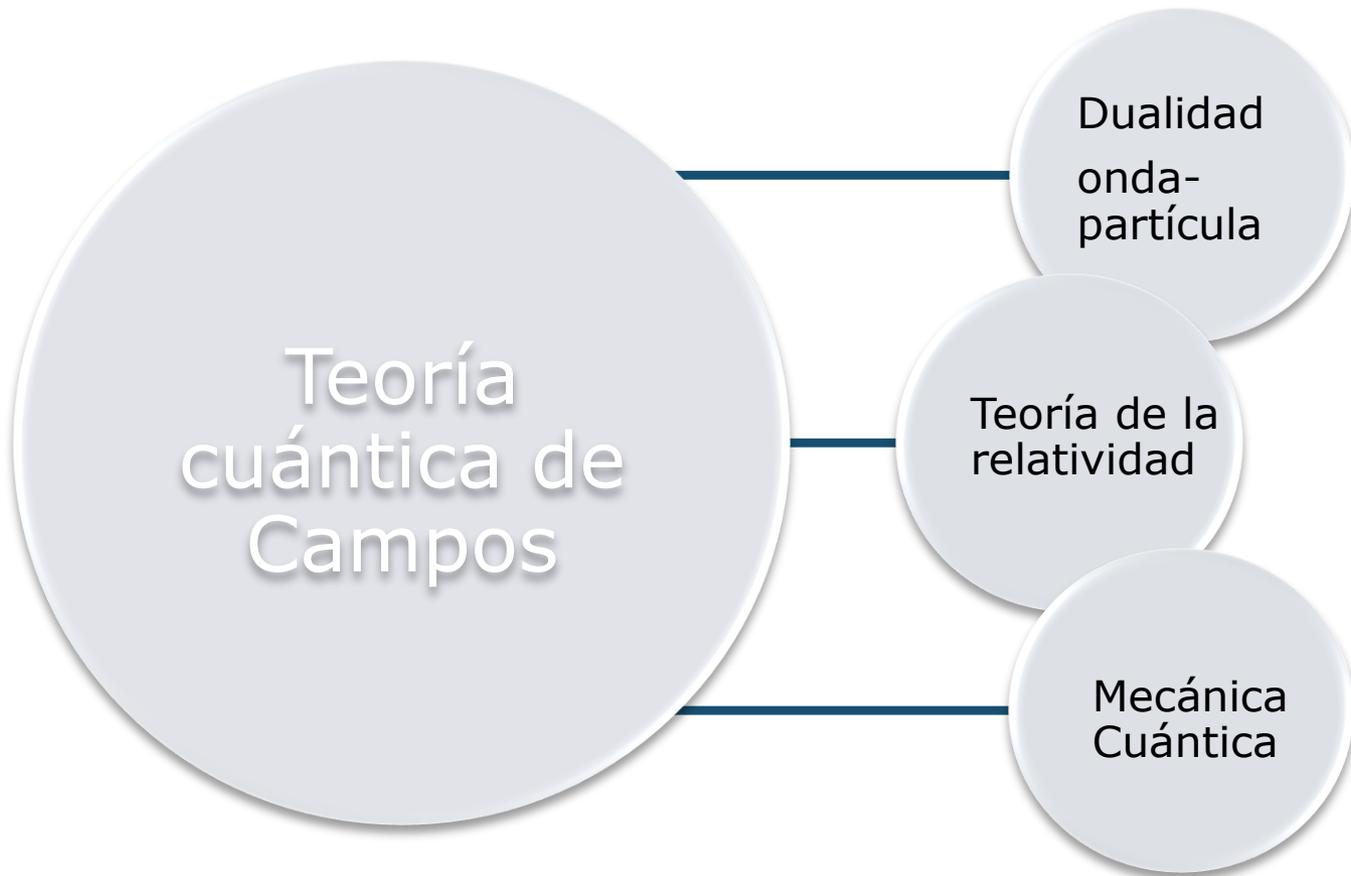
la sección eficaz microscópica, es la suma de las secciones eficaces microscópicas de los distintos procesos que pueden tener lugar.

Para el caso de los neutrones:

$$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_{\text{elas}} + \sigma_{\text{inel}} + \sigma_{\text{fis}}$$

Esta ecuación es válida para un haz colimado de neutrones

Las secciones eficaces son función de la energía del neutrón y del tipo de núcleos del blanco.



Fuerzas elementales de la Naturaleza.

Campos son fundamentales y las partículas son conceptos derivados

Interacciones Fundamentales

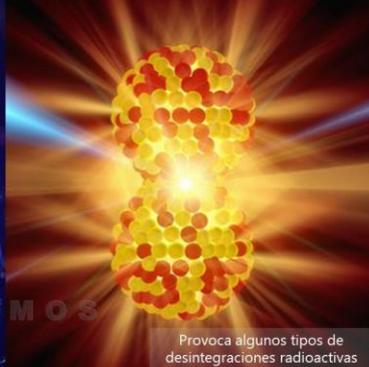
Las 4 interacciones fundamentales

Nuclear fuerte



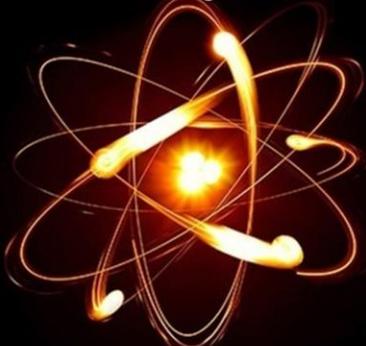
Mantiene unido protones y neutrones en el núcleo atómico

Nuclear débil



Provoca algunos tipos de desintegraciones radioactivas

Electromagnetismo



Mantiene unido al átomo y a las moléculas entre sí.

Gravedad



Afecta a todas las partículas y rige el movimiento de los astros

COSMOS
facebook.com/groups/cosmos

Fuerzas Fundamentales

		Intensidad Relativa	Alcance (m)	Partícula
Fuerte	<p>Fuerza que mantiene al núcleo unido</p>	10^{38}	10^{-15} Diámetro de un núcleo de tamaño mediano	Gluones
Electromagnética		10^{36}	∞ Infinito	Fotones
Débil	<p>La interacción de los neutrinos induce el decaimiento beta</p>	10^{25}	10^{-18} 0.1% del diámetro de un proton	Bosones W y Z
Gravitatoria		1	∞ Infinito	Gravitones (Hipotético)

Partícula	Masa
Neutrinos	$\sim 10^{-2}$ eV
Electrones	0,511 MeV
Muon	100 MeV
Pion	140 MeV
Protón, neutrón	1 GeV
Tau	2 GeV
Bosones W, Z	80-90 GeV
Boson Higgs	125 GeV

$$E = mc^2$$

Propiedades de las partículas

Fermiones:

- ✓ Estadística de Fermi-Dirac:

$$F(E) = \frac{1}{e^{(E-E_0)/kT} + 1}$$

E_0 depende de T de modo que $E_0 = E_f$ cuando $kT \ll E_f$

- ✓ Principio de exclusión de Pauli: funciones de onda de una partícula.
- ✓ Función de onda antisimétrica:

$$\varphi_{\alpha\beta} = -\varphi_{\beta\alpha}$$

- ✓ Momento angular intrínseco (spin s)
semientero: $1/2, 3/2, 5/2, \text{ etc}$

Propiedades de las partículas

Bosones:

- ✓ Estadística de Bose-Einstein:

$$B(E) = \frac{1}{e^{(E-E_0)/kT} - 1}$$

E_0 depende de T de modo que a altas temperaturas,

$$B(E) \approx P(E) = 1/\exp(E/kT),$$

distribución de probabilidad de Boltzmann.

- ✓ No satisfacen el Principio de exclusión de Pauli.
- ✓ Función de onda simétrica:

$$\varphi_{\alpha\beta} = \varphi_{\beta\alpha}$$

- ✓ Momento angular intrínseco (spin s) entero: 0, 1, 2, 3, etc

Tipos de interacción

La Física de partículas elementales describe el mundo en términos de fermiones elementales que interactúan a través de campos de los cuales constituyen la fuente.

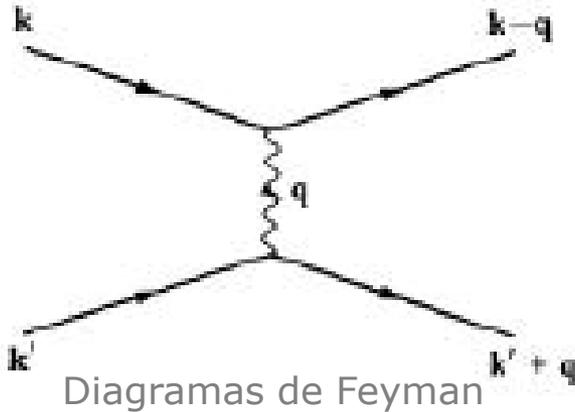
Las partículas asociadas con los campos de interacción son bosones.

Table 1.1. *Types of interaction field*

Interaction field	Boson	Spin
Gravitational field	'Gravitons' postulated	2
Weak field	W^+ , W^- , Z particles	1
Electromagnetic field	Photons	1
Strong field	'Gluons' postulated	1

Las interacciones electromagnética y débil

Ambas descritas por un potencial vector, \mathbf{A} , y un potencial escalar, ϕ ,



Dispersión entre electrones \Rightarrow fotones.

Los bosones que intervienen en la interacción débil tienen masa y los W^+ y W^- además poseen carga, Z es neutro más similar al fotón pero su masa es muy grande:

$$M_Z = (91.187 \pm 0.007) \text{ GeV}/c^2 \sim 100 \text{ proton masses.}$$

$$M_{W^+} = M_{W^-} = (80.41 \pm 0.10) \text{ GeV}/c^2.$$



Son importantes en la desintegración *beta*

Teoría electro-débil postulada por Weinberg y Salam existencia de estos bosones y confirmada en el CERN en 1983.

Algunos bosones son inestables: *vida media* y *periodo*.



$$P(t) = P(0)e^{-t/\tau}$$

Clasificación de los fermiones

fermiones { *leptones*: no son fuentes de campos fuertes, por lo que no participan en las interacciones fuertes.

{ *quarks*: participan en todas las interacciones

El electrón es un ejemplo de lepton.

Los quarks están confiados en sistemas compuestos que se extienden hasta 1fm. El término *hadrón* se refiere a sistemas de quarks. El protón y el neutrón, al igual que el mesón, son hadrones.

Leptones

Table 2.1. *Known leptons*

	Mass (MeV/c ²)	Mean life (s)	Charge
Electron e ⁻	0.5110	∞	-e
Electron neutrino ν _e	< 15 × 10 ⁻⁶	∞?	0
Muon μ ⁻	105.658	e ⁻ + e ⁺ → 2γ 2.197 × 10 ⁻⁶	-e
Muon neutrino ν _μ	< 0.17	e ⁻ + e ⁺ → 3γ ∞?	0
Tau τ ⁻	1777	290 × 10 ⁻¹⁵	-e
Tau neutrino ν _τ	< 18.2	∞?	0

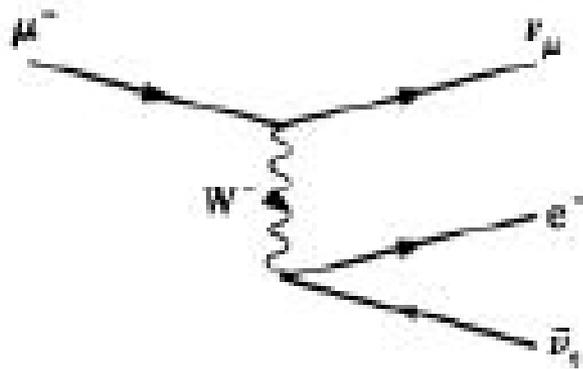
$$e^{-} + e^{+} \rightarrow 2\gamma$$

$$e^{-} + e^{+} \rightarrow 3\gamma.$$

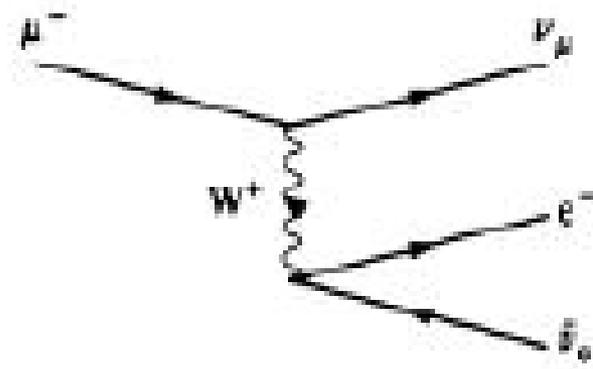
Inestabilidad de los leptones pesados

Decaimiento del muón:

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



(a)



(b)

Diagramas de Feynman

Modelo de quarks de nucleones

Un sistema con número de spin $1/2$ debe contener un número impar de fermiones constituyentes.

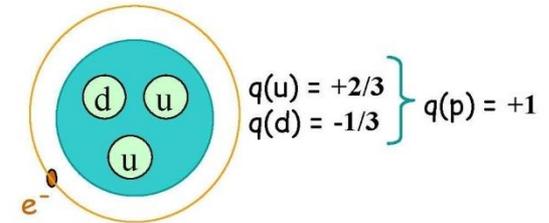
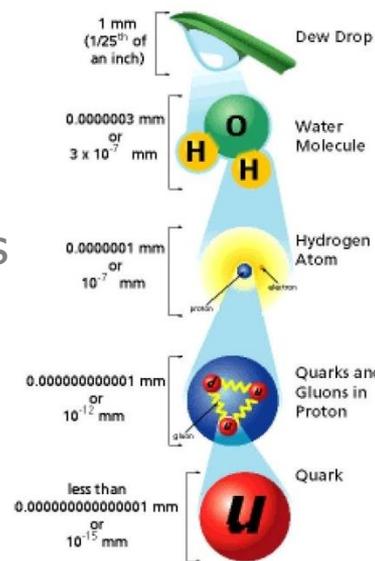
Este modelo postula que los nucleones poseen tres fermiones fundamentales denominados quarks.

Los quarks involucrados son el up (u) y down (d):

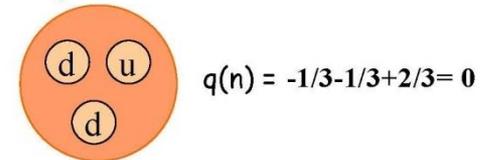
Protón: uud
Neutron: ddu

Estos quarks están ligados por el campo de interacción fuerte: *gluon*.

¿De qué está compuesto un protón?



...y un neutrón?



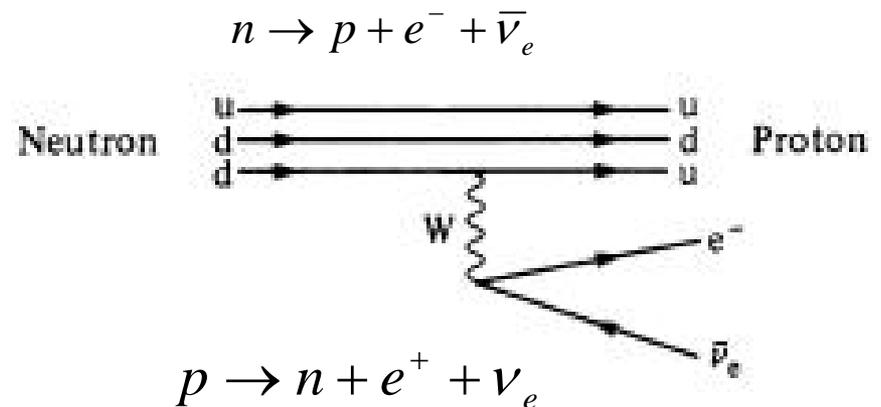
Materia ordinaria formada por partículas de 1ª generación (u, d, e, ν_e)

Los quarks

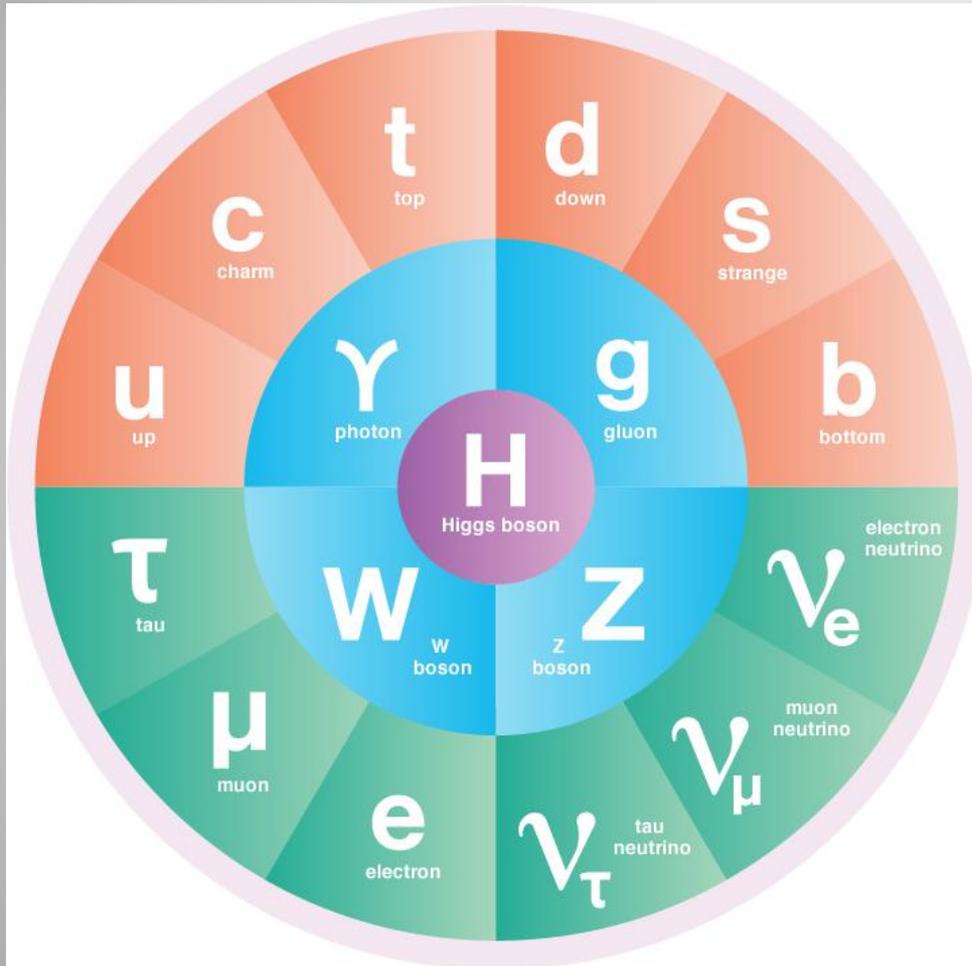
Table 3.1. *Properties of quarks*

Quark	Approximate mass	Electric charge (e)
Down d	$3\text{--}9 \text{ MeV}/c^2$	$-\frac{1}{3}$
Up u	$1.5\text{--}5 \text{ MeV}/c^2$	$\frac{2}{3}$
Strange s	$60\text{--}170 \text{ MeV}/c^2$	$-\frac{1}{3}$
Charm c	$1.1\text{--}1.4 \text{ GeV}/c^2$	$\frac{2}{3}$
Bottom b	$4.1\text{--}4.4 \text{ GeV}/c^2$	$-\frac{1}{3}$
Top t	$174 \text{ GeV}/c^2$	$\frac{2}{3}$

La interacción débil interviene en la desintegración β , decaimiento de muones. Los protones en el espacio libre son estables, el neutrón no. Su vida media es $886.7 \text{ s} \sim 15 \text{ min}$.



El Modelo Standard



Las interacciones electromagnética, débil y fuerte entre leptones y quarks se combinan en la construcción teórica denominada *Modelo Standard* de la Física de Partículas.

<http://www.symmetrymagazine.org/standard-model/>

Bibliografía:

- An Introduction to Nuclear Physics, W.N.Cottingham and D.A.Greenwood, Cambridge University Press (2004).
- <http://www.damtp.cam.ac.uk/user/tong/qft/qft.pdf>

Partículas y antipartículas

- Las partículas no son indestructibles, pueden crearse y destruirse.
- Nucleos de Au, cada uno 197 nucleons
- La explosion resultante contiene 10000 partículas

Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) at Brookhaven, Long Island

