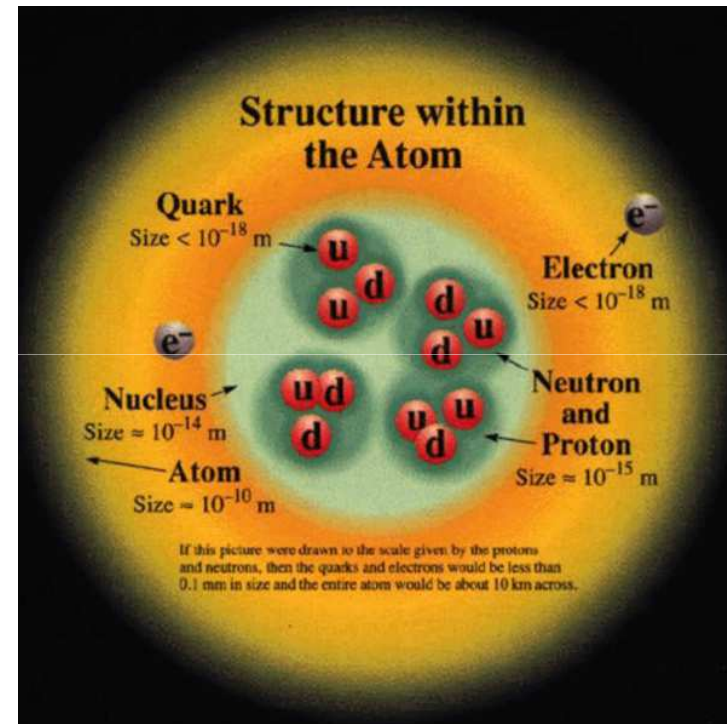


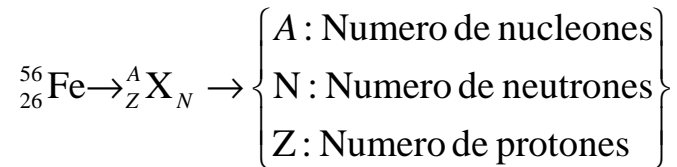
Constituyentes de la materia

- Constituyentes de la materia.
- Unidades, dimensiones y constantes de interés.
- Repaso de cinemática relativista.
- Repaso de teoría del momento angular.



Terminología

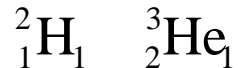
- Núclido o nucleido.



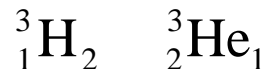
- **Isótopos.** Mismo Z



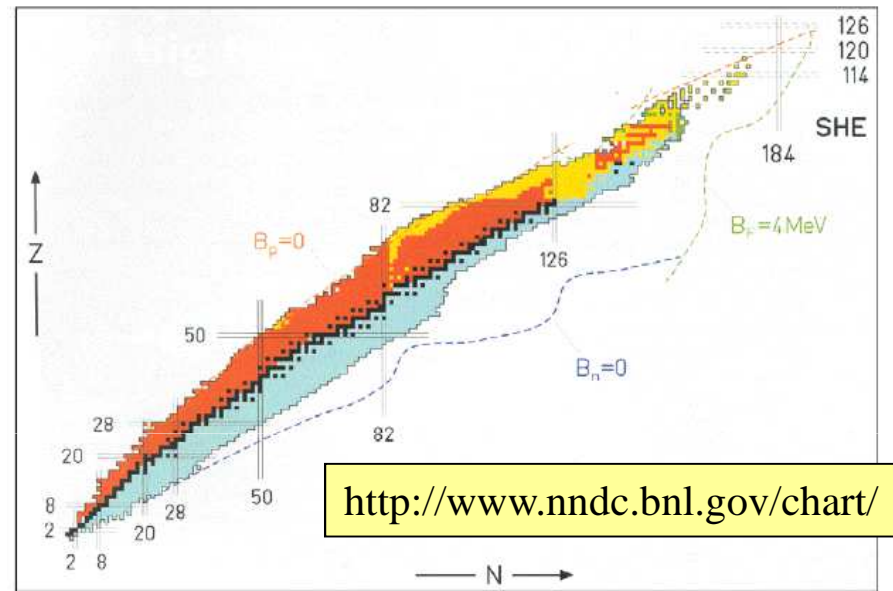
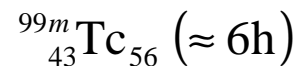
- **Isotonos.** Mismo N



- **Isóbaros.** Mismo A



- **Isómeros o estados metaestables.** Estado excitado con una vida media anormalmente larga (mayor de 1 segundo).

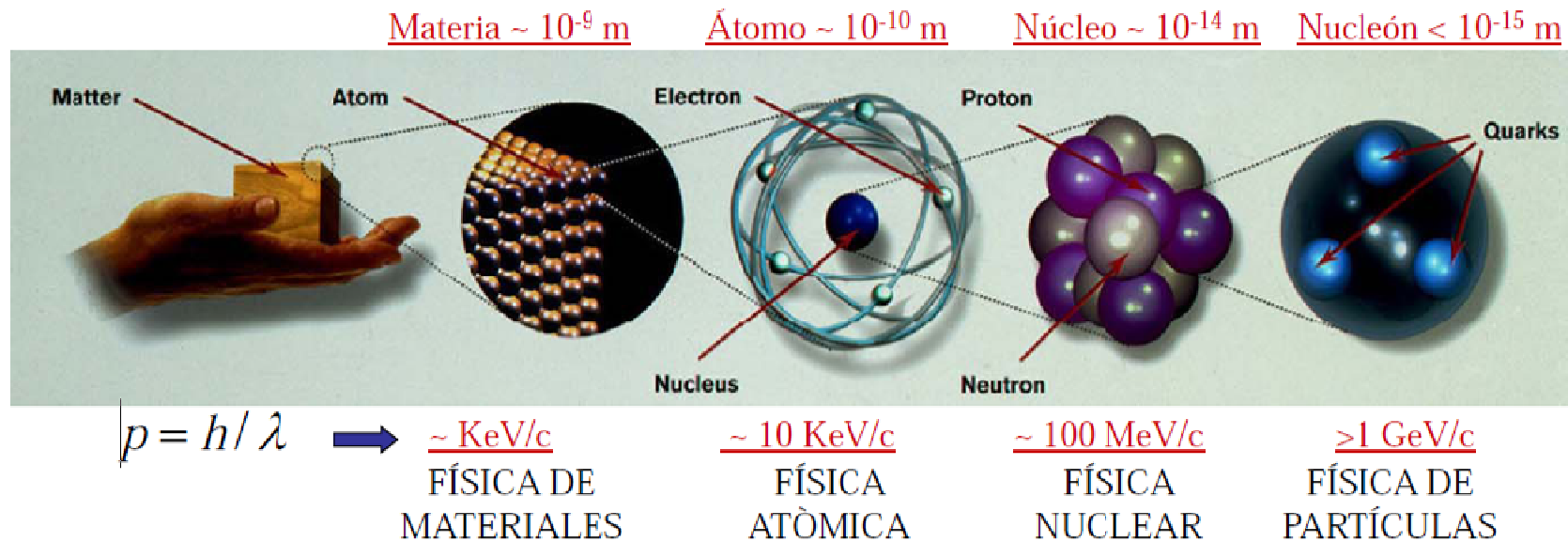


- **Núcleos espejo:** El valor de N del primero es igual al valor de Z del segundo y viceversa.



Constituyentes de la materia.

- A ciertas escalas de longitudes (energías) se puede describir la materia en términos de constituyentes que pueden parecer fundamentales, pero conforme disminuimos las distancias (aumentamos la energía de nuestra sonda) pueden aparecer constituyentes más fundamentales.
- Para ver un objeto pequeño necesitamos longitudes de onda del mismo orden de magnitud que el tamaño que queremos observar → Relación de De Broglie $p=h/\lambda$



Constituyentes de la materia (II).

FERMIONS <small>matter constituents spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...</small>			BOSONS <small>force carriers spin = 0, 1, 2, ...</small>		
Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_L lightest neutrino*	(0-0.13)×10 ⁻⁹	0	u up	0.002	2/3
e electron	0.000511	-1	d down	0.005	-1/3
ν_M middle neutrino*	(0.009-0.13)×10 ⁻⁹	0	c charm	1.3	2/3
μ muon	0.106	-1	s strange	0.1	-1/3
ν_H heaviest neutrino*	(0.04-0.14)×10 ⁻⁹	0	t top	173	2/3
τ tau	1.777	-1	b bottom	4.2	-1/3

Unified Electroweak spin = 1			Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge	Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ photon	0	0	g gluon	0	0
W⁻	80.39	-1			
W⁺	80.39	+1			
W bosons					
Z⁰ Z boson	91.188	0			

Properties of the Interactions

The strengths of the interactions (forces) are shown relative to the strength of the electromagnetic force for two u quarks separated by the specified distances.

Property	Gravitational Interaction	Weak Interaction (Electroweak)	Electromagnetic Interaction	Strong Interaction
Acts on:	Mass – Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically Charged	Quarks, Gluons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	W⁺ W⁻ Z⁰	γ	Gluons
Strength at $\left\{ \begin{array}{l} 10^{-18} \text{ m} \\ 3 \times 10^{-17} \text{ m} \end{array} \right.$	10^{-41} 10^{-41}	0.8 10^{-4}	1 1	25 60

Unidades, dimensiones y constantes de utilidad

■ *Longitudes.*

- ❑ Unidad típica: 10^{-15} m. = 1 fentometro = 1 fm (fermi).
- ❑ Tamaño nuclear: $\approx 1-7$ fm.
- ❑ Partículas: $\approx 1 - 10^{-5}$ fm.

■ *Tiempos.* Trabajaremos a lo largo de 40 ordenes de magnitud

- ❑ Desintegraciones fuertes: $\approx 10^{-23}$ s
- ❑ Reacciones nucleares y fragmentación de núcleos ligeros: $\approx 10^{-20}$ s
- ❑ Desintegraciones electromagnéticas: $\approx 10^{-9} - 10^{-12}$ s
- ❑ Desintegraciones α y β : $< 10^{16}$ s

■ *Energías.*

- ❑ Desintegraciones α , β y γ : ≈ 1 MeV
- ❑ Reacción nuclear de baja energía: $\approx 1 - 100$ MeV
- ❑ Reacción nuclear de alta energía: ≈ 1 TeV

Unidades, dimensiones y constantes de utilidad (II)

■ *Unidades.*

- Energía: electrón-voltio (eV) y sus múltiplos
 - 1 MeV = 10^6 eV = $1.602 \cdot 10^{-23}$ J.
- Masas: Unidades de masa atómica (u)
 - 1 u = $(1/12) \cdot M(^{12}\text{C}) = 931.49 \text{ MeV}/c^2$
- Habitualmente trabajaremos en Unidades Naturales
 - $\hbar = h / 2\pi = 1$
 - $c = 1$
 - Esto nos permitirá escribir ecuaciones de forma más compacta y manejable.

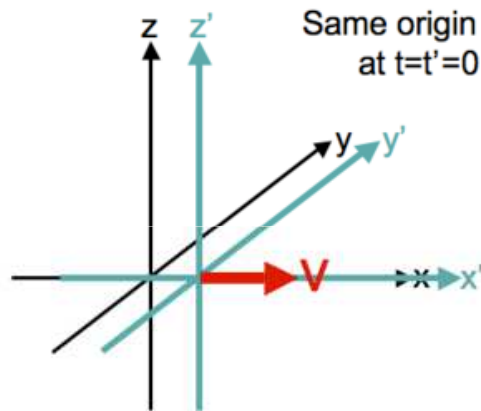
$$E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2 = p^2 + m^2$$

■ *Constantes.*

- $\hbar c = 197.326968 \text{ MeV fm}$
- $\hbar = 6.582119 \cdot 10^{-22} \text{ MeV s}$
- $m_e = 0.511 \text{ MeV}$
- $m_p = 938.272 \text{ MeV}$
- $m_n = 939.565 \text{ MeV}$

Repaso de cinemática relativista

- Supongamos dos observadores O y O' cada uno de los cuales utiliza su propio sistema de coordenadas cartesianas. O utilizaría (t,x,y,z) y O' (t',x',y',z') . Supongamos además que los sistemas de coordenadas son tales que los ejes x y x' son colineales, y paralelo a y' y z paralelo a z' . La velocidad relativa entre ambos observadores es v a lo largo del eje x común (configuración estándar). La transformación de Lorentz entre ambos observadores se denomina un “boost” y vendrá dada por:



$$\begin{bmatrix} ct' \\ x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma & -\beta\gamma & 0 & 0 \\ -\beta\gamma & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ct \\ x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

donde $\beta = v/c$ y $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$

- Un cuadrivector a^μ se define como un vector en un espacio de cuatro dimensiones real (espacio de Minkowski) que se transforma conforme a una transformación de Lorentz. Ejemplos de cuadrivectores serían:

$$\begin{cases} x^\mu = (ct, \vec{x}) \\ v^\mu = \gamma(c, \vec{v}) \\ p^\mu = (E/c, \vec{p}) \end{cases}$$

Repaso de cinemática relativista. Invariantes

- El producto escalar definido con la ayuda de un tensor métrico $g^{\alpha\beta}$ no depende del observador, es por tanto un **invariante**

$$A \cdot B = a^\alpha b^\beta g_{\alpha\beta} = \{\text{Minkowski}\} = a_0 b_0 - a_1 b_1 - a_2 b_2 - a_3 b_3 = a_0 b_0 - \vec{a} \cdot \vec{b}$$

- La masa en reposo, m_0 , viene definida de esta forma como

$$m_0^2 = E \cdot E = E^2 - \vec{p} \cdot \vec{p}$$

- Ejemplo: Sea un protón con un momento $p = 10$ GeV. Determinar su energía y su velocidad. (Sol: $E = 10.044$ GeV, $v = 0.996 c$)
- Una aplicación directa es evaluar cual es el sistema más favorable para un experimento, ¿un haz de partículas incidiendo sobre un blanco fijo o dos haces de partículas colisionando en vuelo? Es lo mismo que decir, ¿Dónde es más favorable trabajar, en el sistema de referencia del CM o en el sistema de referencia del Laboratorio?
- Cuestión: ¿Cuál es la energía mínima necesaria para generar antiprotones en un experimento de blanco fijo con un haz de protones, $pp \rightarrow p\bar{p}pp$?

Repaso de teoría del momento angular.

- Formalmente se define un momento angular \vec{J} como un operador vector con componentes J_x , J_y , y J_z hermíticas que satisfacen:

$$\vec{J} \times \vec{J} = i \vec{J}$$

o lo que es equivalente:

$$\left. \begin{aligned} [J_y, J_z] &= iJ_x \\ [J_z, J_x] &= iJ_y \\ [J_x, J_y] &= iJ_z \end{aligned} \right\} \rightarrow [J_i, J_j] = i\epsilon_{ijk} J_k$$

y donde se verifica que:

$$\begin{aligned} J^2 &= J_x^2 + J_y^2 + J_z^2 \\ [J^2, J_j] &= 0 \end{aligned}$$

Ya que J^2 conmuta con J_z tienen que existir autofunciones simultaneas de ambos operadores:

$$\begin{aligned} J^2 |\lambda m\rangle &= \lambda |\lambda m\rangle \\ J_z |\lambda m\rangle &= m |\lambda m\rangle \end{aligned}$$

Repaso de teoría del momento angular.

- Se puede demostrar por construcción que:

$$J^2 |jm\rangle = j(j+1) |jm\rangle \rightarrow j = 0, \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}, 2, \dots$$

$$J_z |jm\rangle = m |jm\rangle \rightarrow m = -j, -j+1, \dots, j-1, j$$

$$J_{\pm} |jm\rangle = \mp \frac{1}{\sqrt{2}} (J_x \pm iJ_y) |jm\rangle = \mp \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(j \mp m)(j \pm m + 1)} |jm \pm 1\rangle$$

- El momento angular orbital es un caso particular del anterior tal que además se puede definir:

$$\vec{L} = -i\vec{r} \times \vec{\nabla}$$

- Sus autofunciones son los armónicos esféricos, definidos por:

$$\psi_{lm}(\theta, \varphi) = (-1)^m \sqrt{\frac{(2l+1)(l-m)!}{4\pi(l+m)!}} P_l^m(\cos \theta) e^{im\varphi}$$

donde P_l^m son los polinomios asociados de Legendre y l toma valores enteros $0, 1, 2, 3, \dots$

$$\psi_{l-m}(\theta, \varphi) = (-1)^m \psi_{lm}^*(\theta, \varphi)$$

$$\psi_{lm}(\pi - \theta, \pi + \varphi) = (-1)^l \psi_{lm}(\theta, \varphi) \quad (\text{Paridad } \vec{r} \rightarrow -\vec{r})$$

Repaso de teoría del momento angular. El Espín.

- El espín representa un grado de libertad adicional de las partículas. Es una característica de las mismas, como puede ser su carga eléctrica o su masa en reposo. Se suele denotar por S , sus operadores por tanto serían S^2 y S_z y sus autofunciones χ_{sm} .
- A las partículas con espín semientero se las denomina *fermiones* y a las de espín entero *bosones*. Ambos tipos de partículas verifican el teorema espín-estadística:
 - La función de onda de N bosones idénticos es simétrica al intercambio de dos de ellos.
 - La función de onda de N fermiones idénticos es antisimétrica al intercambio de dos de ellos.

Baryons qqq and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$					
Baryons are fermionic hadrons.					
These are a few of the many types of baryons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c ²	Spin
p	proton	uud	1	0.938	1/2
\bar{p}	antiproton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-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

Mesons $q\bar{q}$					
Mesons are bosonic hadrons					
These are a few of the many 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	0.776	1
B^0	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
η_c	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0

Repaso de teoría del momento angular. Acoplamiento de momentos angulares

- Dados dos momentos angulares \vec{J}_1 y \vec{J}_2 definimos un operador suma $\vec{J} = \vec{J}_1 + \vec{J}_2$ de tal forma que se puede demostrar que se verifica $\vec{J}_1 \times \vec{J}_2 = i\vec{J}$ y que por tanto sigue siendo un momento angular. En ese caso existen autofunciones ortonormales que verifican

$$J^2 |j_1 j_2, jm\rangle = j(j+1) |j_1 j_2, jm\rangle$$
$$J_z |j_1 j_2, jm\rangle = m |j_1 j_2, jm\rangle$$

Esta base se denomina base acoplada.

- Expresando esta base como combinación lineal de las bases de los momentos angulares originales, base desacoplada, obtenemos los coeficientes de Clebsch-Gordan.

$$|j_1 j_2, jm\rangle = \sum_{m_1, m_2} \langle j_1 m_1 j_2 m_2 | j_1 j_2, jm\rangle |j_1 m_1 j_2 m_2\rangle$$

$$m = m_1 + m_2$$

$$|j_1 - j_2| \leq j \leq j_1 + j_2$$

Repaso de teoría del momento angular. Acoplamiento de momentos angulares

- Propiedades de los CG

- Completitud

$$\sum_{m_1, m_2} \langle j_1 m_1 j_2 m_2 | j_1 j_2, jm \rangle \langle j_1 m_1 j_2 m_2 | j_1 j_2, j' m' \rangle = \delta_{jj'} \delta_{mm'}$$

$$\sum_{j, m} \langle j_1 m_1 j_2 m_2 | j_1 j_2, jm \rangle \langle j_1 m_1' j_2 m_2' | j_1 j_2, jm \rangle = \delta_{m_2 m_2'} \delta_{m_1 m_1'}$$

- Simetría

$$\langle j_1 m_1 j_2 m_2 | j_1 j_2, jm \rangle = (-1)^{j_2 + j_1 - j} \langle j_2 m_2 j_1 m_1 | j_2 j_1, jm \rangle$$

- Ejemplo: Calcular explícitamente los CG correspondientes a acoplar un momento angular 1 con $\frac{1}{2}$.

Algunas páginas web de interes para la asignatura.

- <http://www.cern.ch/> (CERN)
- <http://www.d0.fnal.gov/> (Fermilab)
- <http://www.slac.stanford.edu/> (SLAC)
- <http://ParticleAdventure.org/> (LBNL particle adventure)
- <http://sg1.hep.fsu.edu/~wahl/Quarknet/index.htm>
- <http://www.fnal.gov/pub/tour.html> (Fermilab particle physics tour)
- <http://www.nndc.bnl.gov/> (Brookhaven Nuclear Data Base)
- <http://isotopes.lbl.gov/toi.html> (LBNL Nuclear Data Dissemination)
- <http://pdg.lbl.gov/> (LBNL Particle Data Group)
- <http://www.laradioactivite.com/> (Divulgación sobre conceptos y aplicaciones de la Física Nuclear)