

La física de las interacciones fundamentales

J. Fernando Barbero G.

Instituto de Estructura de la Materia, CSIC.

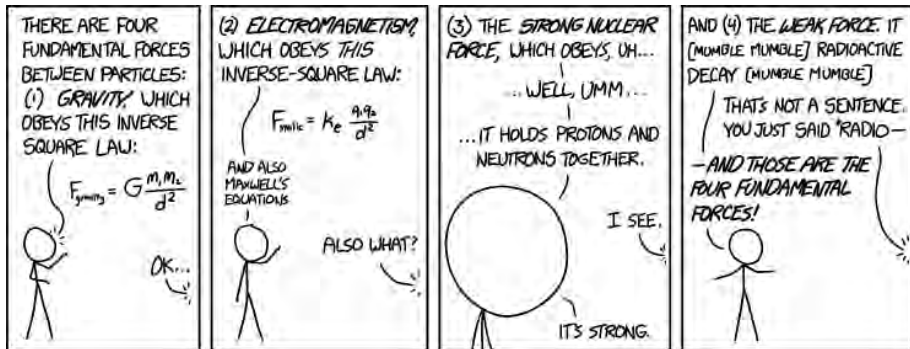
Semana de la Ciencia

16 de noviembre de 2016.



CSIC

CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

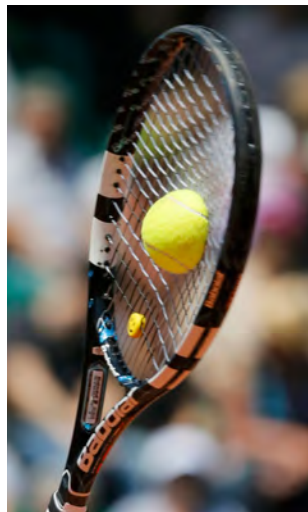


https://www.explainxkcd.com/wiki/index.php/1489:_Fundamental_Forces

¿Qué entendemos por interacción?

Acción mutua entre las partes de un sistema físico

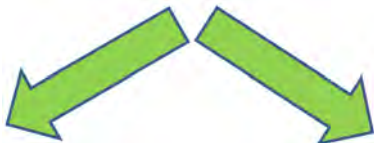
- Contacto entre cuerpos
- Sistemas elásticos
- Flotación en un fluido
- Imanes
- Transmisión de calor
- Transmisión de luz
- Atracción gravitatoria
- ⋮



¿Hay interacciones que podamos considerar «básicas»?

La gran síntesis

Cuatro interacciones fundamentales



«Clásicas»

- Gravitación
- Electromagnetismo

«No clásicas»

- Interacción nuclear débil
- Interacción nuclear fuerte

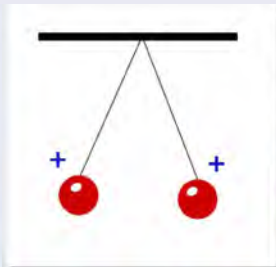
Fenómenos eléctricos



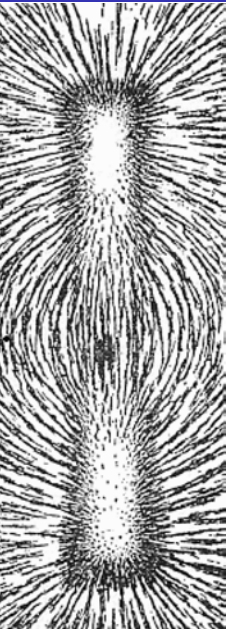
La ley de Coulomb

Cargas del mismo signo se repelen y de distinto signo se atraen.

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \mathbf{u}_r, \quad \mathbf{F} = q\mathbf{E}$$



Fenómenos Magnéticos



La ley de Biot y Savart

Las corrientes eléctricas y los imanes producen campos magnéticos que actúan sobre cargas en movimiento e imanes

Campo magnético producido por una corriente estacionaria

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \mathbf{j}(\mathbf{y}) \times \frac{\mathbf{x} - \mathbf{y}}{\|\mathbf{x} - \mathbf{y}\|^3} dV$$

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$



La primera unificación

Electricidad

Magnetismo



Electromagnetismo

- Explica muchas de las propiedades ópticas y mecánicas de la materia.
- La luz es un fenómeno electromagnético.
- Sus ecuaciones fundamentales son las **Ecuaciones de Maxwell**.

Tecnología



$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \mu_0 \mathbf{J}$$

Gravitación

La caída de los cuerpos.

¿Qué es la gravedad?

Para **Aristóteles** es la **tendencia natural** de los cuerpos a **ocupar el lugar que les corresponde**. Según él todos los cuerpos caen con una **velocidad proporcional a su peso**.

Galileo se dio cuenta de que **Aristóteles** estaba equivocado.

Todos los objetos caen **con la misma aceleración** siempre que el rozamiento con el aire sea despreciable.





¿Interacción?

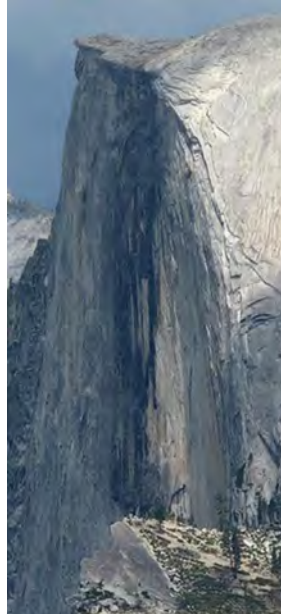


La gravitación de Newton

La ley de la gravitación universal

$$\mathbf{F} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \mathbf{u}_r$$

- Explica las tres **leyes de Kepler** sobre el movimiento de los planetas.
- La gravitación es una interacción **muy débil** (la atracción gravitatoria entre masas ordinarias es muy pequeña).
- La fuerza entre dos personas a 1m es de 10^{-6}N . ¡La misma que para sostener una gota de agua!
- La fuerza que siente una persona en la ladera de una montaña debida a su atracción gravitatoria es equivalente al peso de unos pocos gramos.



Relatividad general

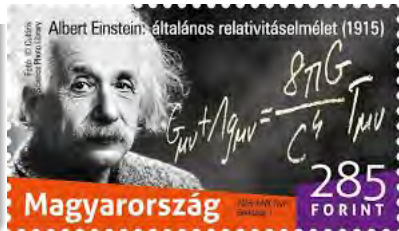
Objetos de distintas masas caen con la misma aceleración



La gravitación se describe como un fenómeno relacionado con la geometría del espacio-tiempo

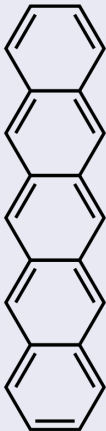
Las ecuaciones de Einstein

$$\underbrace{G(g)}_{\text{geometría}} = \frac{8\pi G_N}{c^4} \underbrace{T(g, \phi)}_{\text{materia}}$$



Interacciones «no clásicas»

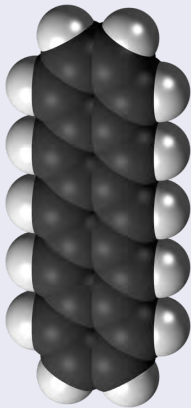
El mundo de los átomos



- **Constituyentes elementales** de la materia desde el punto de vista de la **química**.
- Las reacciones químicas consisten en una reorganización de átomos con liberación o absorción de energía.
- **Muy pequeños** (décimas de nanómetro $\ell \approx 10^{-10}\text{m}$).
- *The delicate inner structure of a pentacene molecule imaged with an atomic force microscope. For the first time, scientists achieved a resolution that revealed the chemical structure of a molecule. The hexagonal shapes of the five carbon rings in the pentacene molecule are clearly resolved. Even the positions of the hydrogen atoms around the carbon rings can be deduced from the image. (Image courtesy of IBM Research, Zurich).*

Interacciones «no clásicas»

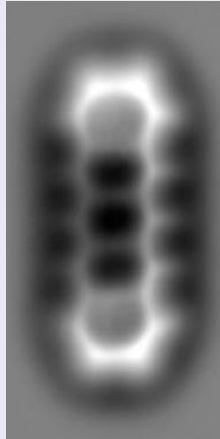
El mundo de los átomos



- **Constituyentes elementales** de la materia desde el punto de vista de la **química**.
- Las reacciones químicas consisten en una reorganización de átomos con liberación o absorción de energía.
- **Muy pequeños** (décimas de nanómetro $\ell \approx 10^{-10}\text{m}$).
- *The delicate inner structure of a pentacene molecule imaged with an atomic force microscope. For the first time, scientists achieved a resolution that revealed the chemical structure of a molecule. The hexagonal shapes of the five carbon rings in the pentacene molecule are clearly resolved. Even the positions of the hydrogen atoms around the carbon rings can be deduced from the image. (Image courtesy of IBM Research, Zurich).*

Interacciones «no clásicas»

El mundo de los átomos



- **Constituyentes elementales** de la materia desde el punto de vista de la **química**.
- Las reacciones químicas consisten en una reorganización de átomos con liberación o absorción de energía.
- **Muy pequeños** (décimas de nanómetro $\ell \approx 10^{-10}\text{m}$).
- *The delicate inner structure of a pentacene molecule imaged with an atomic force microscope. For the first time, scientists achieved a resolution that revealed the chemical structure of a molecule. The hexagonal shapes of the five carbon rings in the pentacene molecule are clearly resolved. Even the positions of the hydrogen atoms around the carbon rings can be deduced from the image. (Image courtesy of IBM Research, Zurich).*

Estructura atómica

Modelo Clásico (Rutherford)



Corteza electrónica

- Electrones.

Núcleo Central

- Muy pequeño.
- Concentra casi toda la masa.
- Carga positiva.

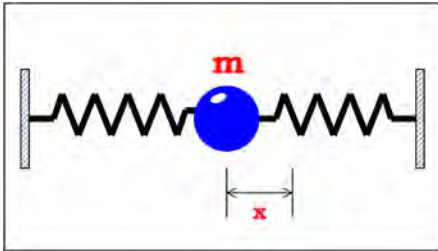
Physics is the only real science. The rest are just stamp collecting

Estabilidad

Electrónica: ¿Por qué los electrones de la corteza no emiten radiación y caen al núcleo?

Nuclear: Si el núcleo es un objeto compuesto ¿Qué mantiene unidos a sus constituyentes?

Mecánica clásica



$$\begin{cases} \ddot{x} + \omega^2 x = 0 \\ x(t=0) = x_0 \\ \dot{x}(t=0) = v_0 \end{cases}$$

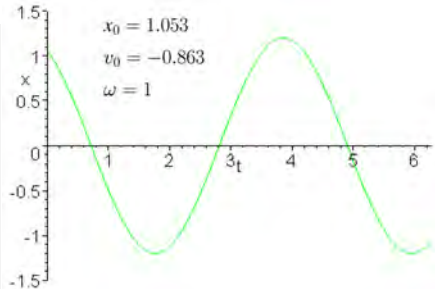
Ecuación diferencial

Condiciones iniciales

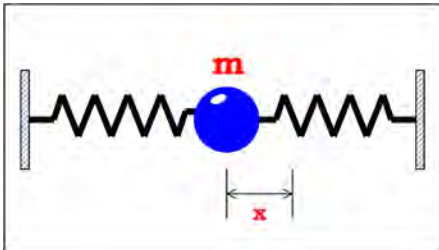
Contiene información sobre la masa y las características de los muelles.

Ecuación del movimiento

- La ecuación se obtiene a partir de los elementos del sistema.
- Solución **determinada de forma única** por la **posición inicial** y la **velocidad inicial**.
- Cantidades conservadas (energía) asociadas a simetrías del sistema.



Mecánica cuántica



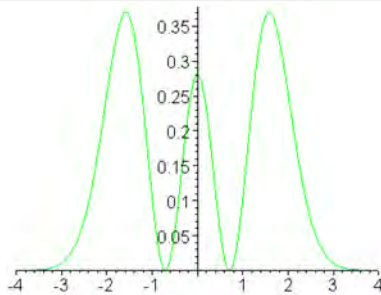
Ecuación de Schrödinger

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{1}{2} \kappa x^2 \Psi$$

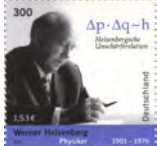
Ψ es la **función de onda** que se interpreta como una **densidad de probabilidad** (\hbar cte. de Planck).

- La ecuación es determinista pero la solución es una densidad de probabilidad.
- «Principio» de incertidumbre.
- La energía toma valores discretos.

$$E_n = \left(n + \frac{1}{2} \right) \hbar \omega \quad n = 0, 1, 2 \dots$$

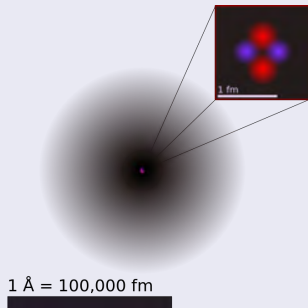


El átomo cuántico



Bohr, Heisenberg, Schrödinger

- **Corteza electrónica** (una «nube» de electrones). Carece de sentido hablar de órbitas.
- Sólo son posibles ciertas configuraciones de **energía bien definida** (niveles).
- La mayor parte son **inestables**.
- Emisión de energía en forma de **fotones** (cuantos de radiación).



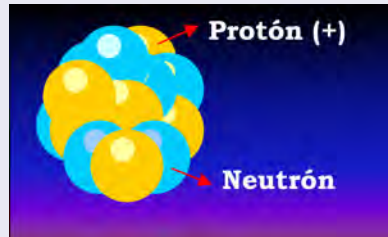
El estado fundamental es estable

El núcleo atómico

En el centro de cada átomo se encuentra su núcleo

¿Se trata de un objeto elemental o compuesto?

Es un **objeto compuesto** que se fragmenta al ser golpeado por proyectiles apropiados (partículas α , neutrones,...).



- El núcleo tiene carga positiva, está formado por **protones** (positivos) y **neutrones** (neutros).
- ¿Qué interacción contrarresta la repulsión electrostática en el núcleo?:

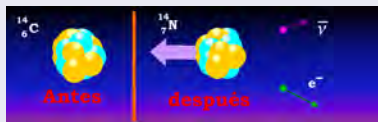
La interacción nuclear fuerte.

Desintegraciones radiactivas

Desintegración α



Desintegración β



Desintegración γ



¿Son las partículas emitidas constituyentes de núcleo?

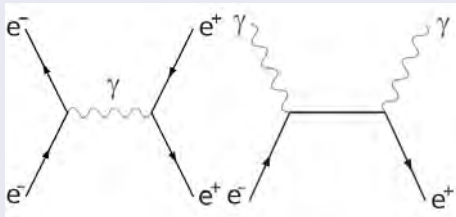
Teoría cuántica de campos: QED

La mecánica cuántica de los sistemas continuos (campos).

- Ejemplo: **electrodinámica cuántica** (teoría cuántica del campo electromagnético).
- Es un formalismo **cuántico, relativista** y microcausal.
- Predice la **existencia de antipartículas** y describe procesos en los que se **crean y destruyen** partículas.



Diagramas de Feynman



- Partículas (estados libres)
- Vértices
- Propagadores

Las partículas elementales

mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
charge →	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs boson
QUARKS	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	0	
	-1	-1	-1	1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
LEPTONS	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	0	
	0	0	0	± 1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
					GAUGE BOSONS

Interacción fuerte

Yukawa, Feynman, Gell-Mann

- Es responsable de **mantener unidos** protones y neutrones.
- **No** es de tipo coulombiano.
- **Muy corto alcance** (60% del radio del protón 10 m).
- Las **desintegraciones** mediadas por esta interacción son **muy rápidas**.

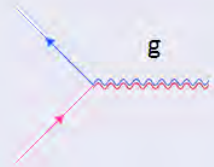
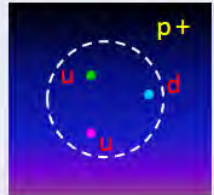
Es mucho más intensa que el resto de las interacciones, por ello vence la repulsión electrostática entre los protones.



Interacción fuerte: QCD

La cromodinámica cuántica

- Protones y neutrones están formados por **constituyentes fundamentales llamados quarks** (de seis tipos distintos **u**, **d**, **s**, **c**, **b** y **t**) dotados de una carga adicional (llamada caprichosamente **color**) y carga eléctrica fraccionaria.
- La **interacción fuerte entre quarks** es transmitida por **partículas sin masa** llamadas **gluones**.
- La interacción entre protones y neutrones es un «residuo» de la interacción entre los quarks que los constituyen (como las fuerzas de van der Waals).



Interacciones débiles

Fermi, Weinberg, Salam, Glashow

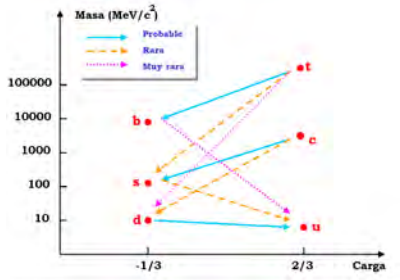
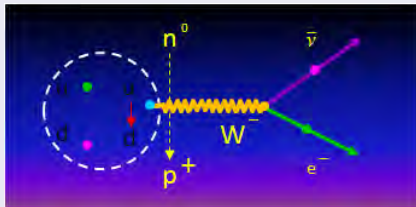
- Responsable de la **desintegración beta**.
- Las interacciones débiles producen desintegraciones y procesos «lentos».
- Afecta a casi todas las partículas.
- **No coulombiana** y de **muy corto alcance** (10^{-18}m), una milésima del radio del protón.
- Necesaria para explicar **la energía que hace funcionar** a las estrellas; (formación de deuterio).
- **Formación de núcleos pesados**.
- **Rompe simetrías** P, C, CP y hay leyes de conservación que no respetan.



La interacción electro-débil

Ejemplo: la desintegración del neutrón

Conversión de un quark u en un quark d mediante la emisión de un bosón W^- que se transforma en un electrón (e^-) y un antineutrino de tipo electrónico ($\bar{\nu}_e$).



W^\pm

$$e^- \leftrightarrow \bar{\nu}_e$$

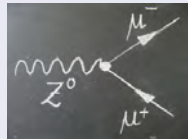
$$\mu^- \leftrightarrow \bar{\nu}_\mu$$

$$\tau^- \leftrightarrow \bar{\nu}_\tau$$

quark \leftrightarrow quark

El bosón Z^0

Corrientes débiles neutras.

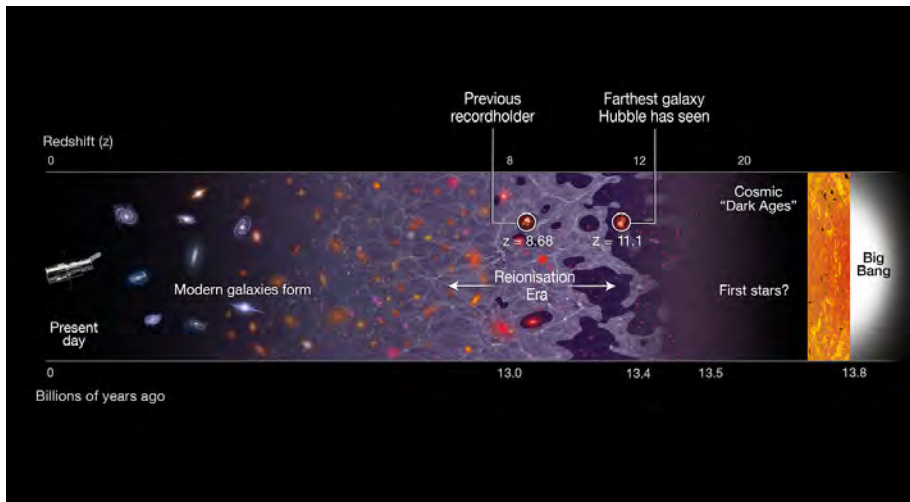


El bosón de Higgs

¿De dónde procede la masa de las W^\pm y la Z^0 ?

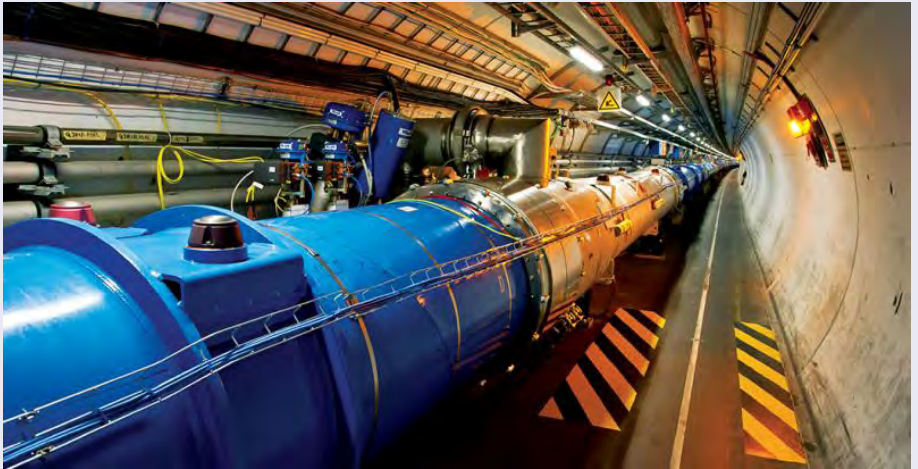
- En principio deberían tener masa cero pero se sabe que esto no puede ser (**renormalizabilidad**)...
- Robert Brout, François Englert y Peter Higgs encontraron una solución a este problema: **el mecanismo de Brout-Englert-Higgs**.
- Estas partículas **adquieren masa al interactuar con el campo de Higgs**.
- De hecho, cualquier partícula que interactúa con él adquiere masa. Cuanto más fuerte es la interacción mayor es la masa adquirida. El fotón no tiene masa porque no interactúa con el campo de Higgs.
- La partícula asociada con el campo de Higgs es el **bosón de Higgs**, que fue descubierto en el **CERN** en 2012.

Partículas elementales y cosmología

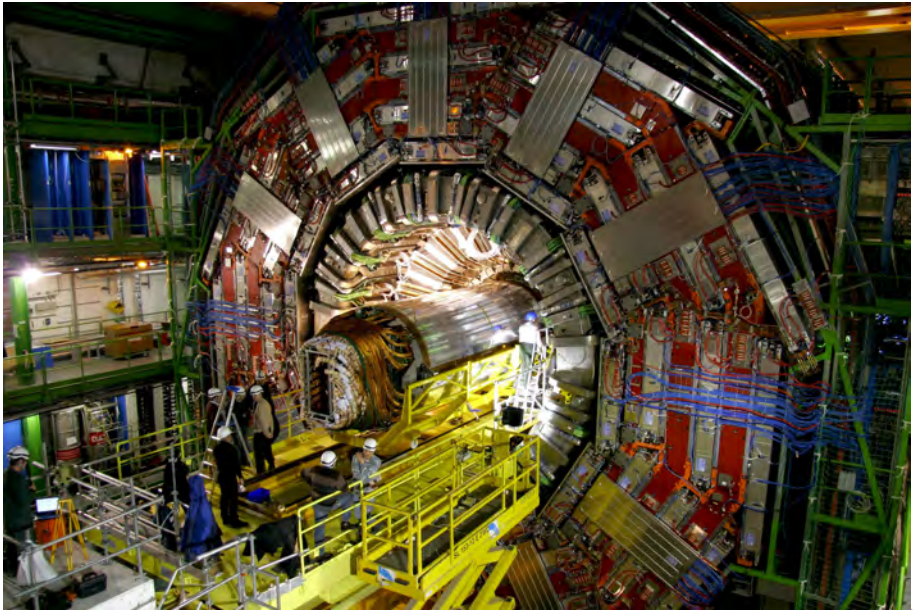


El aspecto experimental

El LHC



El aspecto experimental



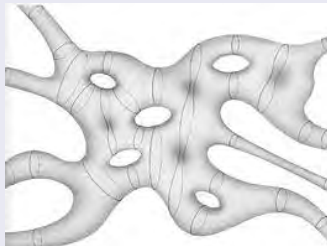
La síntesis final

Unificación de las interacciones fundamentales

- Se conoce una **teoría cuántica consistente** para **tres de las cuatro** interacciones fundamentales (Modelo electrodébil y QCD).
- Hay, de hecho, una teoría unificada para las tres: el **modelo estándar** basado en el grupo de *gauge* $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$.

¿Y la gravedad?

¿Cuerdas y supercuerdas?



Muchas gracias