


LOS QUARKS COMPONENTES BÁSICOS DE LA MATERIA

Física

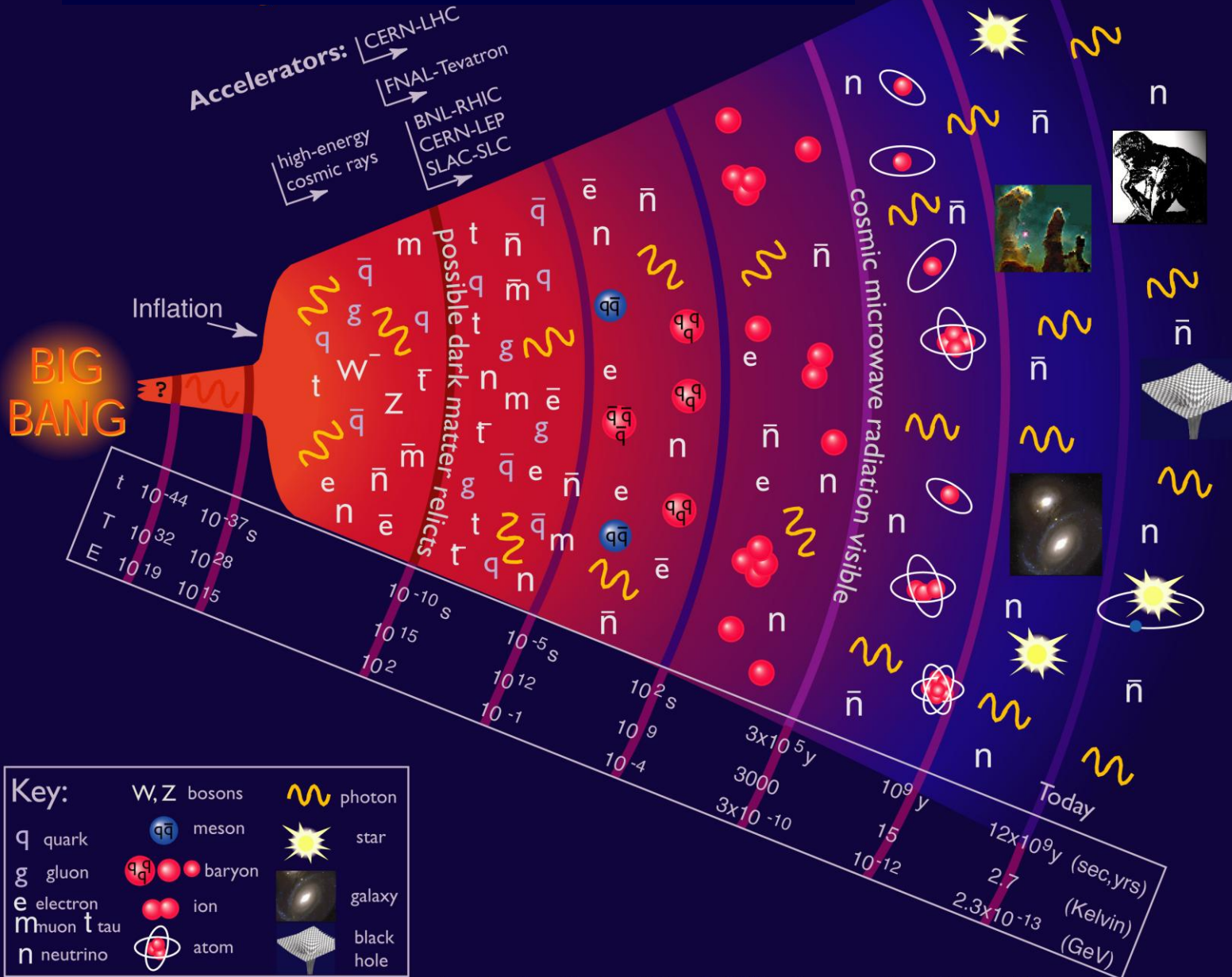
Este material de autoestudio fue creado en el año 2007 para la asignatura Física del programa Ingeniería Electromecánica y ha sido autorizada su publicación por el (los) autor (es), en el Banco de Objetos Institucional de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.



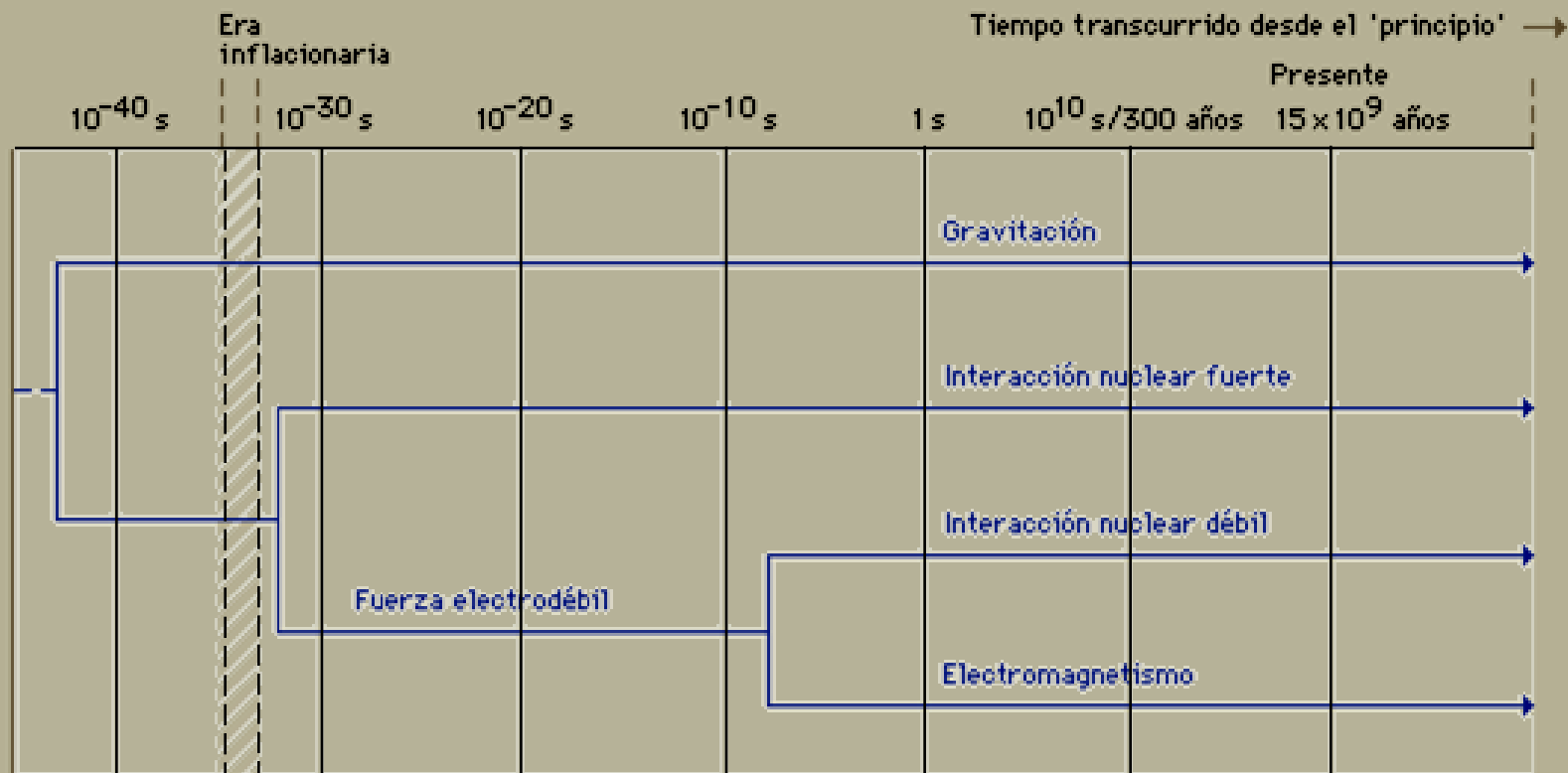


LOS QUARKS
COMPONENTES BÁSICOS
DE LA MATERIA

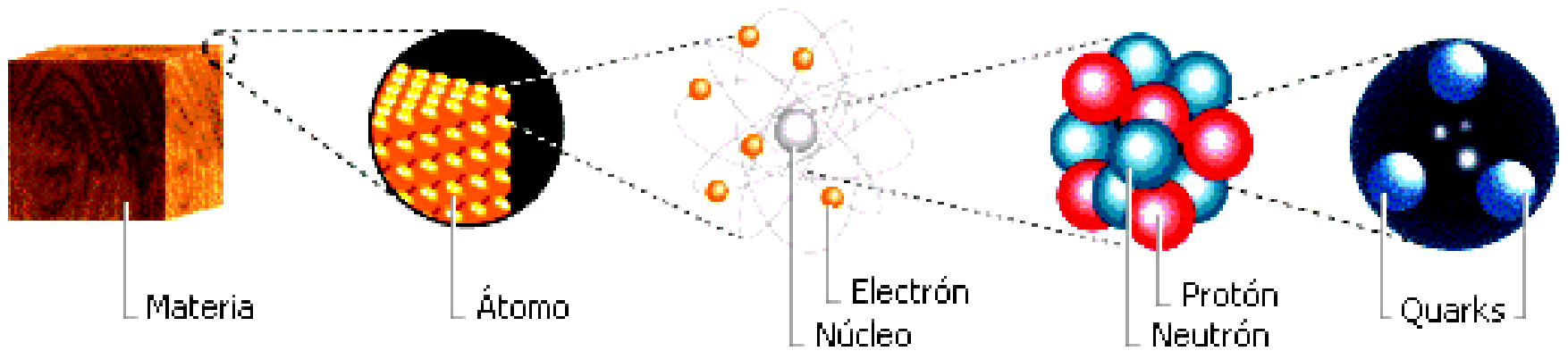
Historia del Universo



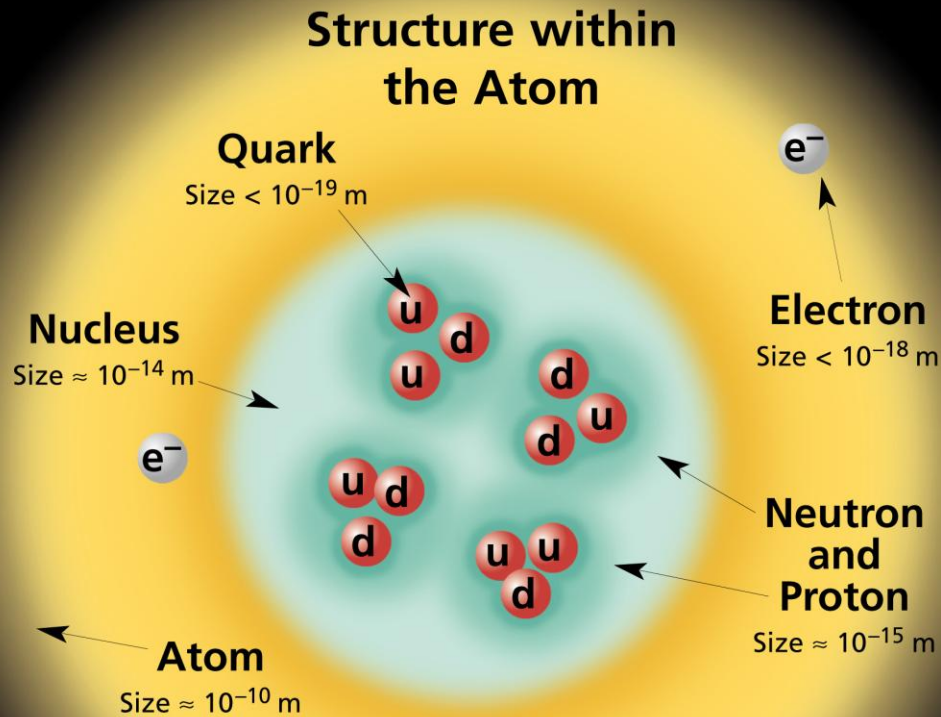
Nacimiento de las Fuerzas Fundamentales



Constituyentes de la Materia



Estructura dentro del Átomo



If the protons and neutrons in this picture were 10 cm across, then the quarks and electrons would be less than 0.1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.

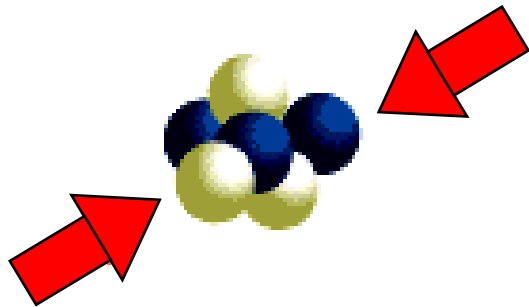
Quarks y Leptones



Fuerzas Fundamentales

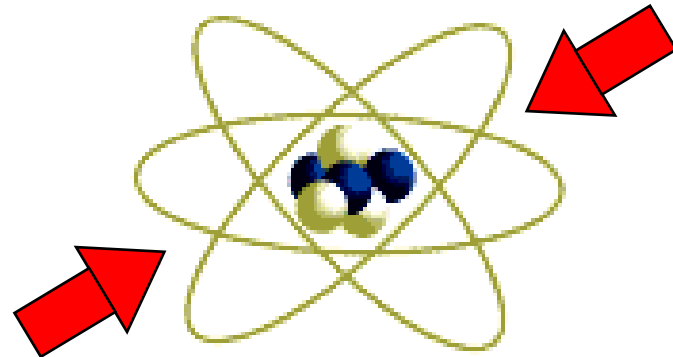
FUERZA NUCLEAR FUERTE

Partícula de intercambio: gluón
Acción: mantiene unido el núcleo atómico



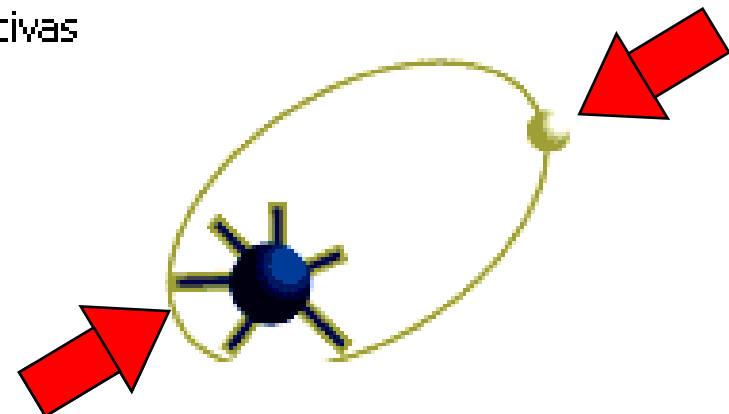
FUERZA ELECTROMAGNÉTICA

Partícula de intercambio: fotón
Acción: mantiene el átomo unido



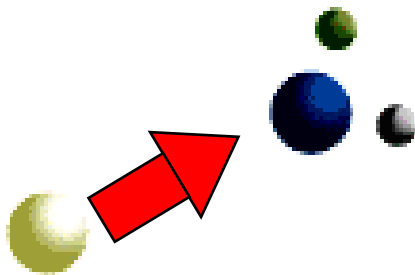
FUERZA GRAVITATORIA

Partícula de intercambio: gravitón
Acción: rige el movimiento de los planetas

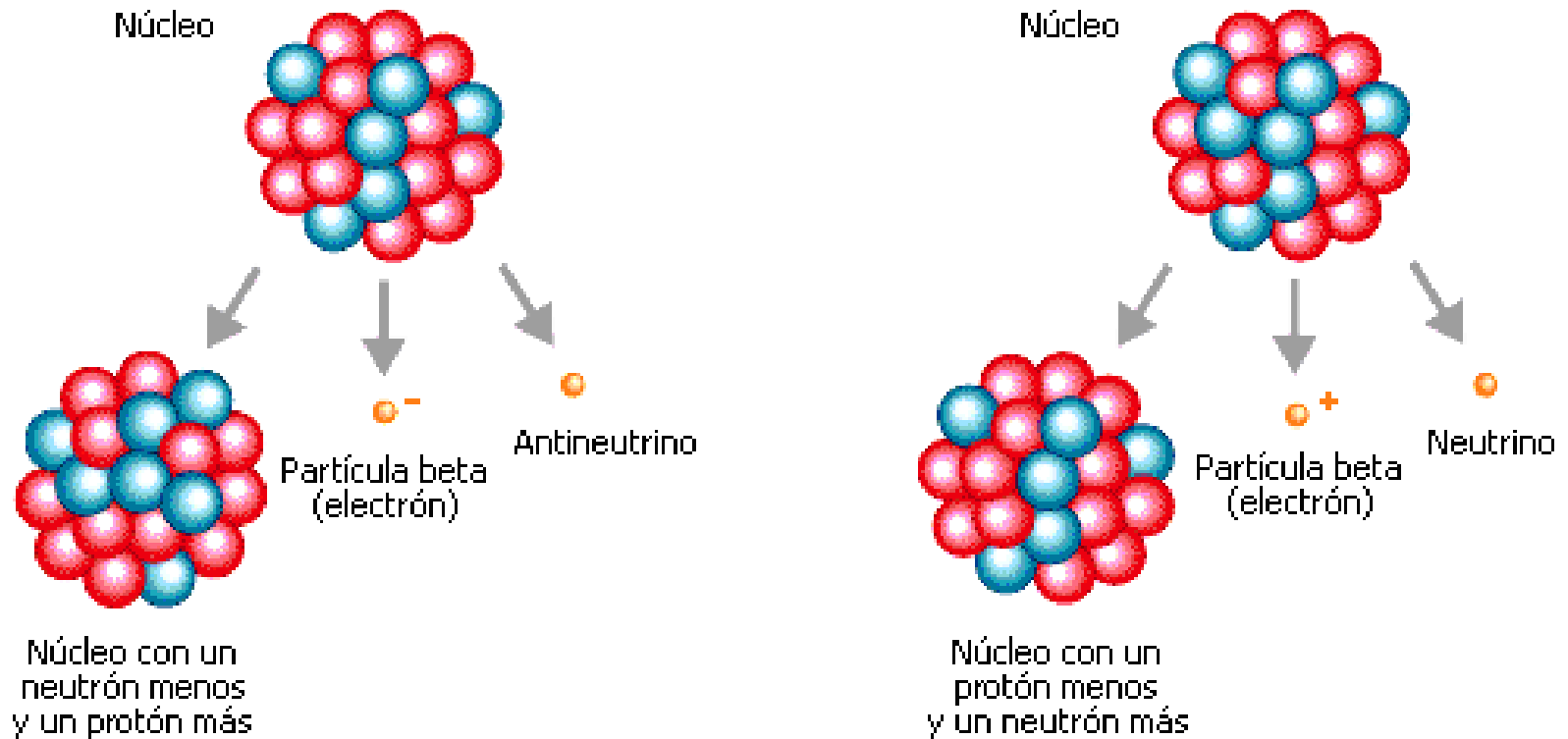


FUERZA NUCLEAR DÉBIL

Partícula de intercambio: partículas W^{\pm} y Z^0
Acción: provoca desintegraciones radiactivas



Desintegración Beta



Neutrón



Protón



Partícula beta, Antineutrino, Neutrino

Propiedades de las Interacciones

Property	Interaction	Gravitational	Weak	Electromagnetic	Strong	
			(Electroweak)		Fundamental	Residual
Acts on:		Mass – Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge	See Residual Strong Interaction Note
Particles experiencing:		All	Quarks, Leptons	Electrically charged	Quarks, Gluons	Hadrons
Particles mediating:		Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	γ	Gluons	Mesons
Strength relative to electromag for two u quarks at:	$\left\{ \begin{array}{l} 10^{-18} \text{ m} \\ 3 \times 10^{-17} \text{ m} \end{array} \right.$	10^{-41}	0.8	1	25	Not applicable to quarks
		10^{-41}	10^{-4}	1	60	
		for two protons in nucleus	10^{-36}	10^{-7}	1	Not applicable to hadrons

Principales Partículas Elementales

HADRONES Y LEPTONES

Hadrones (partículas nucleares)

Bariones (protones, neutrones, hiperones)

Antibariones

Mesones (piones, kaones...)

Leptones (partículas extranucleares)

Electrones

Neutrinos

Muones

Quarks
(probablemente 6 tipos:
up, down, strange,
charm, bottom, top)
Antiquarks

PARTÍCULAS DE INTERCAMBIO

Fotones (γ)

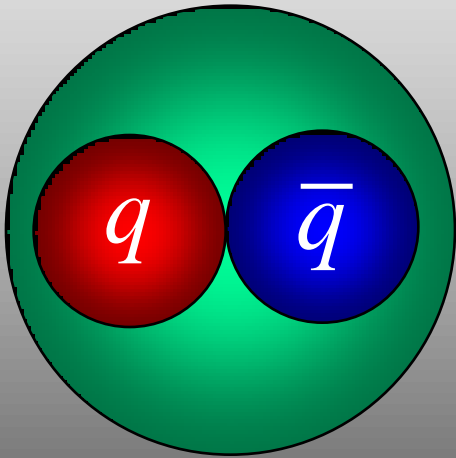
Gravitones*

Gluones (g)

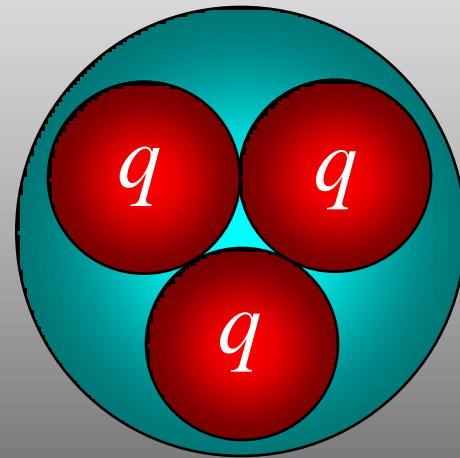
Bosones vectoriales intermedios (W^\pm, Z)

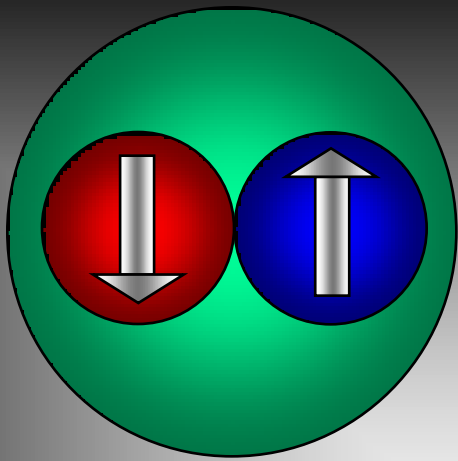
Hadrones

Mesones

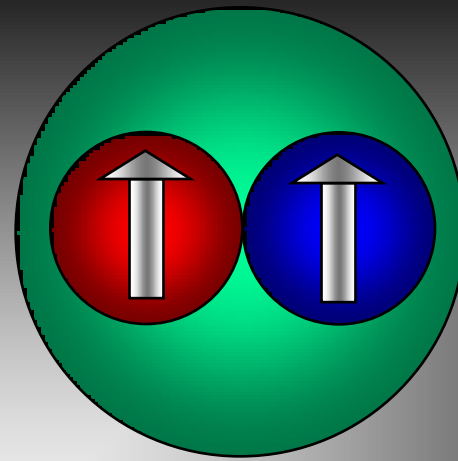


Bariones

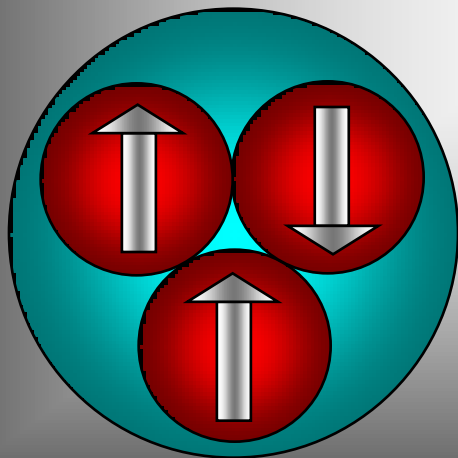




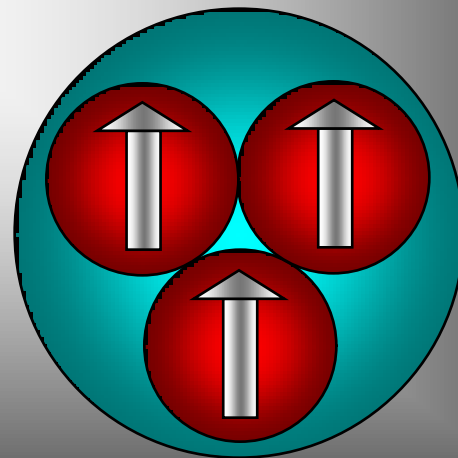
π



ρ

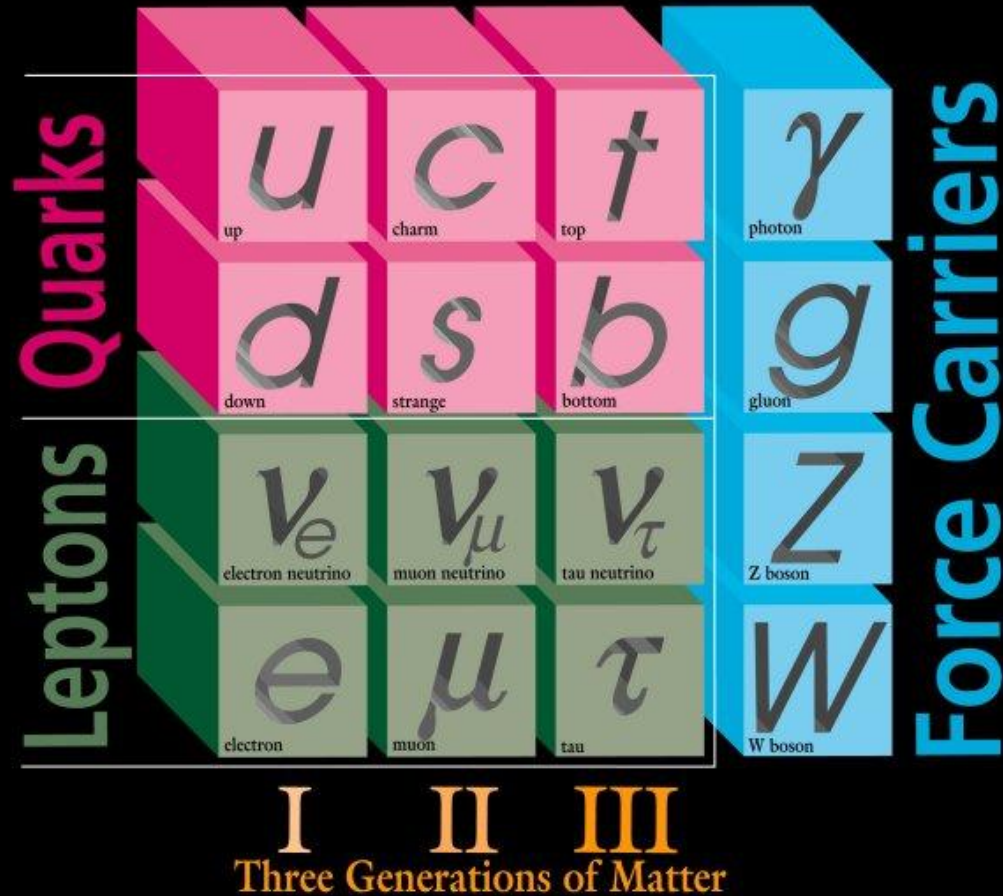


n



Δ

Generaciones de Partículas



Fermiones

Constituyentes de la Materia de Espín = 1/2, 3/2, 5/2 ...

Leptons spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1 \times 10^{-8}$	0
e electron	0.000511	-1
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0
μ muon	0.106	-1
ν_τ tau neutrino	<0.02	0
τ tau	1.7771	-1

Quarks spin = 1/2		
Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
u up	0.003	2/3
d down	0.006	-1/3
c charm	1.3	2/3
s strange	0.1	-1/3
t top	175	2/3
b bottom	4.3	-1/3

Mesones $q\bar{q}$

Mesons are bosonic hadrons.
There are about 140 types of mesons.

Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c ²	Spin
π^+	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
K^-	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0
ρ^+	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1
B^0	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
η_c	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0

Bariones qqq y Antibariones $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$

Baryons are fermionic hadrons.
There are about 120 types of baryons.

Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c^2	Spin
p	proton	uud	1	0.938	1/2
\bar{p}	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
n	neutron	udd	0	0.940	1/2
Λ	lambda	uds	0	1.116	1/2
Ω^-	omega	sss	-1	1.672	3/2

Simetrías y Leyes de Conservación

Teorema de Noether

*“For every fundamental symmetry
there is a conserved quantity”*

Si una acción es invariante bajo algún grupo de transformaciones (simetrías), existen una o más cantidades conservadas (constantes de movimiento) las cuales están asociadas con tales transformaciones.



Emmly Noether
(1882-1935)

SIMETRÍAS ⇒ LEYES DE CONSERVACIÓN

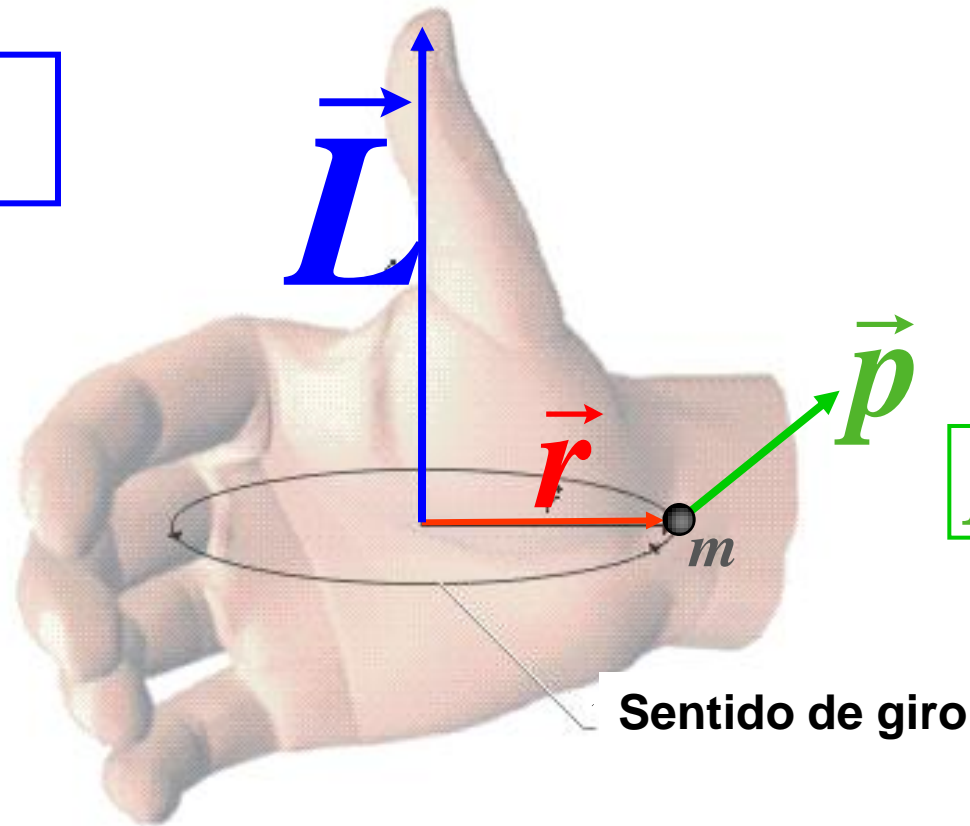
Grupos de Simetría

- **Generadores del Grupo** → *Magnitudes observables que se conservan.*
- **Elementos del Grupo** → *Transformaciones que dejan invariante el Hamiltoniano (o el Lagrangiano).*
- **Representaciones Irreducibles** → *Estados con la misma energía.*

GRUPO	TEORÍA
$U(1)_{EM}$	<i>Electrodinámica Cuántica (QED)</i>
$SU(3)_C$	<i>Cromodinámica Cuántica (QCD)</i>
$SU(2)_L \times U(1)_Y$	<i>Electrodébil</i>
$SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$	<i>Modelo Estándar</i>

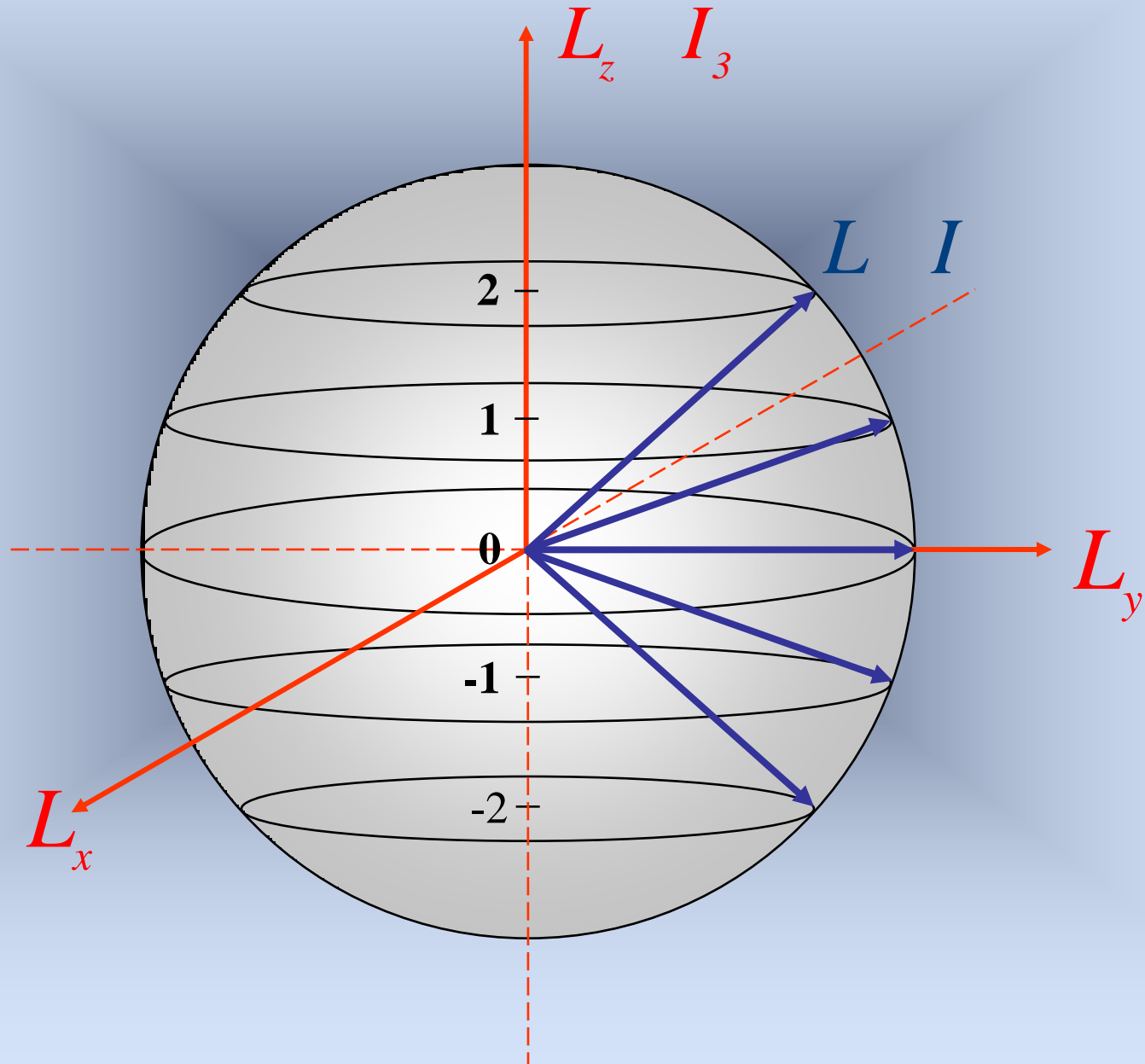
Momento Angular

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$$

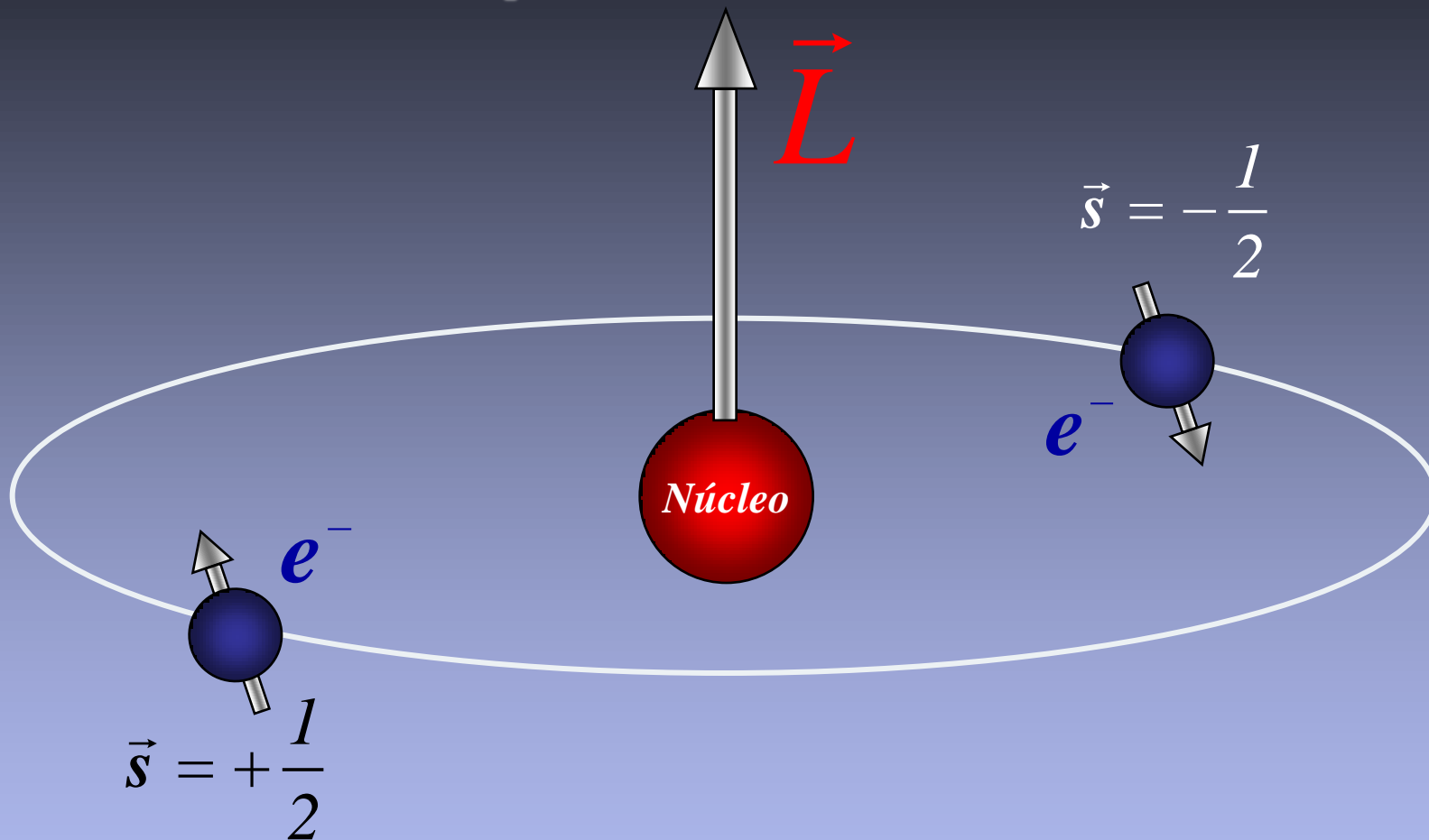


$$\vec{p} = m\vec{v}$$

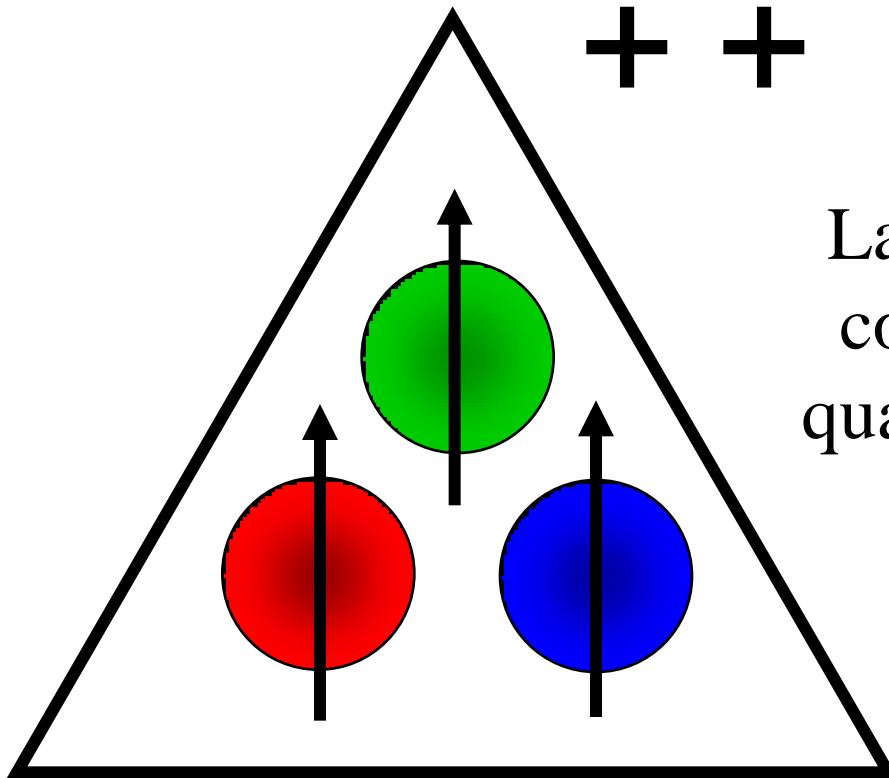
Estados del Momento Angular



Principio de Exclusión



Carga de Color



La partícula uud está compuesta por tres quarks u, con espines paralelos

Operadores en Mecánica Cuántica

Variable	Variable Clásica	Operador Mecánico Cuántico
Posición	\vec{r}	\hat{r}
Momento	$\vec{p} = m\vec{v}$	$\hat{p} = -i\hbar\vec{\nabla}$
Energía Cinética	$\frac{p^2}{2m}$	$\frac{\hat{p}^2}{2m} = -\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2$
Energía Total	$\frac{p^2}{2m} + V(r)$	$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V(r)$

Transformaciones

Si un sistema físico permanece invariante bajo una transformación

$$\psi \rightarrow \psi' = \hat{U}\psi$$

Para que la norma de la función se conserve

$$\langle \psi | \psi \rangle = \langle \psi' | \psi' \rangle = \langle \hat{U}\psi | \hat{U}\psi \rangle = \langle \psi | \hat{U}^\dagger \hat{U} | \psi \rangle$$

Se requiere que

$$\hat{U}\hat{U}^\dagger = 1$$

Es decir \hat{U} es **unitaria** $\det \hat{U} = 1$

La conservación de la invarianza requiere además que la transformación conmute con el operador de energía (Hamiltoniano)

$$\langle \psi | \hat{H} | \psi \rangle = \langle \psi' | \hat{H} | \psi' \rangle = \langle \psi | \hat{U}^\dagger \hat{H} \hat{U} | \psi \rangle$$

$$\hat{U}^\dagger \hat{H} \hat{U} = \hat{H}$$

Multiplicando a izquierda por \hat{U}

$$\hat{U} \hat{U}^\dagger \hat{H} \hat{U} = \hat{U} \hat{H}$$

$$\hat{H} \hat{U} = \hat{U} \hat{H}$$

$$\hat{H} \hat{U} - \hat{U} \hat{H} = 0$$

Conmutador \rightarrow

$$[\hat{H}, \hat{U}] = 0$$

Si ahora \hat{U} es una transformación infinitesimal
(con ε muy pequeño)

$$\hat{U} = 1 + i\varepsilon\hat{G}$$

en donde \hat{G} es el generador de la transformación.

$$\hat{U}\hat{U}^\dagger = (1 + i\varepsilon\hat{G})(1 - i\varepsilon\hat{G}^\dagger) = 1 + i\varepsilon(\hat{G} - \hat{G}^\dagger) + O(\varepsilon^2)$$

De la condición

$$\hat{U}\hat{U}^\dagger = 1$$

con una aproximación a primer orden

$$1 = 1 + i\varepsilon(\hat{G} - \hat{G}^\dagger)$$

$$\hat{G} - \hat{G}^\dagger = 0$$

$$\hat{G} = \hat{G}^\dagger$$

se dice entonces que \hat{G} es un operador hermítico.

Ahora bien como

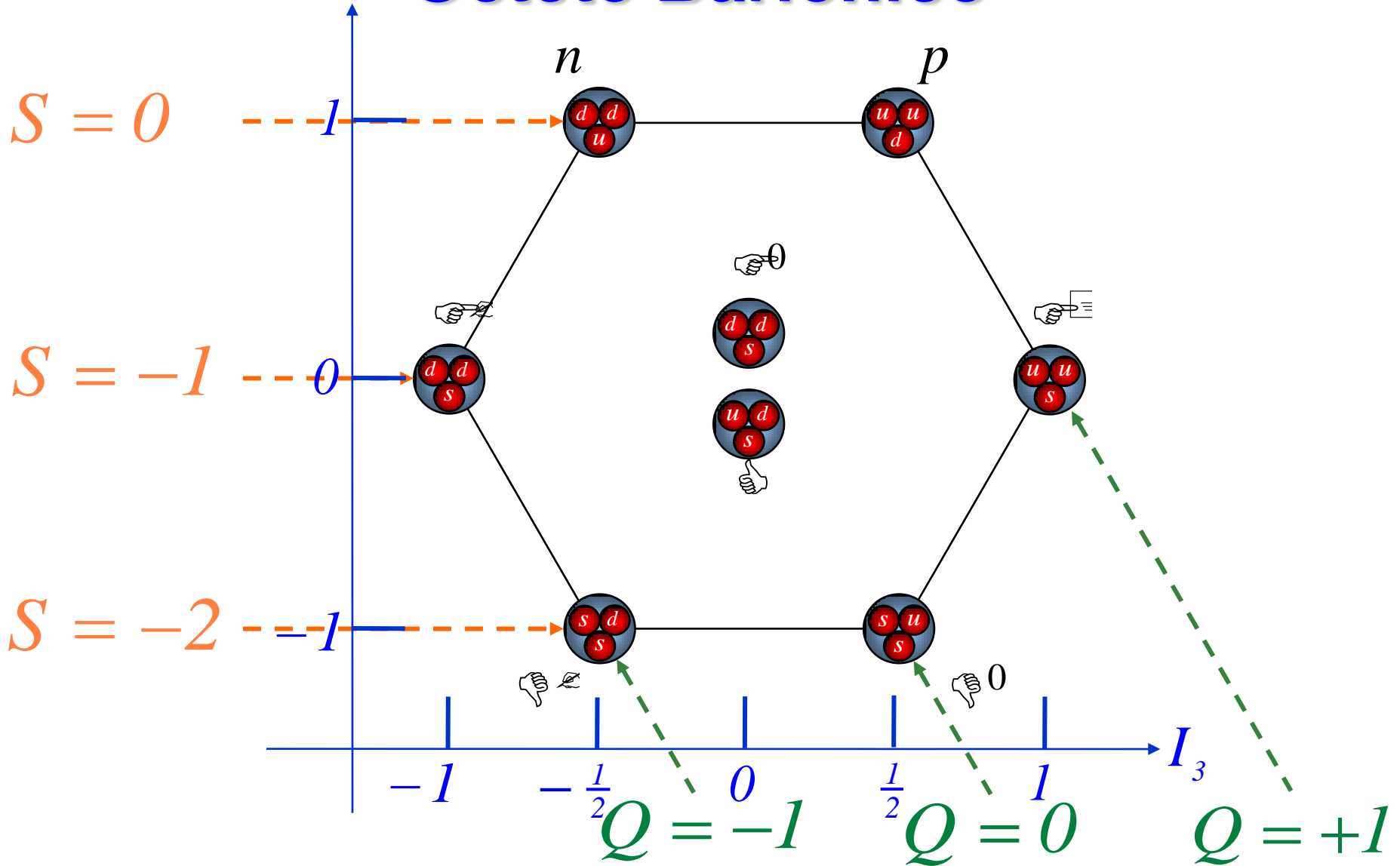
$$[\hat{H}\hat{U}] = 0$$

$$[\hat{H}\hat{U}] = \left[\hat{H} \quad 1 + i\varepsilon\hat{G} \quad - \quad 1 + i\varepsilon\hat{G} \quad \hat{H} \right] = i\varepsilon \hat{H}\hat{G} - \hat{G}\hat{H}$$

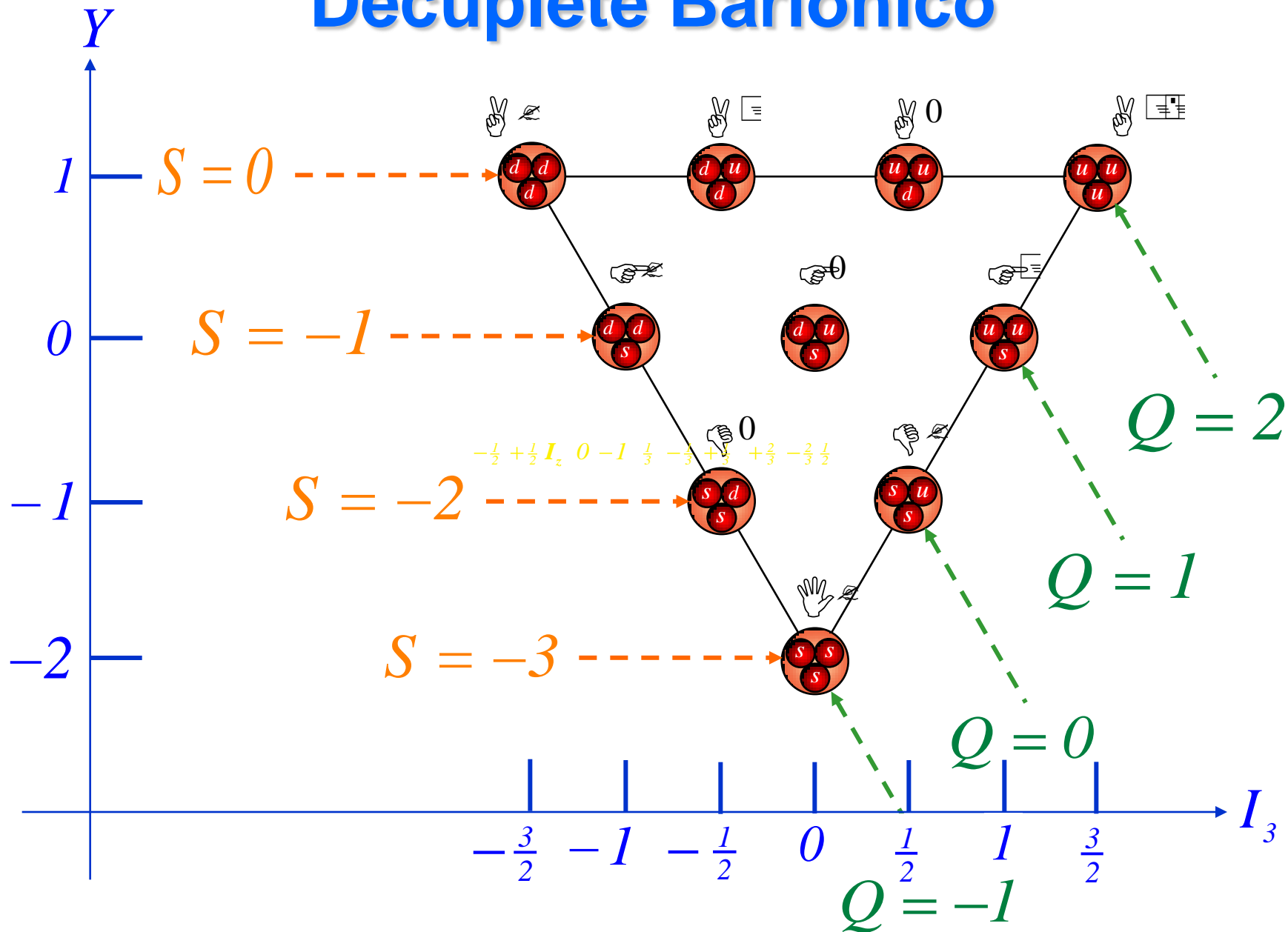
$$\hat{H}\hat{G} - \hat{G}\hat{H} = 0$$

$$[\hat{H}, \hat{G}] = 0$$

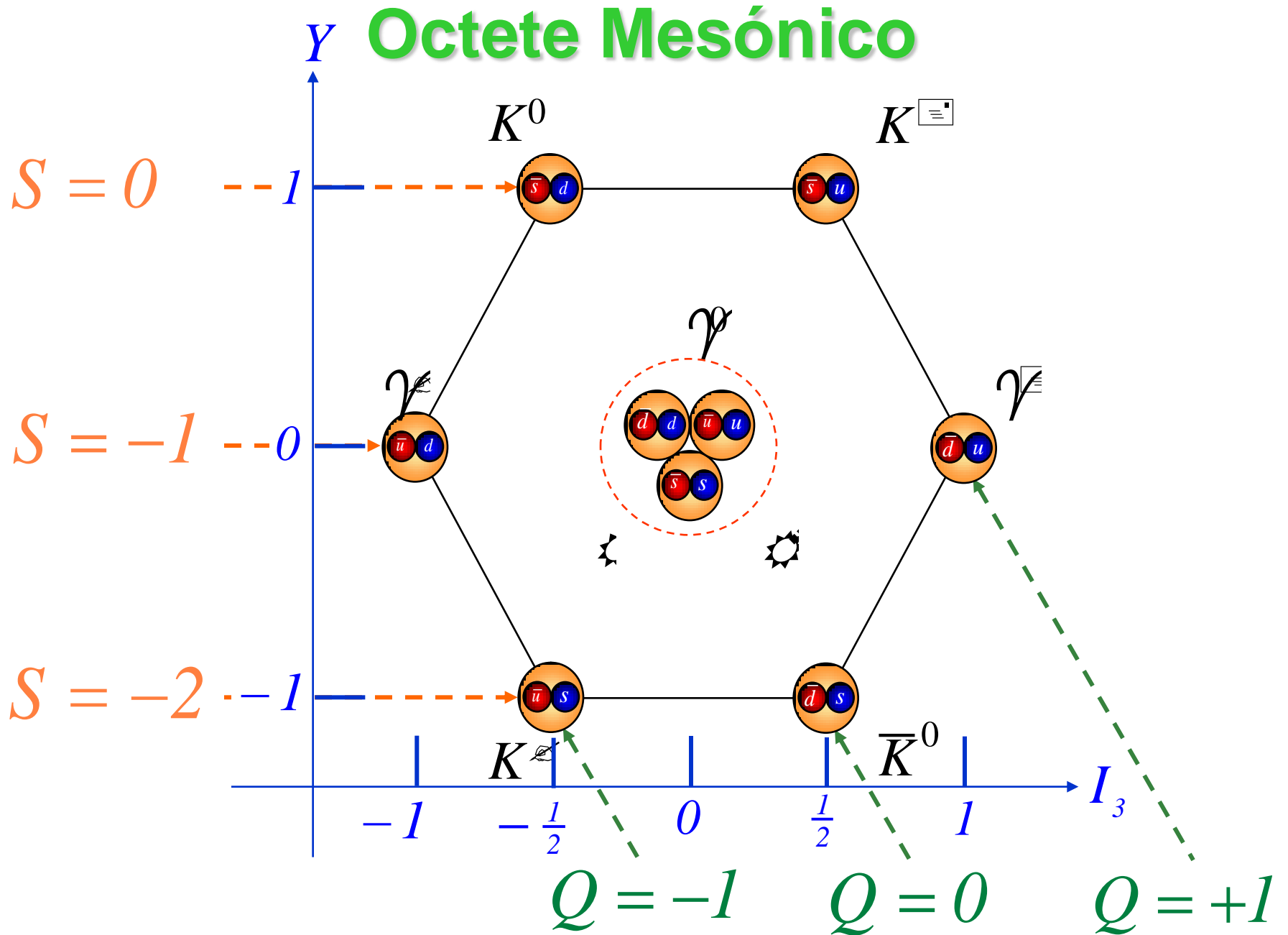
Y Octete Bariónico



Decuplete Bariónico



Octete Mesónico



En general se dice que si un operador conmuta con el Hamiltoniano, el valor esperado del observable es una constante y por tanto este es una *cantidad conservada*

$$\frac{d}{dt} \langle \hat{G} \rangle = i \langle [\hat{H}, \hat{G}] \rangle$$
$$\frac{d}{dt} \langle \hat{G} \rangle = 0$$

Aunque solo se ha considerado una transformación infinitesimal, una transformación finita puede expresarse como una serie de transformaciones infinitesimales

$$\hat{U}(\vec{\alpha}) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + i \frac{\vec{\alpha}}{n} \cdot \hat{G} \right)^n = e^{i\vec{\alpha} \cdot \hat{G}}$$

Notación

Vector fila (**bra**) $\langle \alpha | = a_1^* \quad a_2^* \quad \dots \quad a_n^*$

Vector columna (**ket**) $|\alpha\rangle = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix}$

Producto interior $\langle \alpha | \beta \rangle$

Operador propio $\hat{Q}f = qf$

Ecuación de valores propios

$$\hat{Q}|e_n\rangle = q_n|e_n\rangle$$

Ejemplo:

Ecuación de Schrödinger

$$\hat{H}\psi_\alpha = E\psi_\alpha$$

$$\hat{H}|\alpha\rangle = E|\alpha\rangle$$

Valor esperado de un observable

$$\langle Q \rangle = \int \psi^* \hat{Q} \psi dx$$

Números Cúánticos de los Quarks

<i>QUARK</i>	<i>Isospin I</i>	<i>Componente I₃</i>	<i>Hipercarga Y</i>	<i>Carga Q</i>	<i>Número Bariónico B</i>	<i>Extrañeza S</i>
<i>u</i>	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{3}$	$+\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	0
<i>d</i>	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	0
<i>s</i>	0	0	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	-1

$$Q = I_3 + \frac{Y}{2}$$

$$Y = B + S$$

Grupo SU(2) Isoespín

Generadores del Grupo

$$\vec{T}_1 = \frac{1}{2} \sigma_1 \quad \vec{T}_2 = \frac{1}{2} \sigma_2 \quad \vec{T}_3 = \frac{1}{2} \sigma_3$$

Matrices de Pauli

$$\sigma_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad \sigma_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \quad \sigma_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

$$\vec{T}_+ = \vec{T}_1 + i\vec{T}_2 \quad \text{Ascenso}$$

Operadores Escalera

$$\vec{T}_- = \vec{T}_1 - i\vec{T}_2 \quad \text{Descenso}$$

Efecto de los Operadores Sobre los Estados

$$|L, L_z\rangle |s, m\rangle |I, I_3\rangle$$

$$I_3 |I, I_3\rangle = I_3 |I, I_3\rangle = I_3 |I, I_3\rangle = \dots = I_3 |I, I_3\rangle$$

Estado de Isoespín

$$u = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \left| \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right\rangle \quad d = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \left| \frac{1}{2}, -\frac{1}{2} \right\rangle$$

$$T_{\pm} |I, I_3\rangle = \sqrt{I(I \mp I_3) \mp I_3(I \mp I_3)} |I, I_3 \mp 1\rangle$$

$$T_{\mp} |I, I_3\rangle = \sqrt{I(I \pm I_3) \pm I_3(I \pm I_3)} |I, I_3 \pm 1\rangle$$

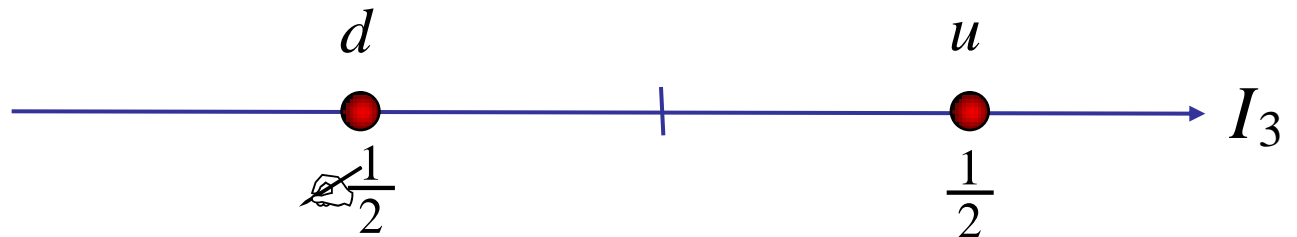
$$T_{\pm} u = 0 \quad T_{\pm} d = u \quad T_{\mp} u = d \quad T_{\mp} d = 0$$

Antiquarks

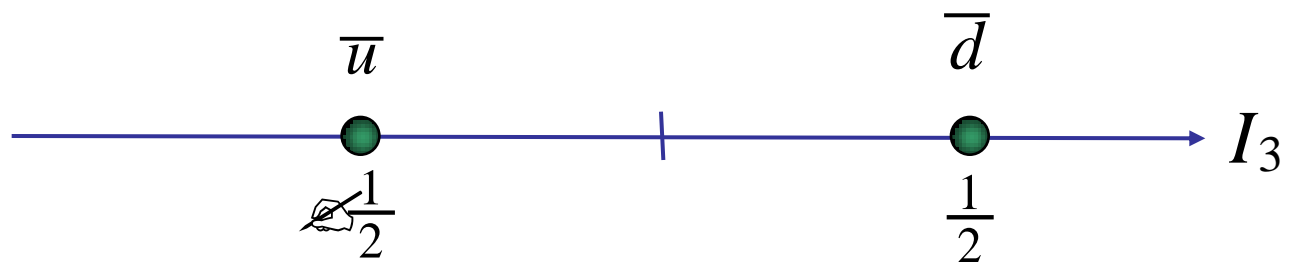
$$\bar{u} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \left| \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right\rangle \quad \bar{d} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \left| \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right\rangle$$

$$T \bar{u} \quad \bar{d} \quad T \bar{d} \quad 0 \quad T u \quad 0 \quad T d \quad u$$

Quarks



Antiquarks

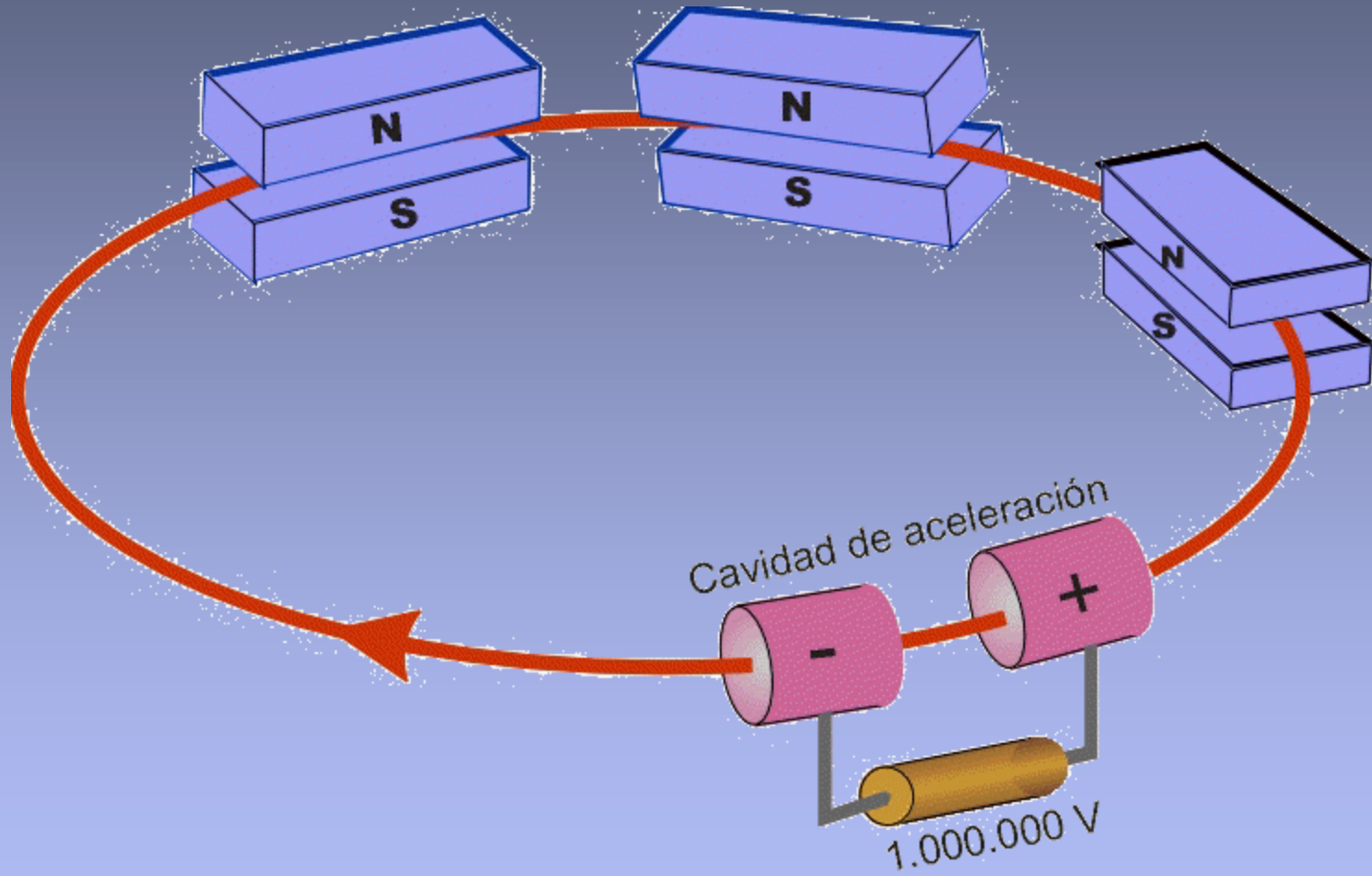


$$u \otimes d \xrightarrow{\hat{t}_1} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \xrightarrow{\hat{t}_2} \begin{pmatrix} 0 & i & 0 \\ i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \xrightarrow{\hat{t}_3} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \left| \right. \xrightarrow{\hat{t}_8} \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}$$

$$u \otimes s \xrightarrow{\hat{t}_4} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \xrightarrow{\hat{t}_5} \begin{pmatrix} 0 & 0 & i \\ 0 & 0 & 0 \\ i & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$d \otimes s \xrightarrow{\hat{t}_6} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \xrightarrow{\hat{t}_7} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & i \\ 0 & i & 0 \end{pmatrix}$$

Ciclotrón



Aceleradores de Partículas CERN



Acelerador LEP

En los puntos 2, 4, 6 y 8 se cruzan los dos haces de partículas que discurren por el LEP.

