

Introducción a la Física de Partículas

Mario Martínez



CERN, 30/09/2019

Los próximos 40'

- ¿Qué sabemos de la materia?
- ¿Qué pasó con la antimateria ?
- Neutrinos
- Concepto de masa
- ¿Cómo interacciona la materia?
- El bosón de Higgs
- ¿Materia oscura?
- A la caza de la materia oscura
- ¿Super-simetría ?
- Nota sobre el futuro
- Gravedad y Espacio-Tiempo
- Fin

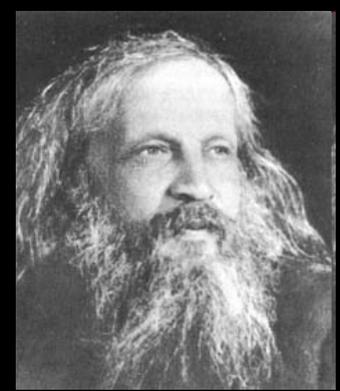
23/09/19



¿Qué sabemos de la materia?

...una visión histórica....

La materia ordinaria según Mendeleiev



Mendeleiev
(1867)

H																He	
Li	Be										B	C	N	O	F	Ne	
Na	Mg										Al	Si	P	S	Cl	Ar	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt									
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb		
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No		

Tabla Periódica

Elementos organizados en familias según su comportamiento químico
¿Cómo entender un H explosivo y un He gas noble (estable) ?

Detrás de la organización “casual” se escondía algo
mucho más profundo (y conceptualmente más sencillo)

→ El Átomo

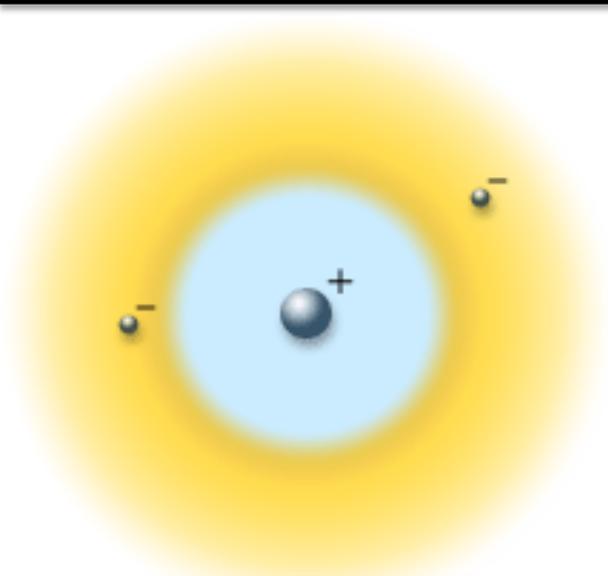
El Átomo



Rutherford
(1909)



Bohr
(1913)



protón



neutrón



electrón

...esto es sólo una visión pictórica..

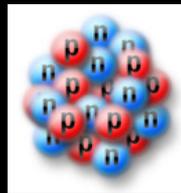
El entendimiento del átomo requiere la introducción de la Mecánica Cuántica..

Los átomos estan fundamentalmente "huecos"

Tamaño núcleo : $\sim 10^{-14}$ m

Tamaño átomo : $\sim 10^{-10}$ m

Esencialmente:



Los átomos están formados de un núcleo denso formado por protones y neutrones y capas de electrones (dos por capa)

Núcleo → una canica en el centro...



23/09/19
Átomos con capas completas son más estables (He)

Quarks/Leptons



protón

neutrón

electrón

1964



Gell-Mann



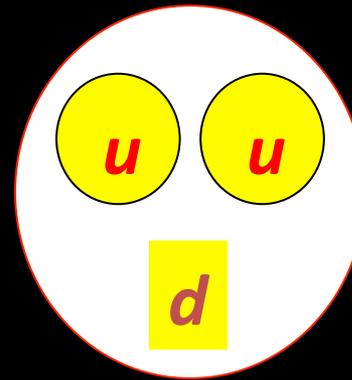
Zweig

El electron es una partícula fundamental
Pero protones y neutrones NO

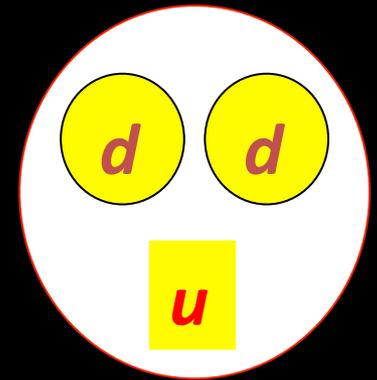
→ estan hechos de QUARKS

PROTON (p) : $|uud\rangle$ $Q = +1$

NEUTRON (n) : $|udd\rangle$ $Q = 0$



protón



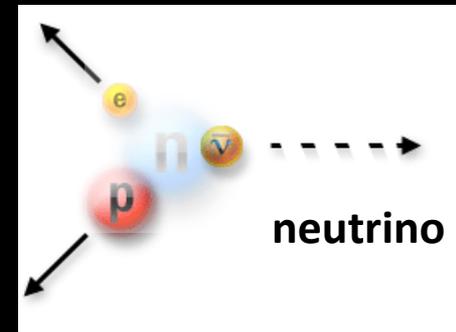
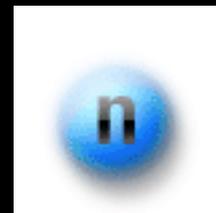
neutrón

Un neutrón se desintegra

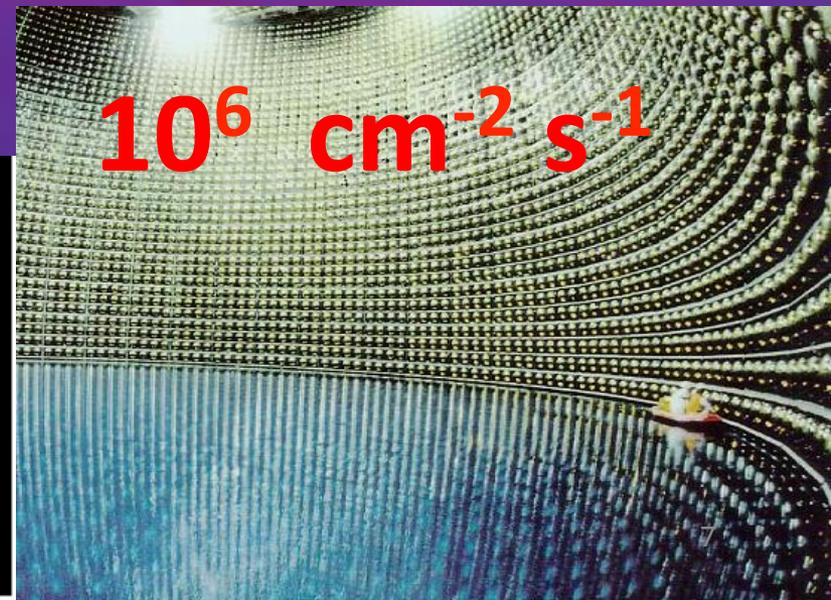
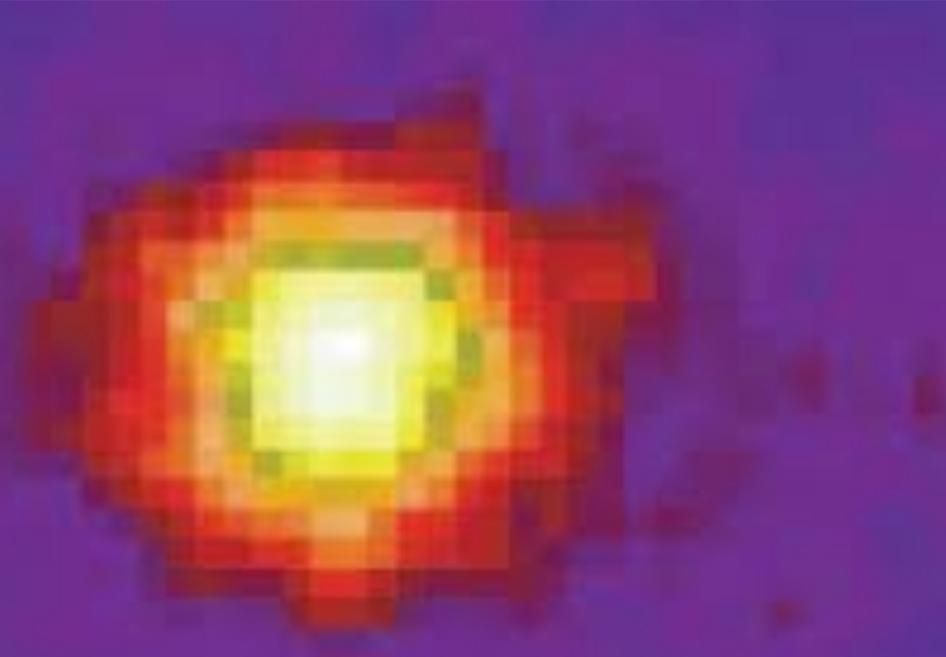
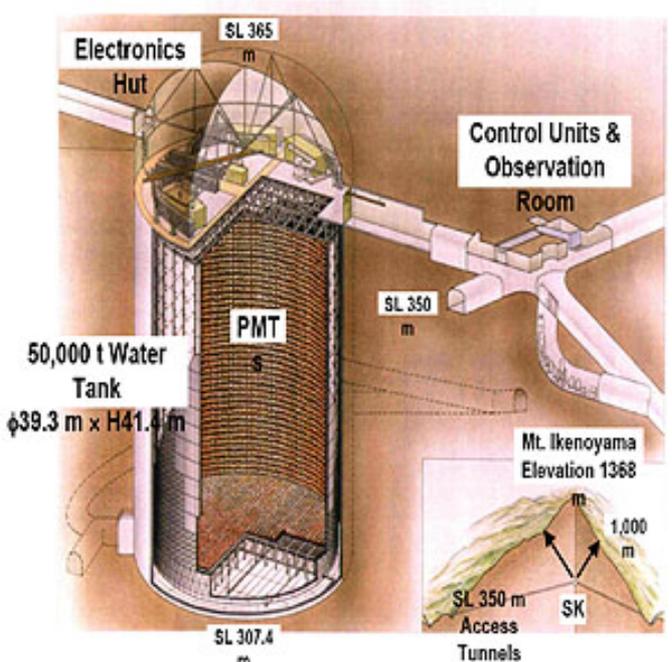
$n \rightarrow p + e + (\text{anti})\nu_e$

(típica reacción nuclear -beta)

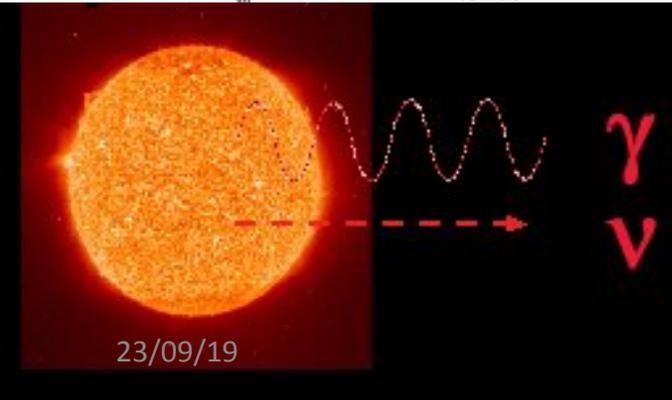
produciendo una nueva partícula
(Pauli, 1930)



Sol visto con Neutrinos



$10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$



Quarks/Leptones



neutrino

Protón

Neutrón

electrón

(uud)

(udd)



Materia ordinaria

La materia ordinaria está descrita por quarks u (up) d (down) y leptones (e, ν_e)

mass→	2.4 MeV
charge→	$\frac{2}{3}$
spin→	$\frac{1}{2}$
name→	u up

Quarks

4.8 MeV
$-\frac{1}{3}$
$\frac{1}{2}$
d down

Leptons

<2.2 eV
0
$\frac{1}{2}$
ν_e electron neutrino

0.511 MeV
-1
$\frac{1}{2}$
e electron

Quarks/Leptones

electrón

muón

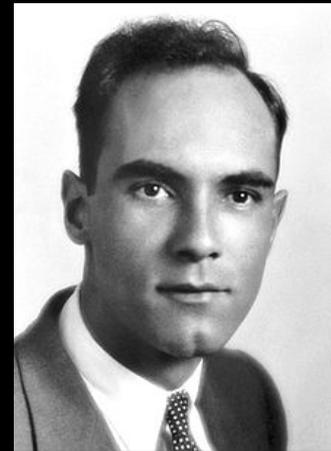
*un primo pesado del
electron*

Who ordered
that ?



I.I Rabi

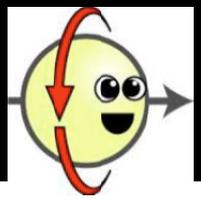
C. D. Anderson



(1936)

Quarks	mass → 2.4 MeV charge → $\frac{2}{3}$ spin → $\frac{1}{2}$ name → u up
	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down
Leptons	<2.2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e electron neutrino
	0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e electron
	105.7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ muon

Quarks/Leptones



neutrino

Protón

Neutrón

electrón

(uud)

(udd)

La materia ordinaria está descrita por la primera generación de quarks y leptones

Pero la Naturaleza ha decidido repetirse en TRES generaciones

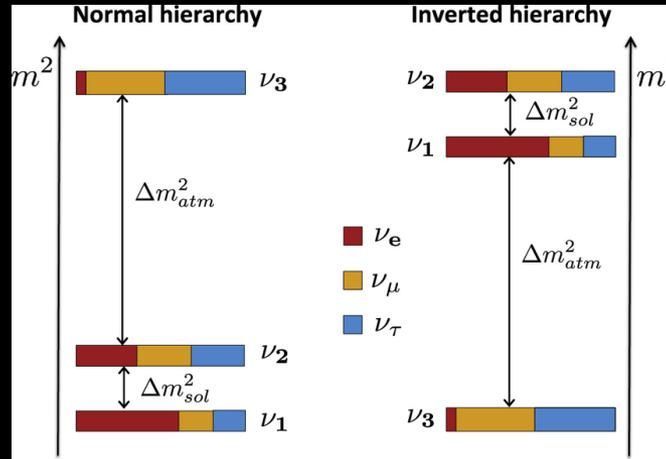
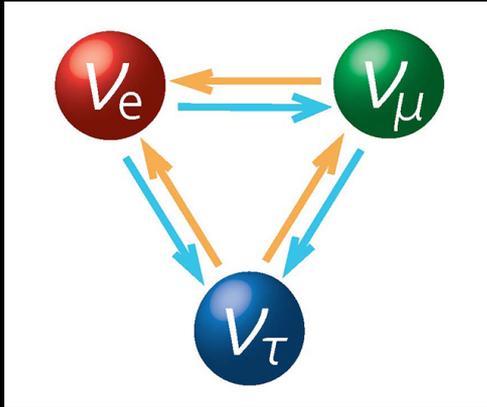


FERMIONES (ESPÍN = 1/2)

	I	II	III
mass→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
name→	u up	c charm	t top
Quarks	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	d down	s strange	b bottom
Leptons	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV
	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV
	-1	-1	-1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	e electron	μ muon	τ tau

Neutrinos

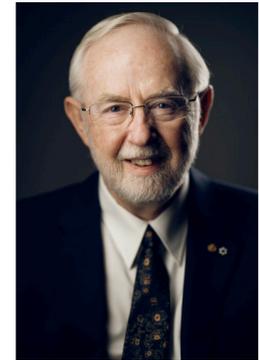
Los neutrinos son un campo de la física de partículas con grandes preguntas aún por responder



The Nobel Prize in Physics 2015



© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud
Takaaki Kajita
Prize share: 1/2



© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud
Arthur B. McDonald
Prize share: 1/2

Sabemos que los neutrinos oscilan (mecanica cuántica)
→ tienen masa ($\nu_e < 2 \text{ eV}$)

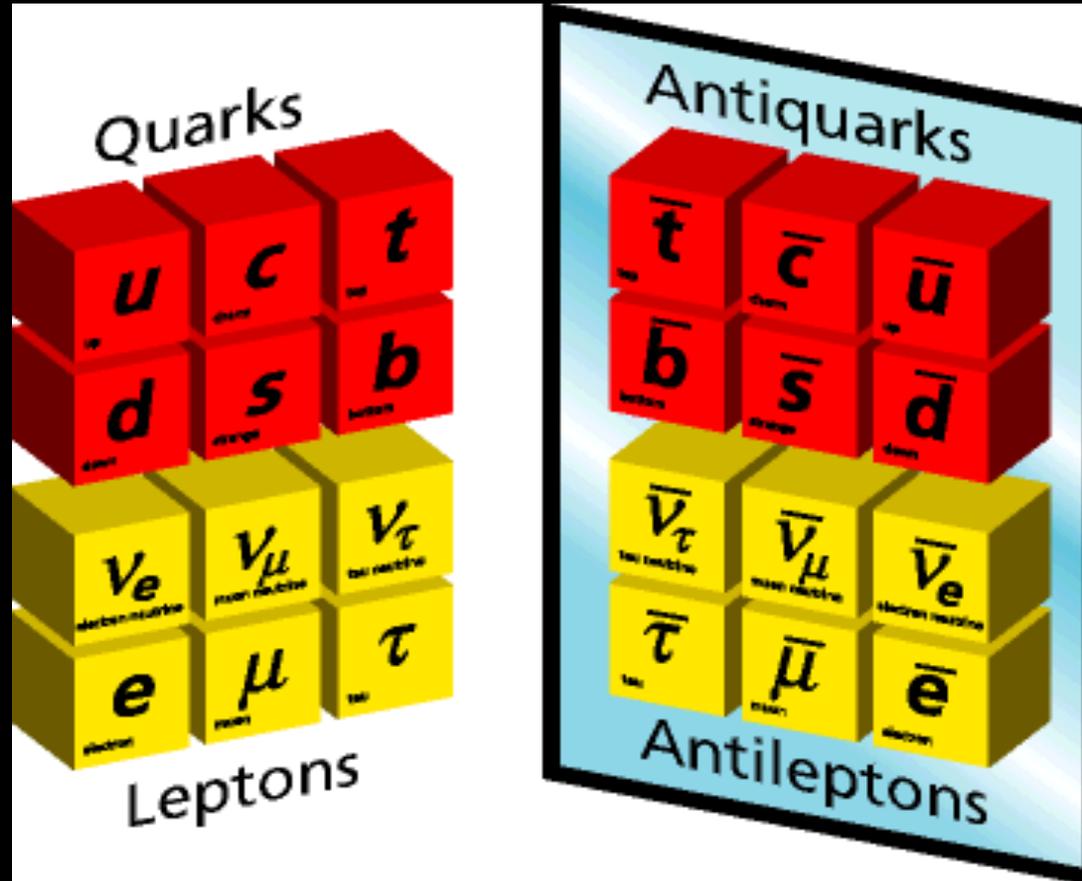
Aún no tenemos un valor absoluto de sus masas y no sabemos sus jerarquías

No sabemos si son su propia antipartícula

No sabemos si debemos esperar más neutrinos (sterile neutrinos)

No sabemos por qué sus masas son tan pequeñas

Antimateria



Toda partícula tiene su antipartícula,
de igual masa pero números cuánticos opuestos

electrón, e^- : $q(e^-) = -1$, $spin = -1/2$, $m(e^-) = 9.1 \times 10^{-28}$ gr.

23/09/19
positrón, e^+ : $q(e^+) = +1$, $spin = +1/2$, $m(e^+) = 9.1 \times 10^{-28}$ gr.

Un ejemplo: El positrón



C. Anderson (1936)

Cloud Chamber

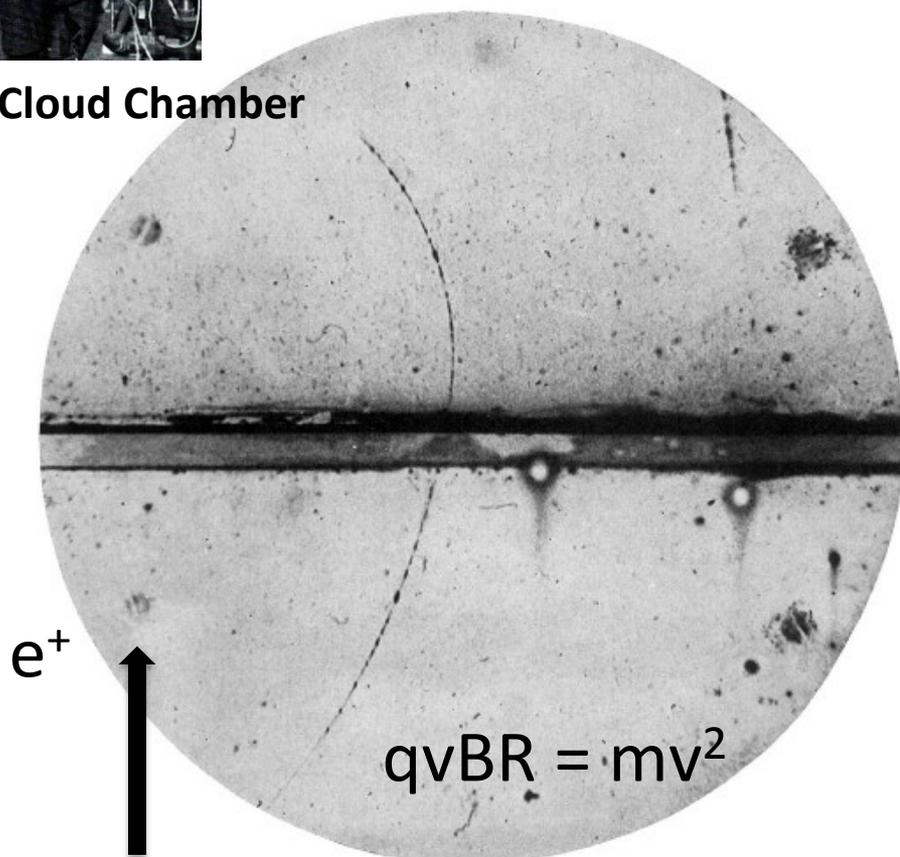
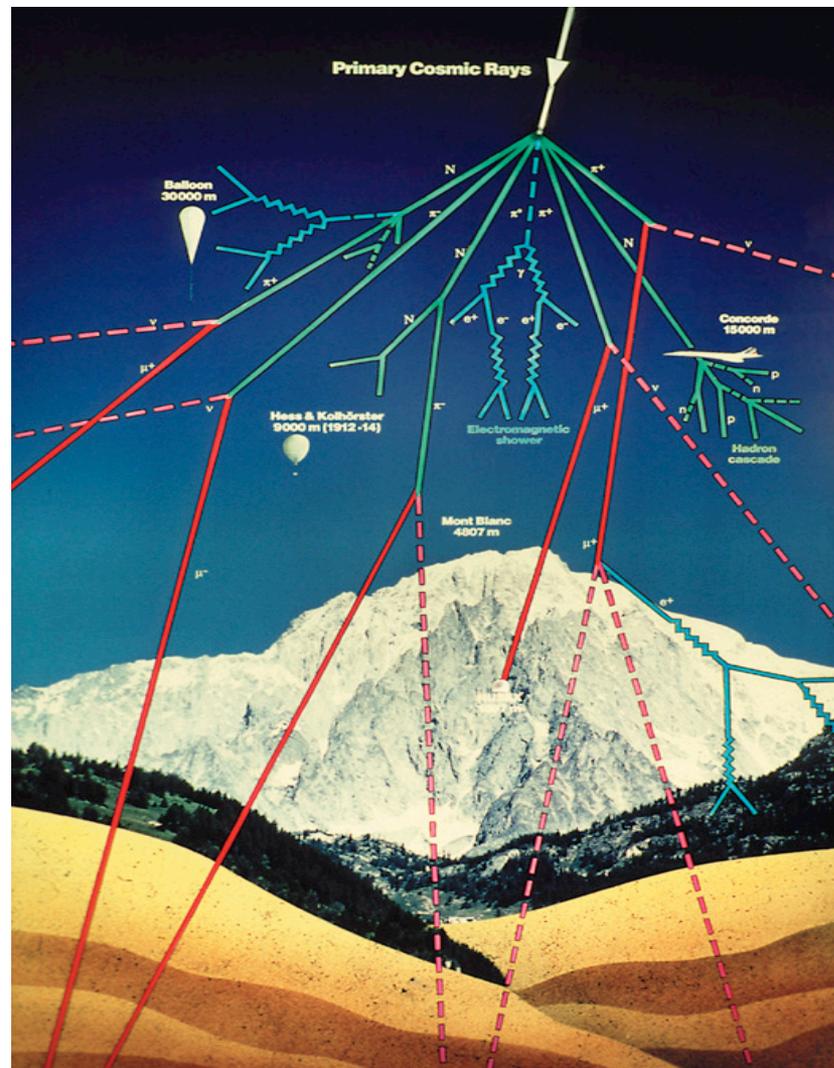


FIG. 1. A 63 million volt positron ($H\rho = 2.1 \times 10^4$ gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ($H\rho = 7.5 \times 10^4$ gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.

consistente con una partícula como el electrón
pero con carga positiva.....



Búsqueda de partículas en
rayos cósmicos

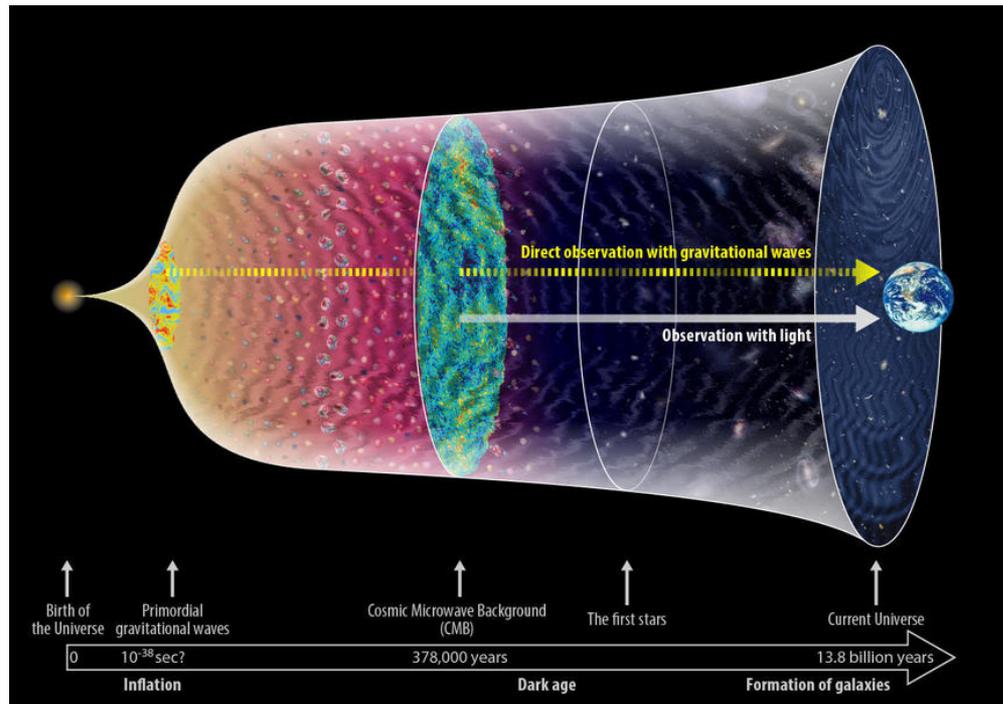


¿Qué ocurrió con la anti-materia?

**El universo actual está
dominado por materia...**

Simetría materia - antimateria

En el Big Bang se asume se produjo misma cantidad de materia y antimateria
Tras 1s el Universo se ha enfriado/expandido de tal modo que el universo estaria formado por fotones (γ), leptones, protones y neutrones (Bariones)



Un cálculo simple indicaría

$$N_B/N_\gamma = N_{\text{anti-B}}/N_\gamma \rightarrow 10^{-18}$$

Experimentalmente

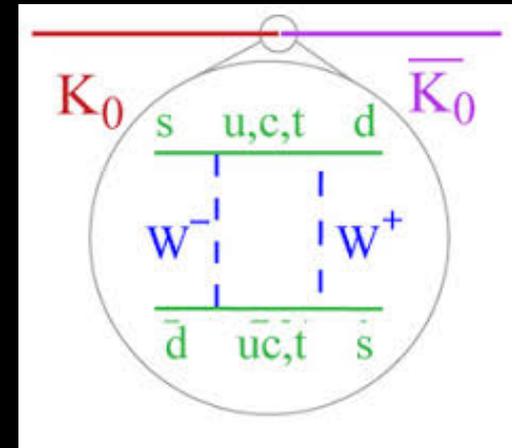
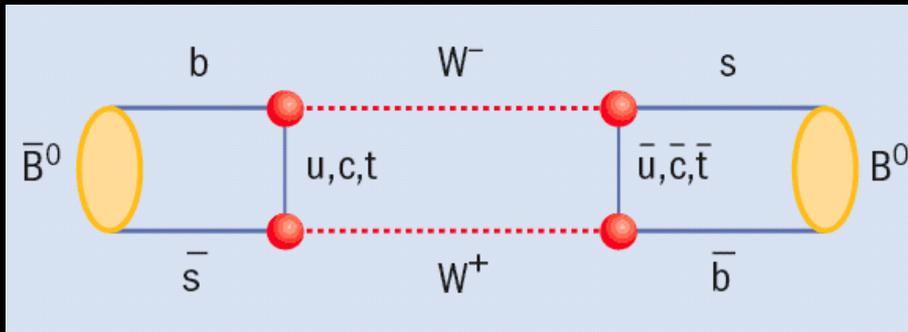
$$N_B/N_\gamma \rightarrow 10^{-9} \text{ y } N_{\text{anti-B}}/N_B < 10^{-4}$$

?

En física de partículas hay procesos que favorecen materia vs antimateria (CP-violation) pero no parece suficiente para explicar la desaparición de la antimateria en el Cosmos

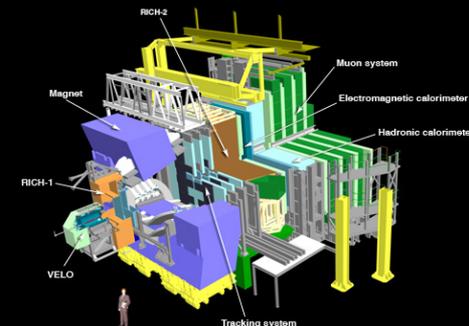
Oscilaciones materia-antimateria

Fenómeno puramente cuántico que da acceso a la búsqueda de nuevas fuentes de asimetría materia-antimateria (nueva física ?)



→ Estos procesos contienen una cierta dosis de asimetría CP (¿Hay otras fuentes?)

Encontrarlas es la misión principal de uno de los experimentos del LHC → LHCb



El concepto de masa

Masa según Newton...

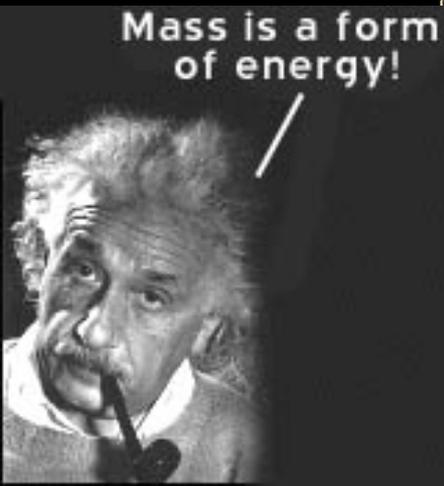
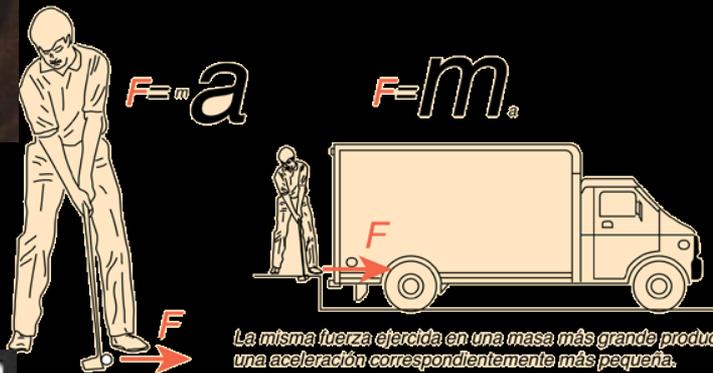
Masa según Einstein....



Masa

$$F = M a$$

I. Newton



A. Einstein

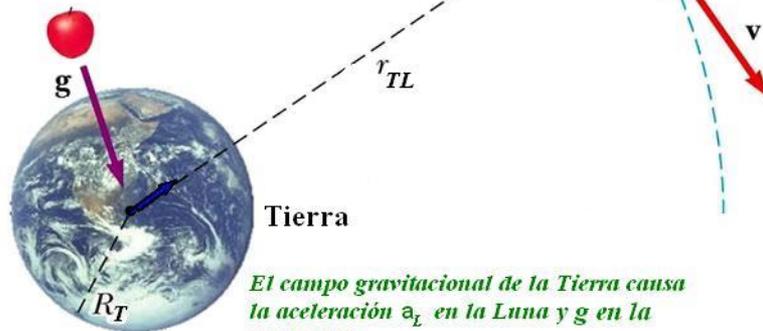
$$E = M c^2$$

La masa como una forma de energía

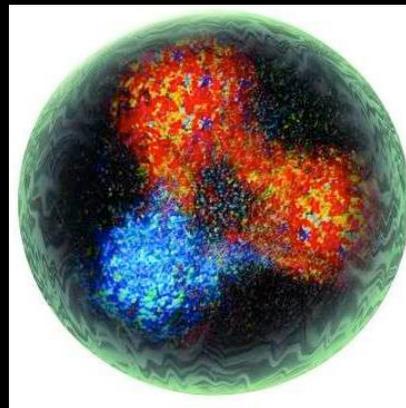
23/09/19

Ley de Gravitación Universal de Newton

$$F_G = \frac{G m_T m_L}{r_{TL}^2}$$



El campo gravitacional de la Tierra causa la aceleración a_L en la Luna y g en la manzana.



Protón (uud)

Sólo 10% de la masa del protón Se puede atribuir a los quarks ... el resto es energía de enlace..

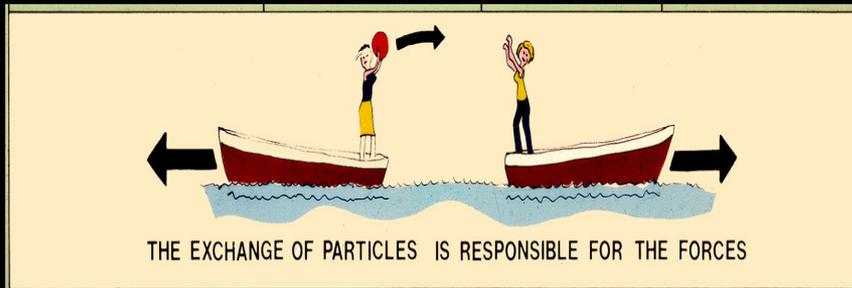
¿Cómo interacciona la materia?

...visión moderna ...

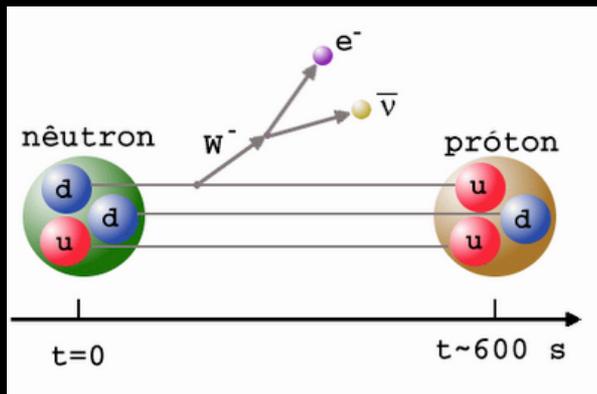
4 Interacciones

La física moderna es el lenguaje de la Teoría Cuántica de Campos

Las interacciones entre partículas se entienden como el "intercambio" de una partícula mediando en la interacción



Cuidado!... Esta analogía sólo sirve para fuerzas repulsivas.....



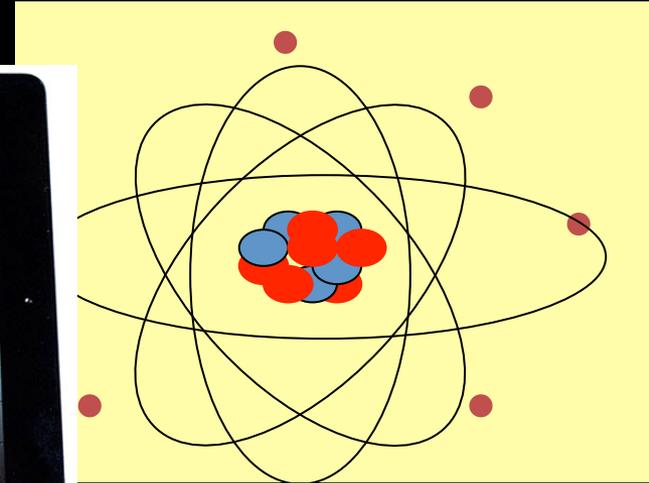
FERMIONES (ESPÍN = 1/2)

Bosones (ESPÍN = 1)

	I	II	III	
mass→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge→	2/3	2/3	2/3	0
spin→	1/2	1/2	1/2	1
name→	u up	c charm	t top	γ photon
	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	-1/3	-1/3	-1/3	0
	1/2	1/2	1/2	1
Quarks	d down	s strange	b bottom	g gluon
	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV
	0	0	0	0
	1/2	1/2	1/2	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z⁰ weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	±1
	1/2	1/2	1/2	1
Leptons	e electron	μ muon	τ tau	W[±] weak force

Bosons (Forces)

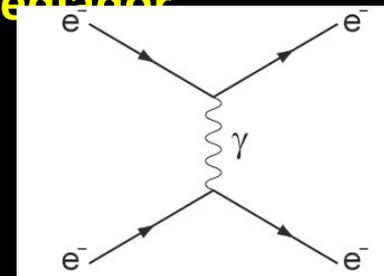
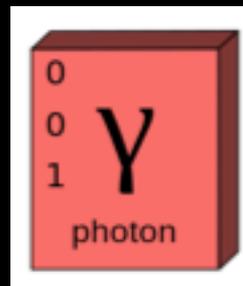
Fuerza I : Electromagnetismo



Fuerza atractiva o repulsiva
Presente en toda nuestra tecnología/química

Macroscópicamente → Ecuaciones de Maxwell
A nivel sub-atómico → Electro-dinámica
cuántica (QED)... con fotones (luz) como mediador

...y QED es la base de la
revolución tecnológica del siglo XX

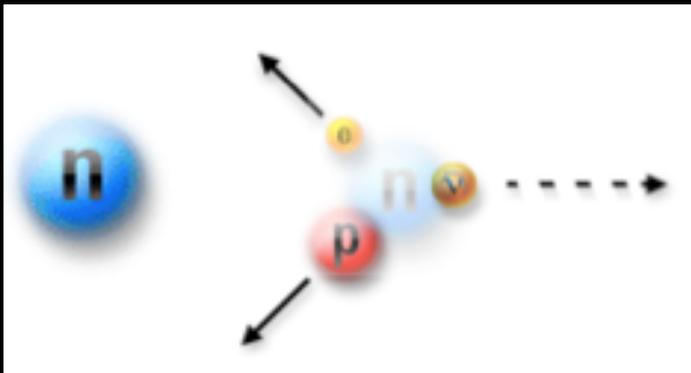
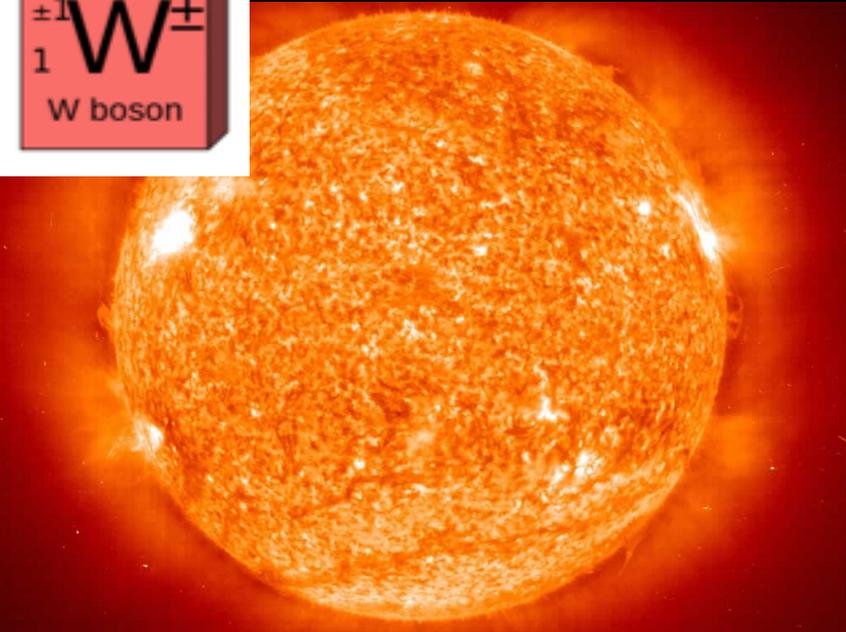
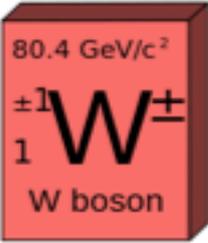
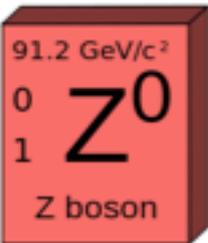


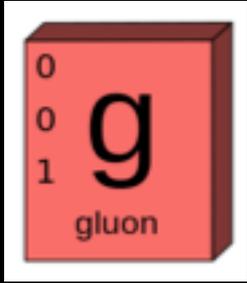
Fuerza II: Débil

Mediadores
muy pesados

Responsable de desintegración β
Gobierna la interacción de neutrinos

Relevante a nivel sub-atómico
Proceso fundamental en las estrellas
Usado en terapia médica

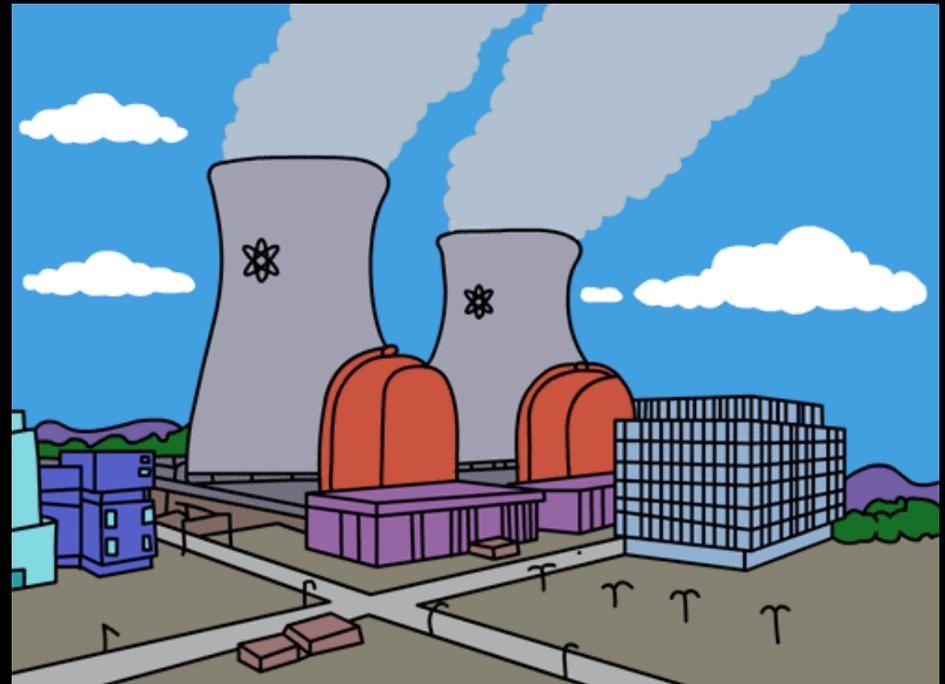
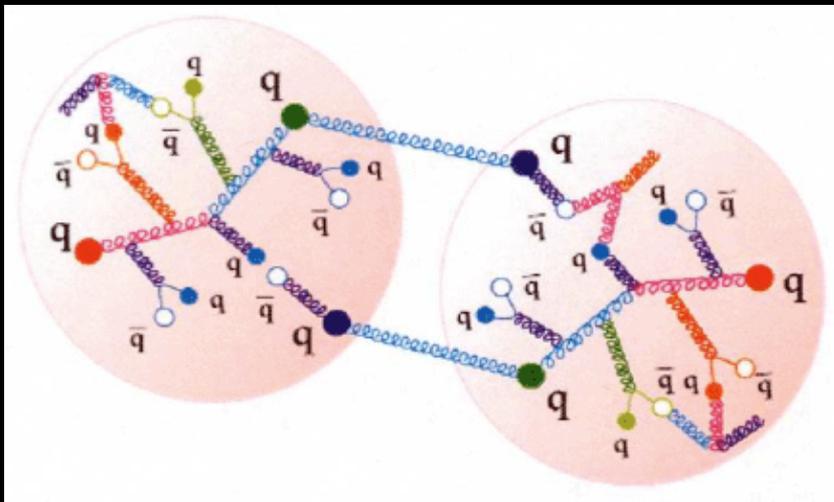
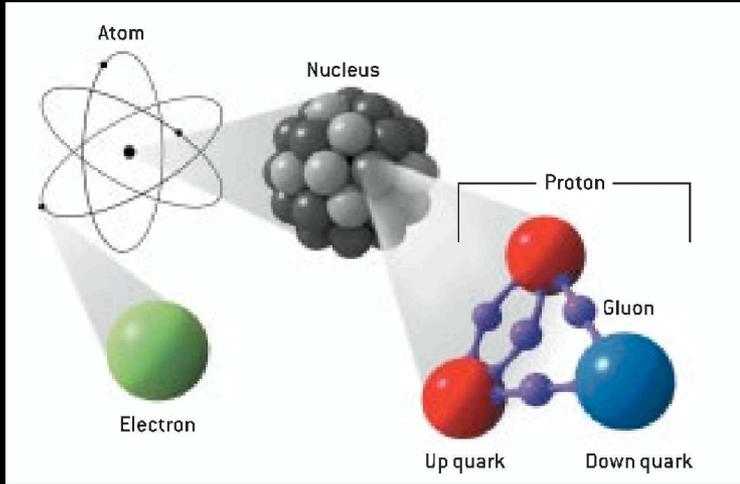




Fuerza III: Fuerte

Fuerza Fuerte (atractiva entre quarks)
Confina los quarks dentro de hadrones
Garantiza la estabilidad de los núcleos

La raiz de la física nuclear (fisión/fusión)





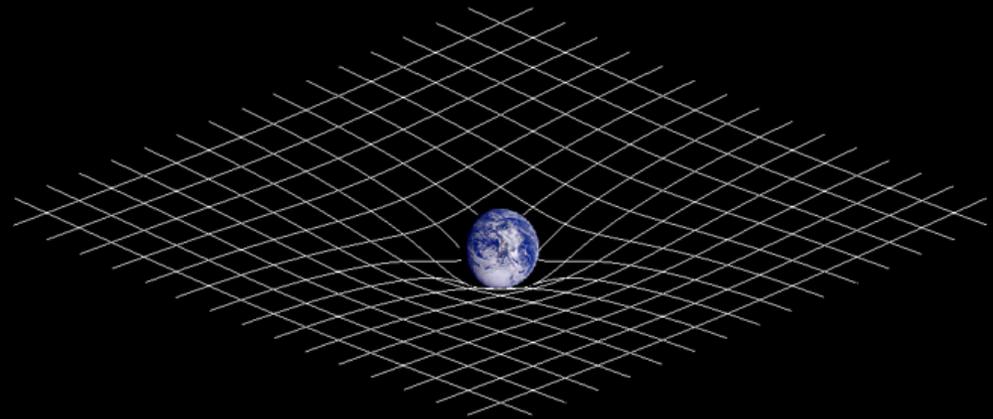
Fuerza IV: Gravitación

Gravitación (atractiva entre masas)
Relevante sólo a nivel macroscópico
(aún sin implementación cuántica)

Nos mantiene pegados a la tierra

Dictada por la ley de Newton

**La Cosmología basada en la teoría
geométrica de la gravedad de Einstein**



Bosones (Mediadores)

1

Strong

Gluons (8)



Quarks



Mesons



Baryons

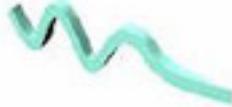


Nuclei

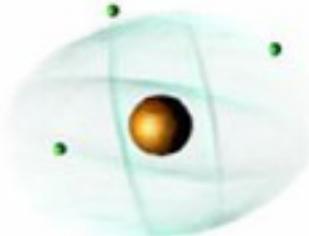


Electromagnetic

Photon



Atoms



Light
Chemistry
Electronics

10^{-2}

10^{-40}

Gravitational

Graviton ?



Solar system



Galaxies
Black holes

Weak

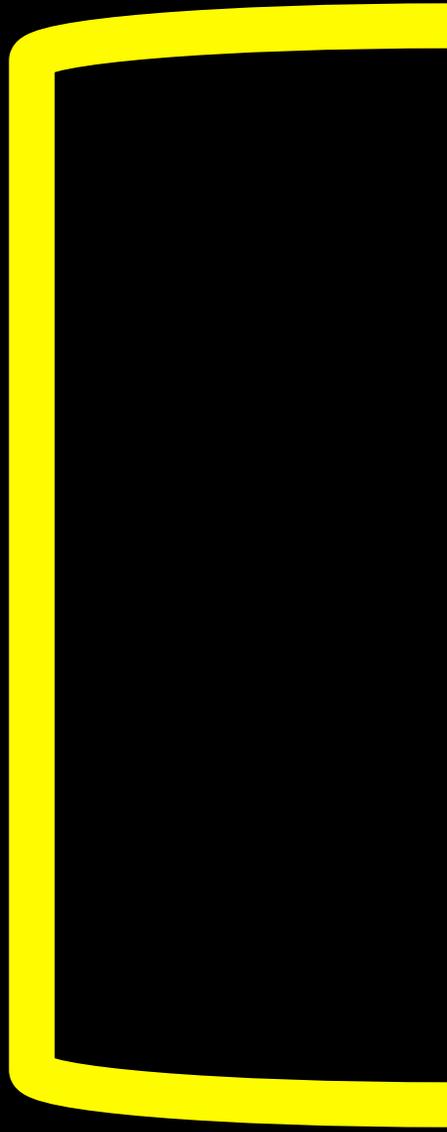
Bosons (W,Z)



Neutron decay
Beta radioactivity
Neutrino interactions
Burning of the sun



10^{-5}





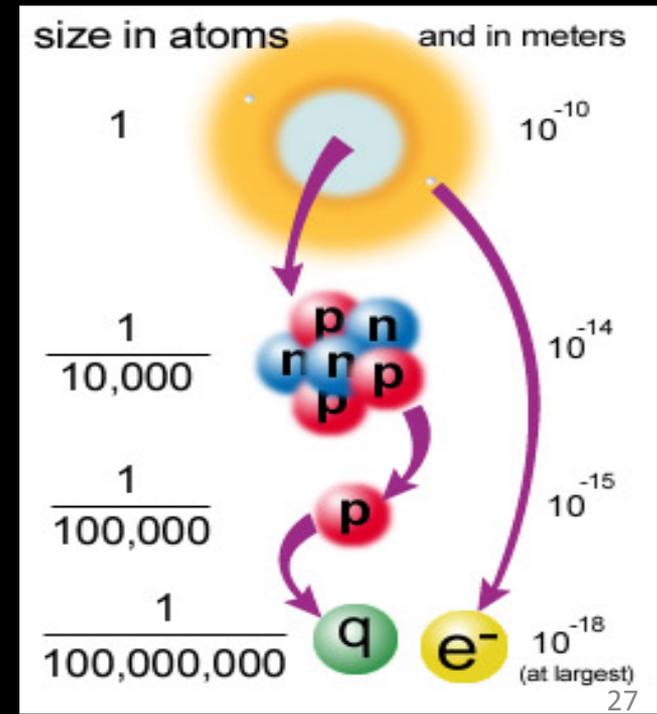
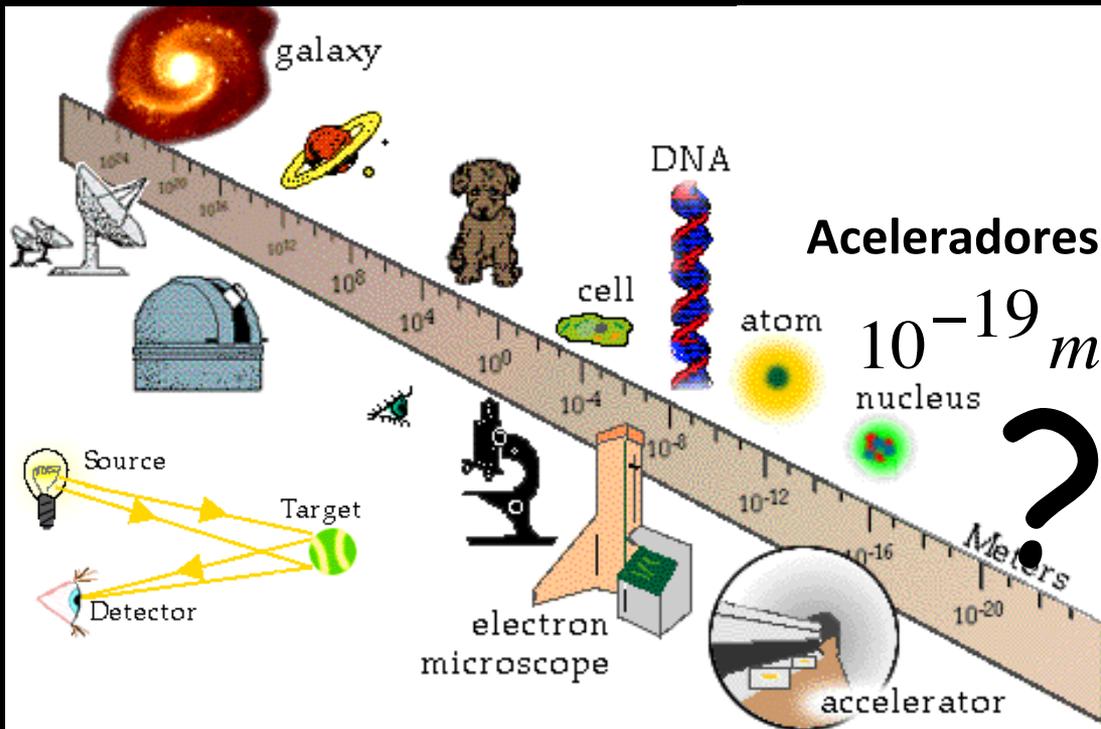
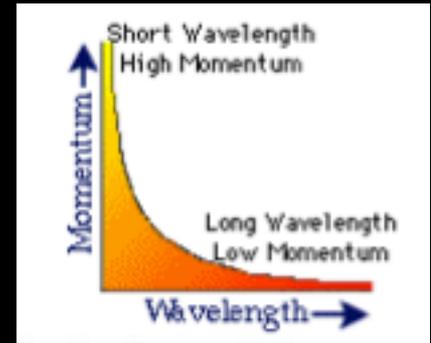
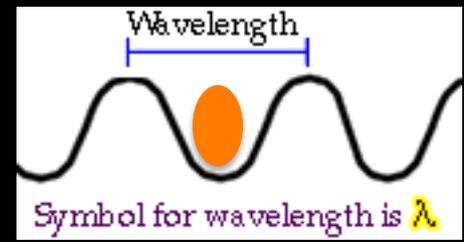
Microscopios

Dualidad partícula - onda

$$E = \hbar \nu$$

$\hbar \rightarrow$ Planck const.

$$\lambda = \hbar / |p|$$



más energía \rightarrow miramos más cerca



10^{-35} m
 10^{19} GeV

10^{-32} m
 10^{16} GeV

10^{-18} m
 10^2 GeV

10^{-16} m
1 GeV

10^{-15} m
1 MeV

10^{-10} m
10 eV

The Nobel Prize in Physics 2013



© Nobel Media AB. Photo: A. Malmqvist
François Englert
Prize share: 1/2

© Nobel Media AB. Photo: A. Malmqvist
Peter W. Higgs
Prize share: 1/2

The Nobel Prize in Physics 1999



Photo from the Nobel Foundation archive
Gerardus 't Hooft
Prize share: 1/2

Photo from the Nobel Foundation archive
Martinus J.G. Veltman
Prize share: 1/2

Grand Unification

SUSY?

Electroweak Model

Standard model

QCD

QED Electro magnetism
Maxwell

Weak Theory

The Nobel Prize in Physics 1938



Photo from the Nobel Foundation archive
Enrico Fermi
Prize share: 1/1

The Nobel Prize in Physics 2004



Photo from the Nobel Foundation archive
David J. Gross
Prize share: 1/3



Photo from the Nobel Foundation archive
H. David Politzer
Prize share: 1/3



Photo from the Nobel Foundation archive
Frank Wilczek
Prize share: 1/3

Magnetism

Long range

Electricity

Fermi

Weak Force

Short range

Nuclear Force

Short range

Kepler Celestial Gravity

Long range

Universal Gravitation
Einstein, Newton

Terrestrial Gravity

Galilei Gravity

Quantum Gravity

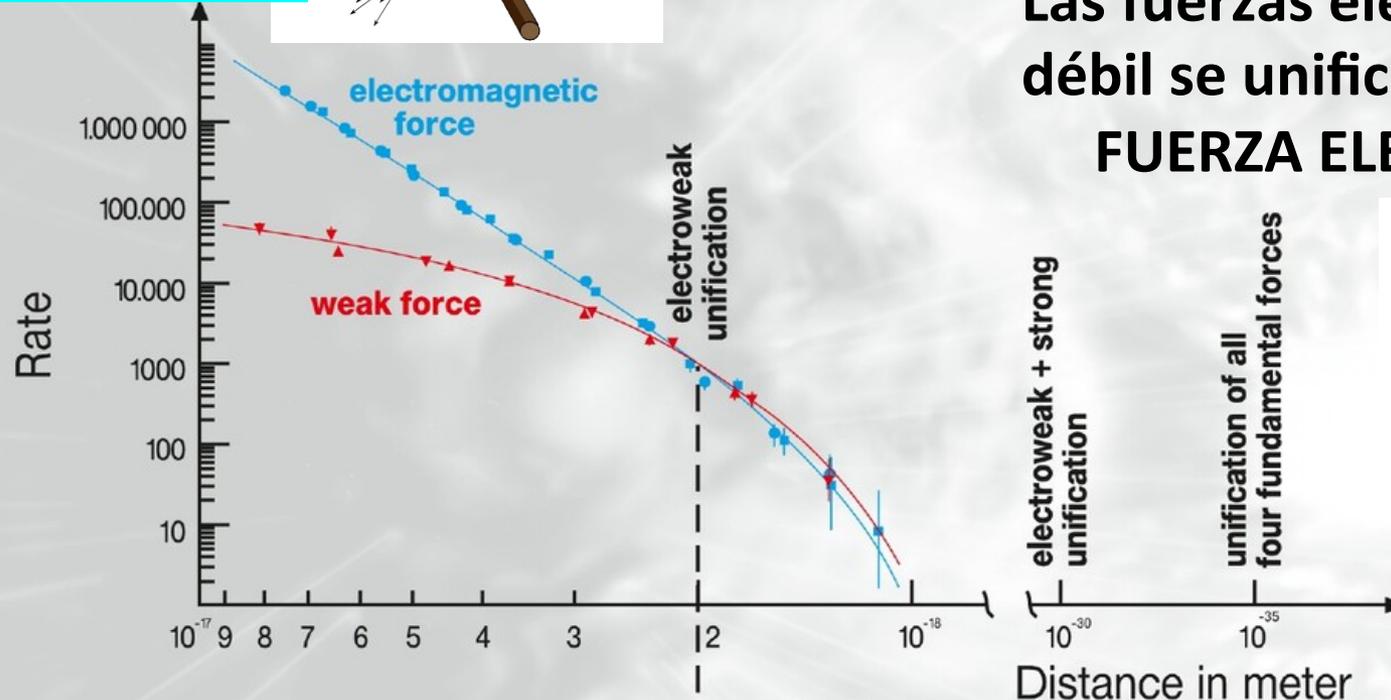
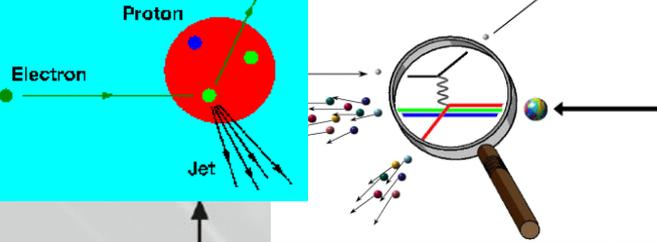
?

Super Unification

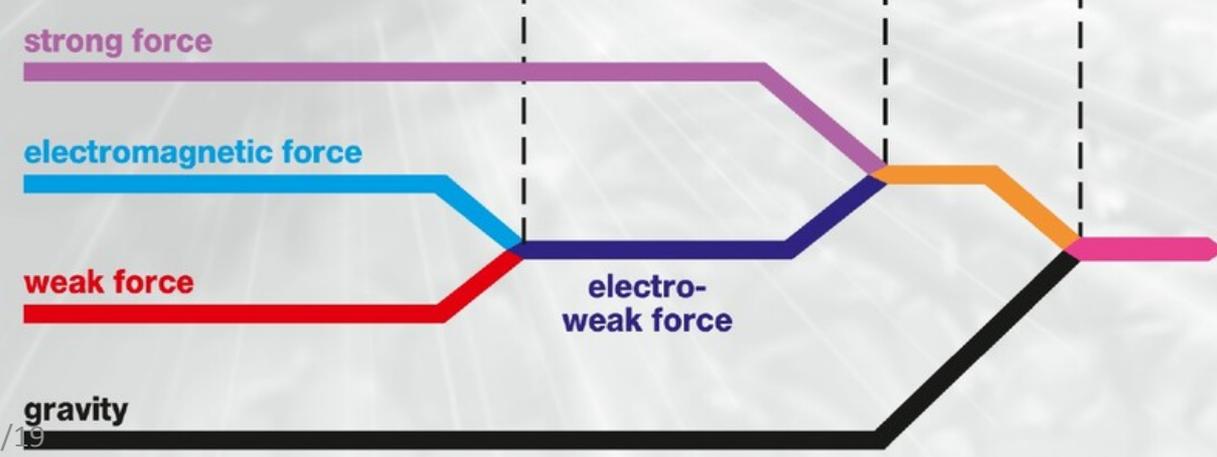
No tenemos una teoría cuántica de la gravedad formalmente válida

¿Unificación de fuerzas?

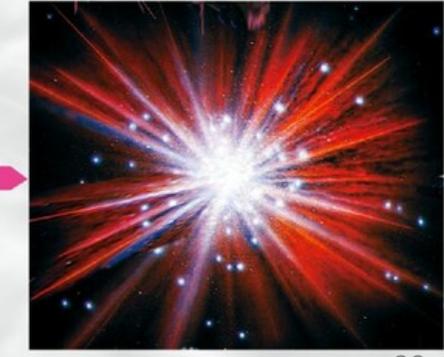
Las fuerzas electromagnética y débil se unifican en la llamada **FUERZA ELECTRODÉBIL**



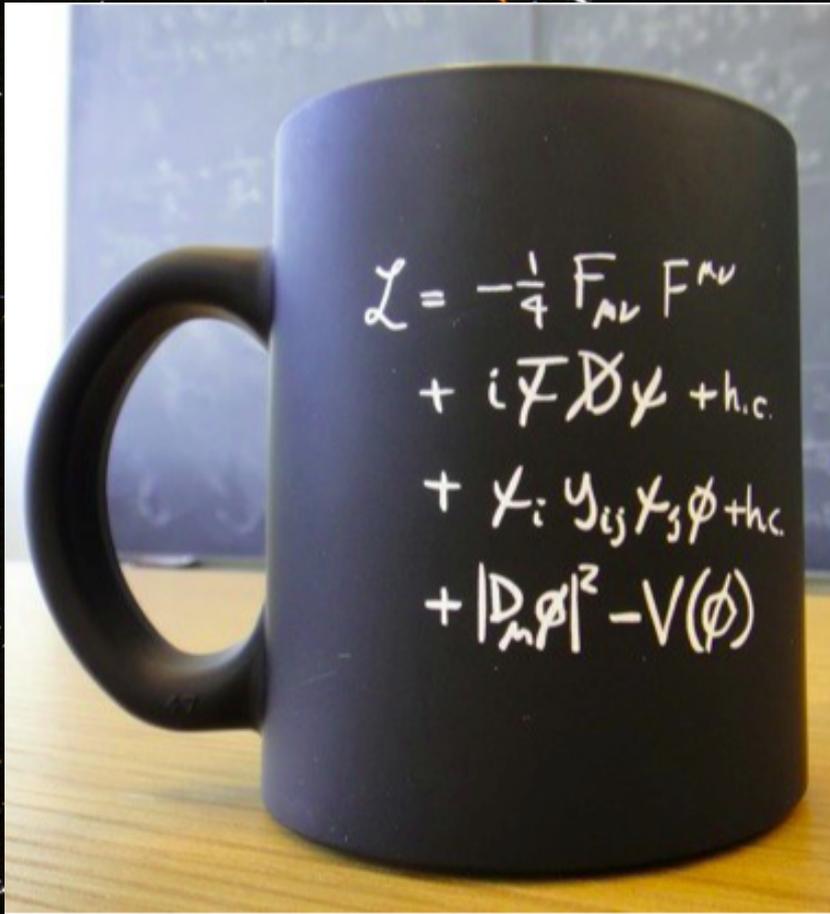
0 0 1 γ photon	91.2 GeV/c ² 0 1 Z^0 Z boson
	80.4 GeV/c ² ± 1 1 W^{\pm} W boson



big bang



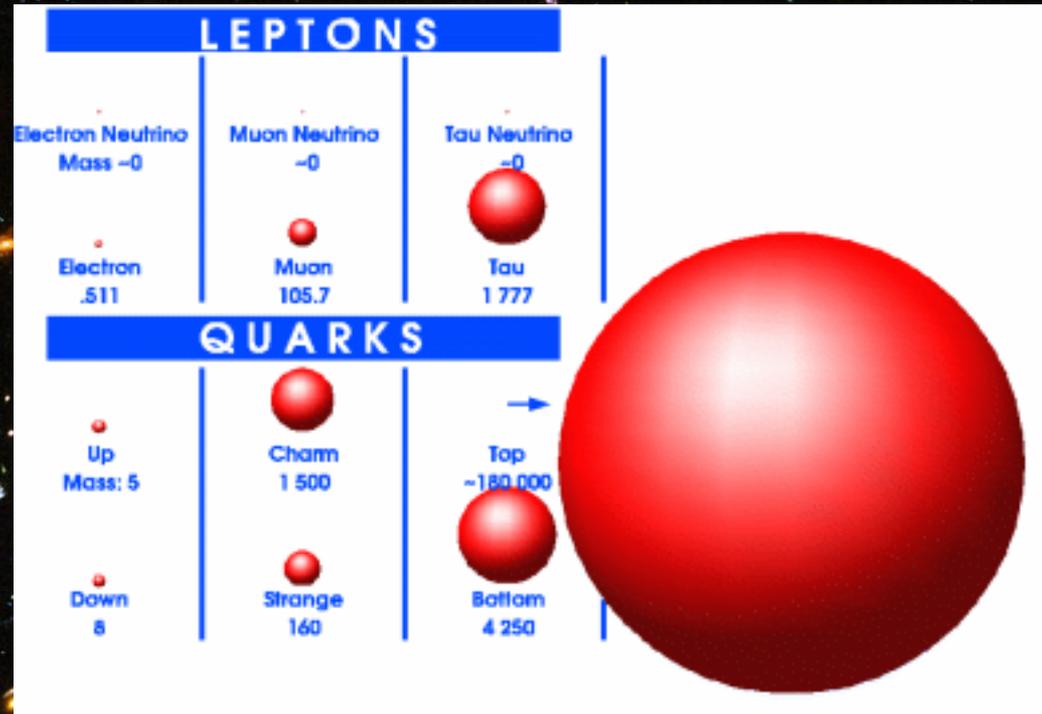
Una Teoría Elegante...



	2.4 MeV/c ² $\frac{2}{3}$ u $\frac{1}{2}$ up	1.27 GeV/c ² $\frac{2}{3}$ c $\frac{1}{2}$ charm	171.2 GeV/c ² $\frac{2}{3}$ t $\frac{1}{2}$ top	0 0 γ 1 photon
Quarks	4.8 MeV/c ² $-\frac{1}{3}$ d $\frac{1}{2}$ down	104 MeV/c ² $-\frac{1}{3}$ s $\frac{1}{2}$ strange	4.2 GeV/c ² $-\frac{1}{3}$ b $\frac{1}{2}$ bottom	0 0 g 1 gluon
	<2.2 eV/c ² 0 ν_e $\frac{1}{2}$ electron neutrino	<0.17 MeV/c ² 0 ν_μ $\frac{1}{2}$ muon neutrino	<15.5 MeV/c ² 0 ν_τ $\frac{1}{2}$ tau neutrino	91.2 GeV/c ² 0 Z⁰ 1 Z boson
	0.511 MeV/c ² -1 e $\frac{1}{2}$ electron	105.7 MeV/c ² -1 μ $\frac{1}{2}$ muon	1.777 GeV/c ² -1 τ $\frac{1}{2}$ tau	80.4 GeV/c ² ±1 W[±] 1 W boson
Leptons				Gauge bosons

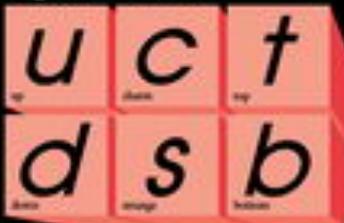
... escrita ignorando que las partículas tienen masa...

... en clara contradicción con la Naturaleza...



¿Origen de la Masa?

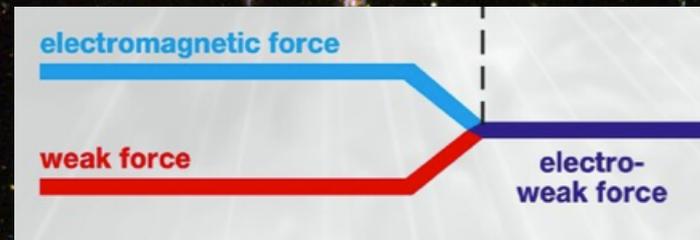
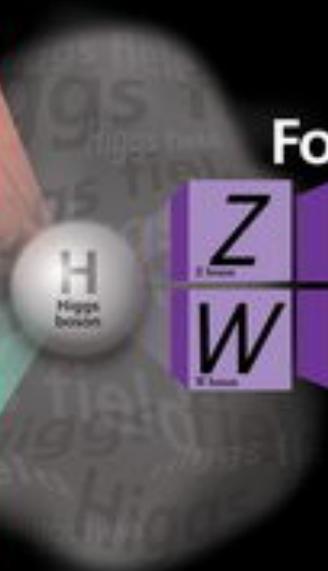
Quarks

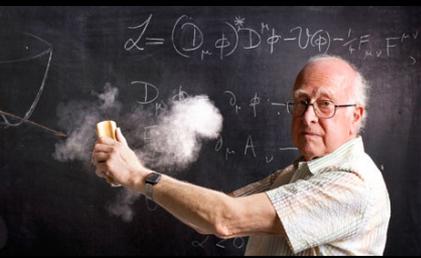


Forces



Leptons





postula la existencia de un campo de Higgs que interacciona con las partículas y les viste con masa. Permite explicar el “mecanismo de rotura electrodébil”



Peter Higgs et al.,
(1964)

H

$$m_\gamma = 0$$

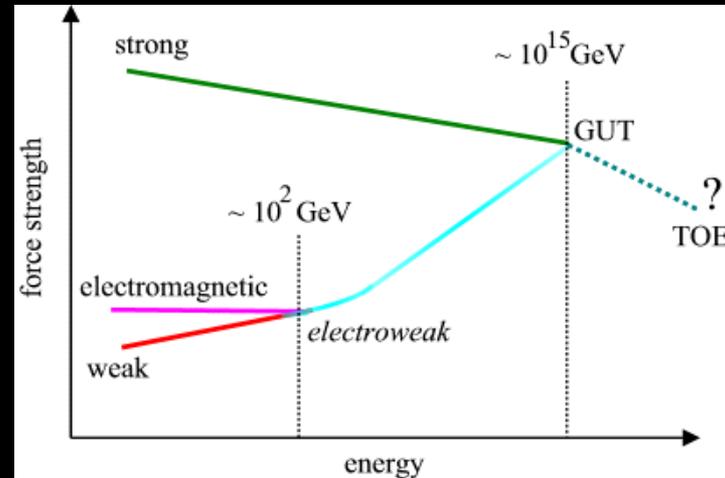
$$m_W = 80 \text{ GeV}$$

$$m_Z = 91 \text{ GeV}$$

Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name→	u up	c charm	t top	γ photon
Quarks	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$	104 MeV $-\frac{1}{3}$	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$	0
	d down	s strange	b bottom	0
	g gluon			1
Leptons	<2.2 eV 0	<0.17 MeV 0	<15.5 MeV 0	91.2 GeV
	$\frac{1}{2}$ ν_e electron neutrino	$\frac{1}{2}$ ν_μ muon neutrino	$\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutrino	0
	0.511 MeV -1	105.7 MeV -1	1.777 GeV -1	± 1
	$\frac{1}{2}$ e electron	$\frac{1}{2}$ μ muon	$\frac{1}{2}$ τ tau	1
			W^\pm weak force	

Bosons (Forces)



Un campo de Higgs lleva asociado un bosón de Higgs

El campo de Higgs

$$\varphi_0 \neq 0$$

El campo de Higgs llena todo el universo

Interacción con el campo de Higgs



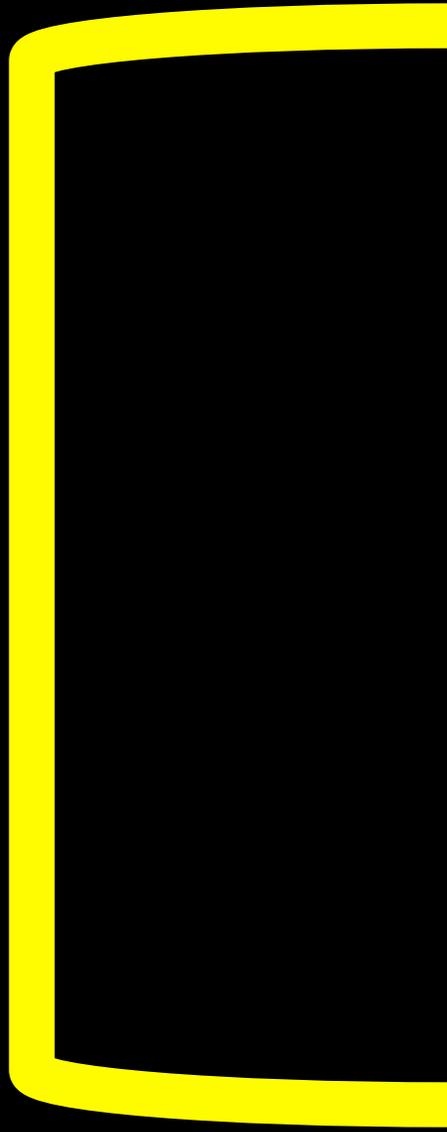
El bosón de Higgs



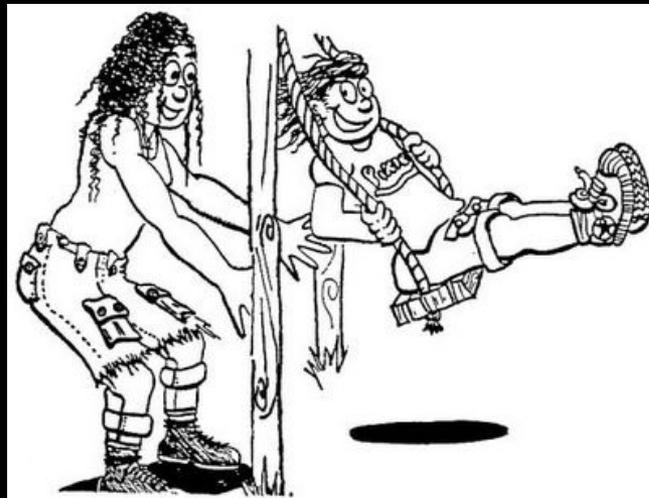
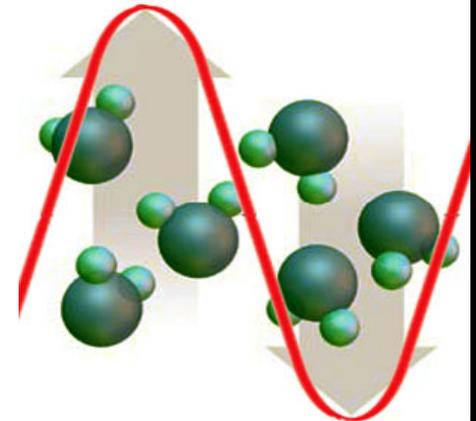
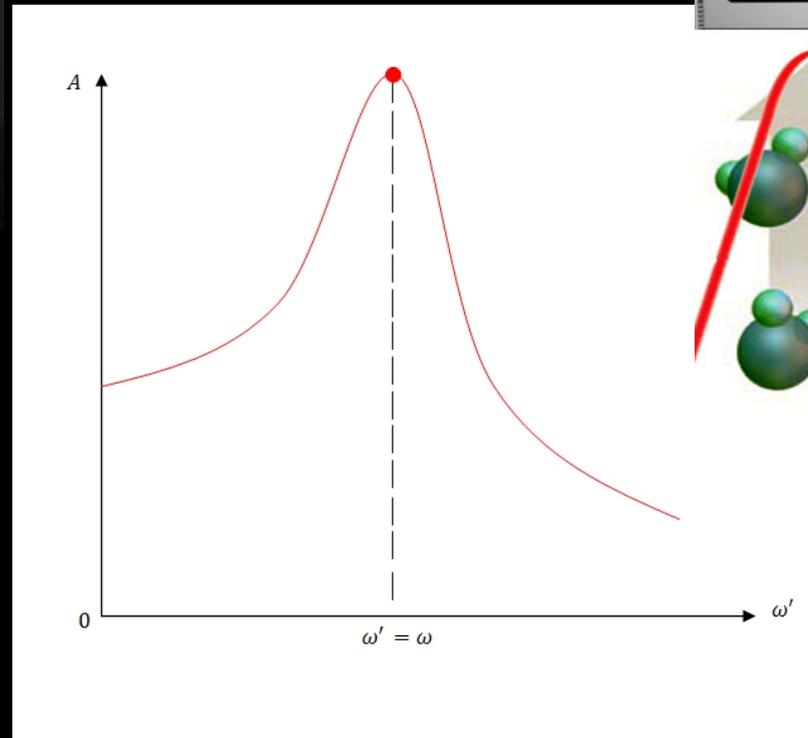
El bosón de Higgs !

Los experimentos....

El descubrimiento !!!!

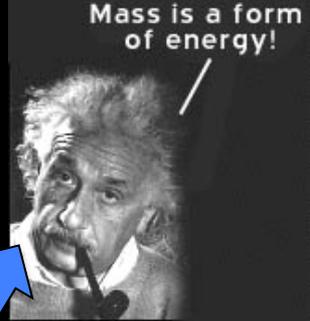


Resonancias en la vida diaria



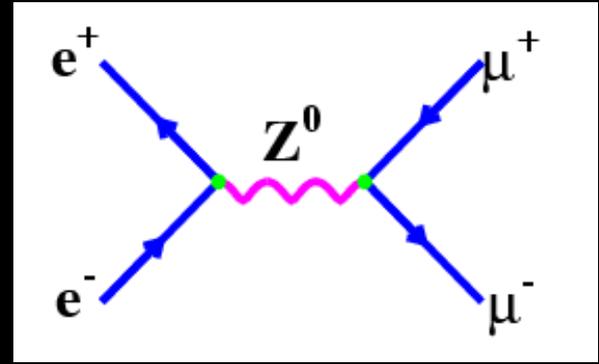
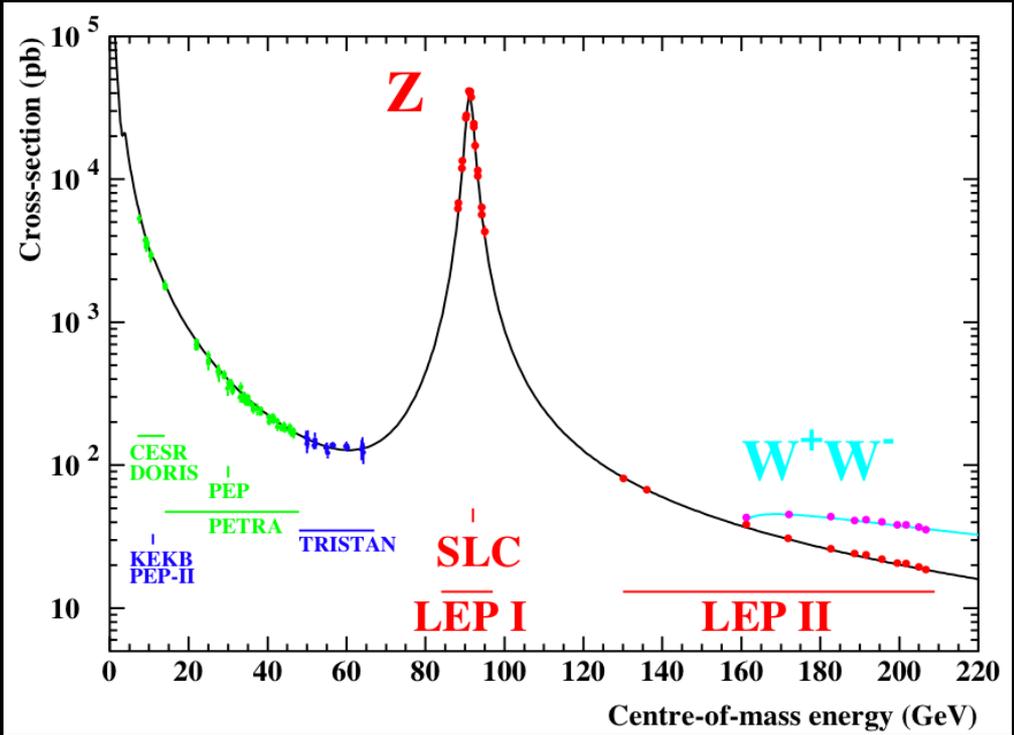
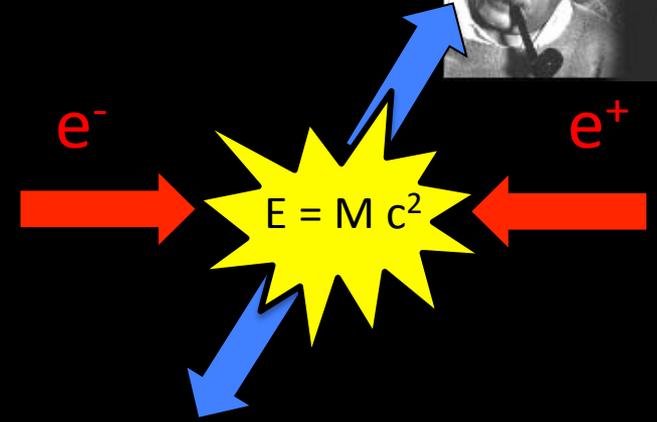
la absorción de energía (o la amplitud del movimiento) se maximizan cuando la frecuencia del impulso externo y la frecuencia del oscilador coinciden...

Resonancias



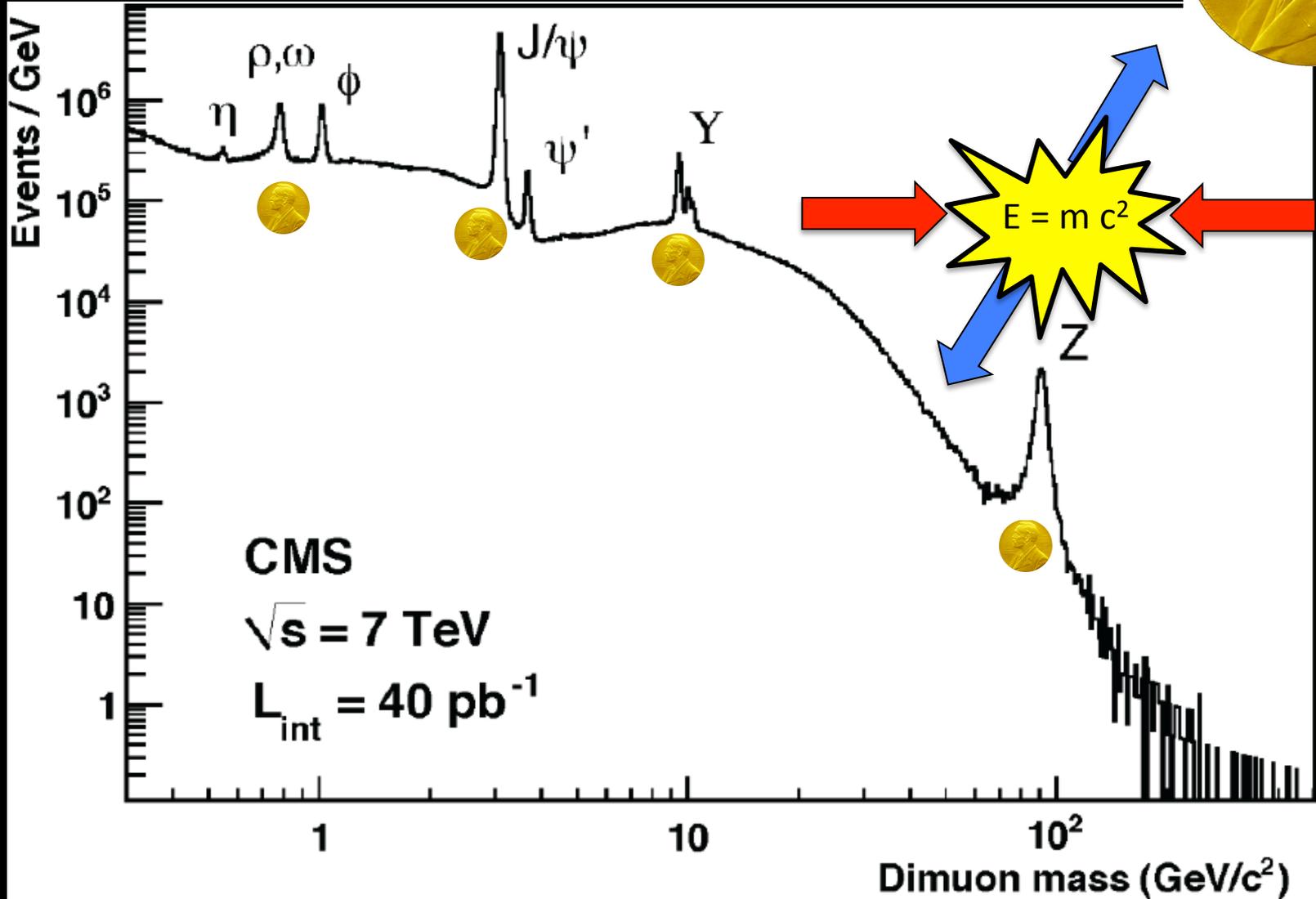
Partículas y (anti)partículas se aniquilan produciendo energía pura. Esa energía se puede transformar en otros tipos de partículas !!!!!

Si la energía coincide con la masa de una partícula se produce un fenómeno resonante (picos) !

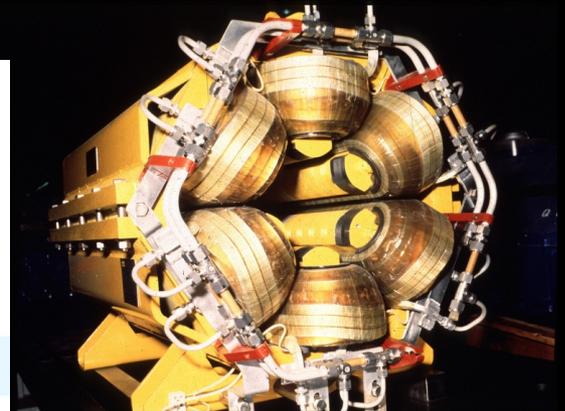
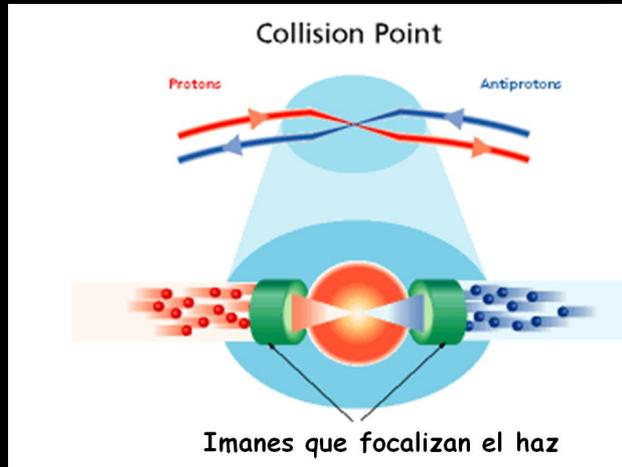
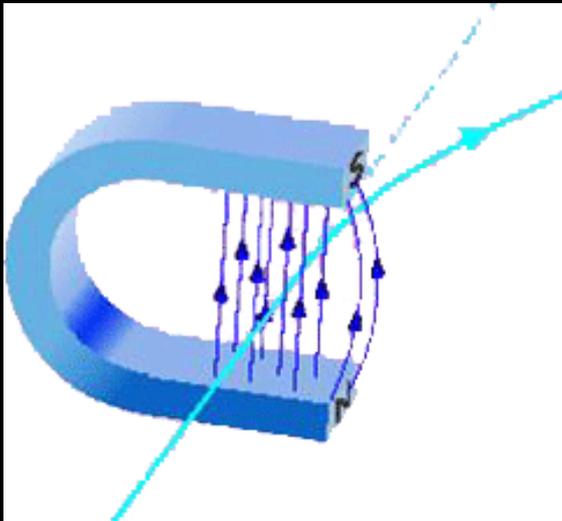
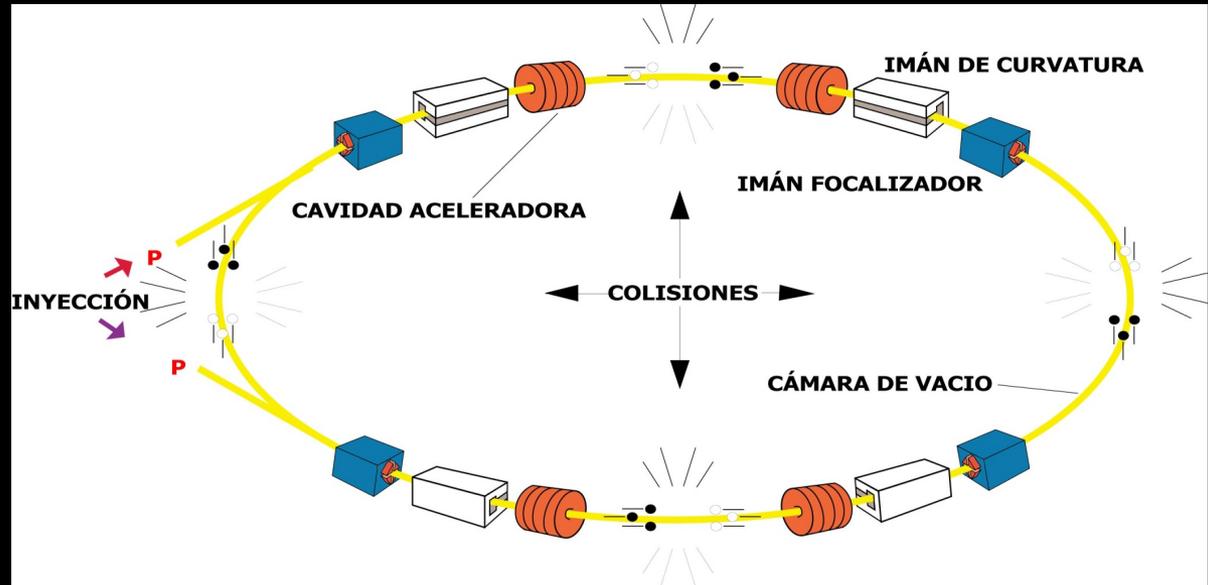
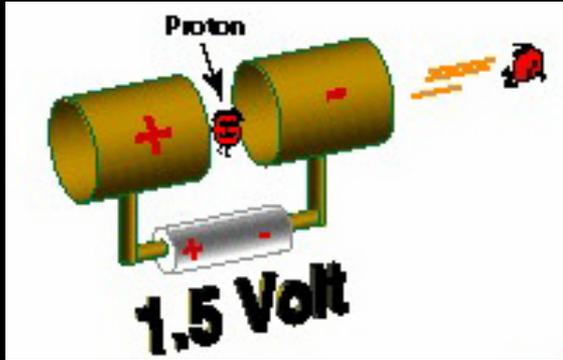


Así se descubren nuevas partículas

Resonancias



Acelerando Partículas...





EL LHC

CERN (Geneva) LHC across the France-Switzerland border

Anillo de 27 Km a 100 m de profundidad
1232 high-tech dipolos magnéticos superconductores
(a 1.8 K ... el lugar más frío del Universo)

protón – protón 13 TeV ($13 \cdot 10^{12}$ eV)
(a 99.9999999% de la velocidad de la luz)

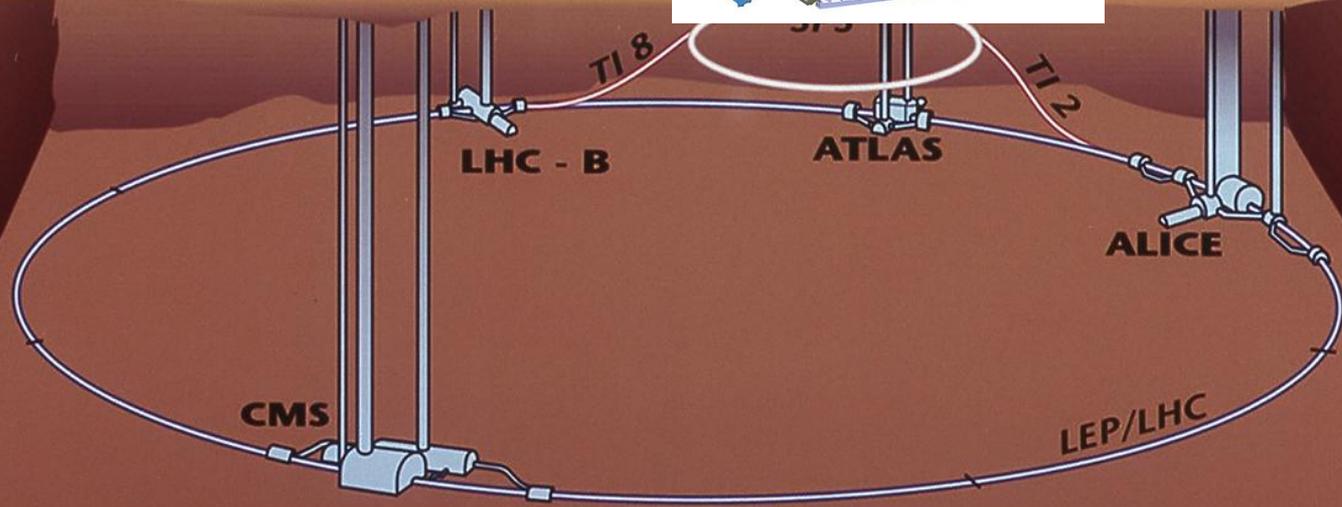
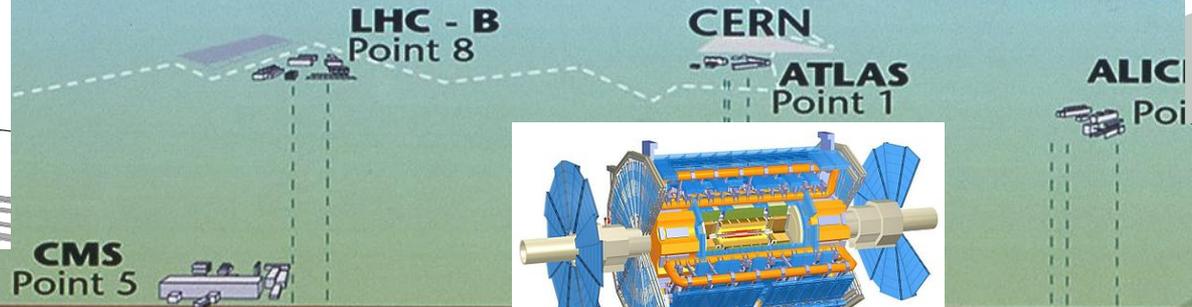
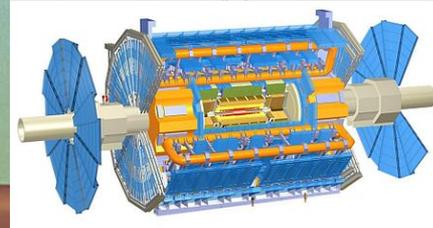
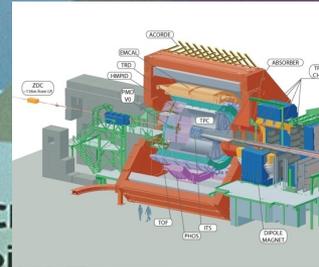
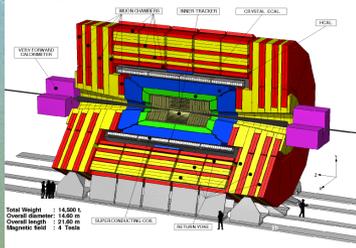
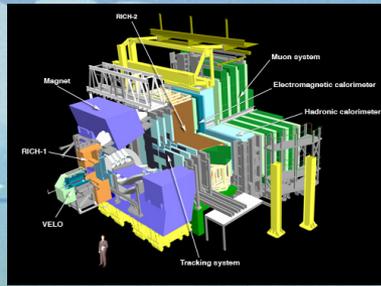
Construcción del LHC

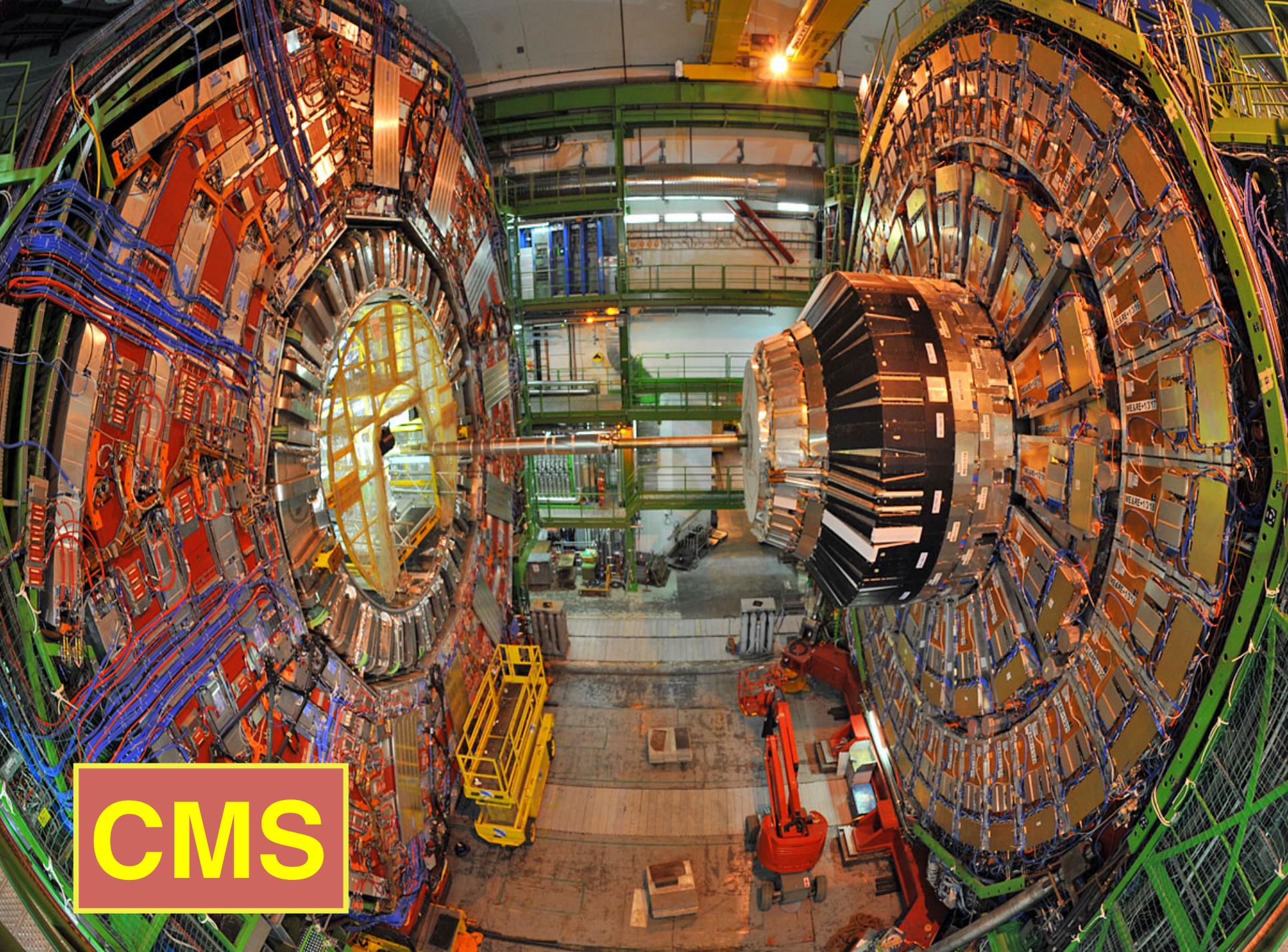


Overall view of the LHC experiments.

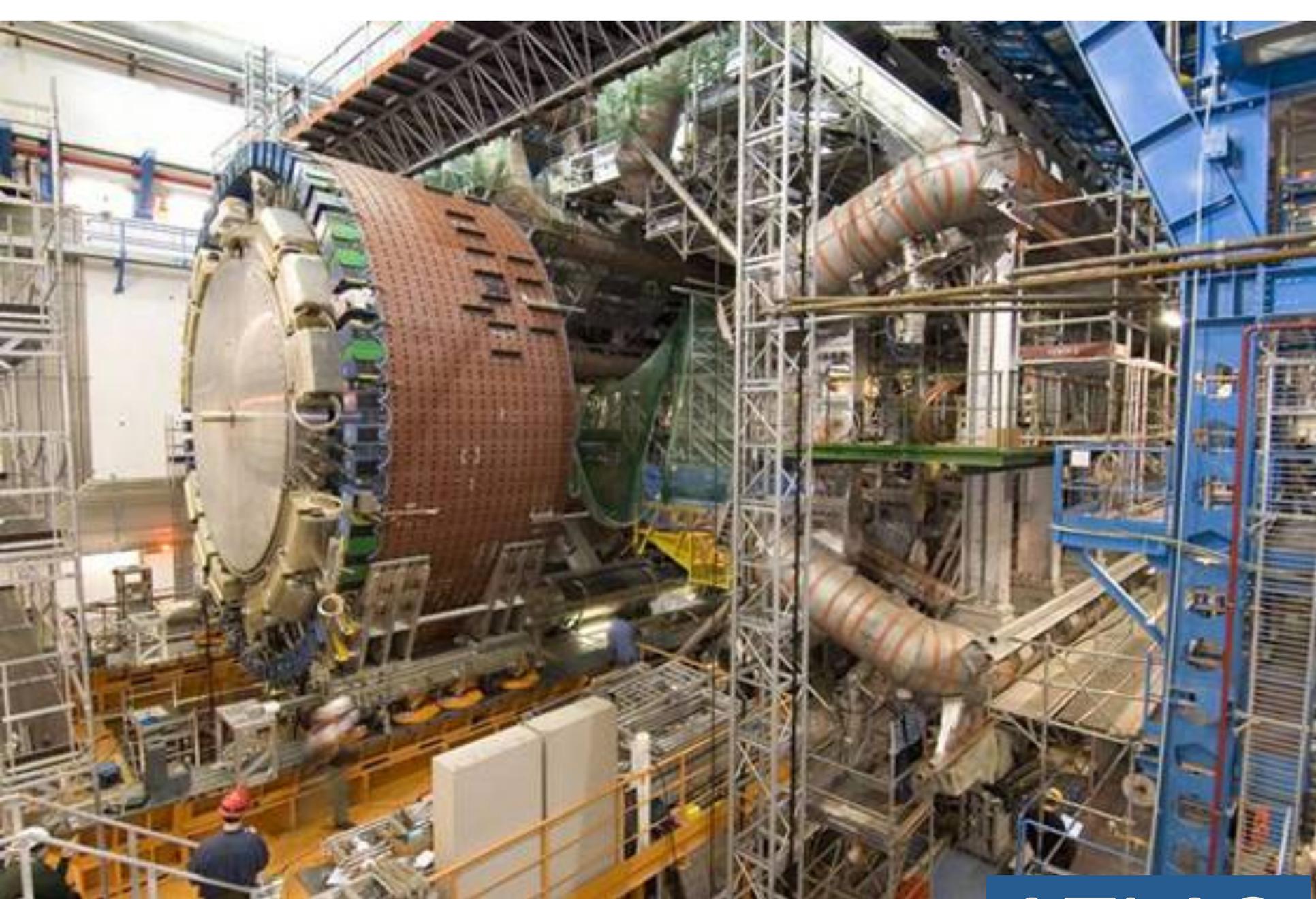
LHC tomará datos durante 15 años

→ Un total de $6 \cdot 10^{15}$ colisiones





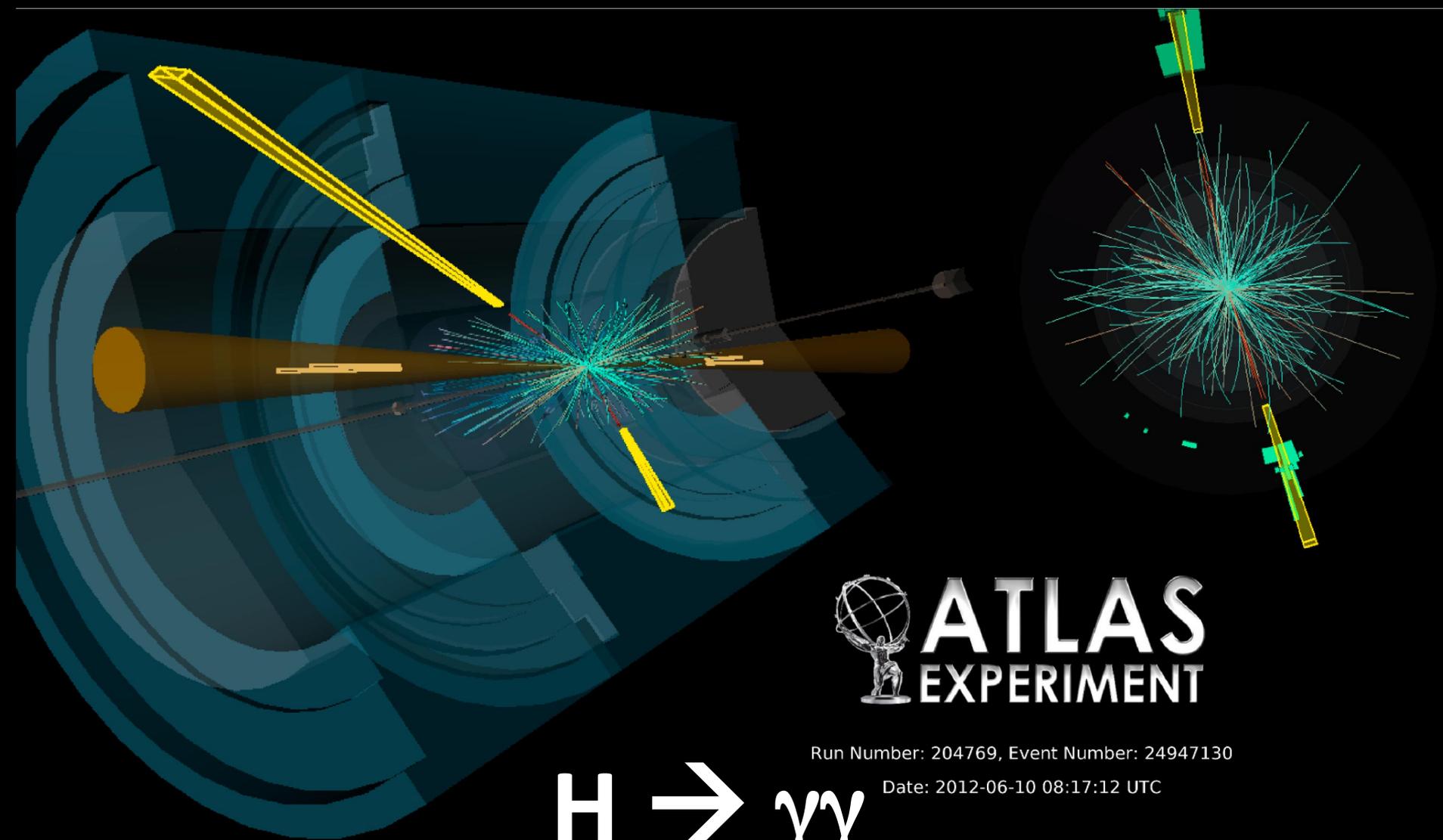
CMS



23/09/19

ATLAS

El descubrimiento del bosón de Higgs

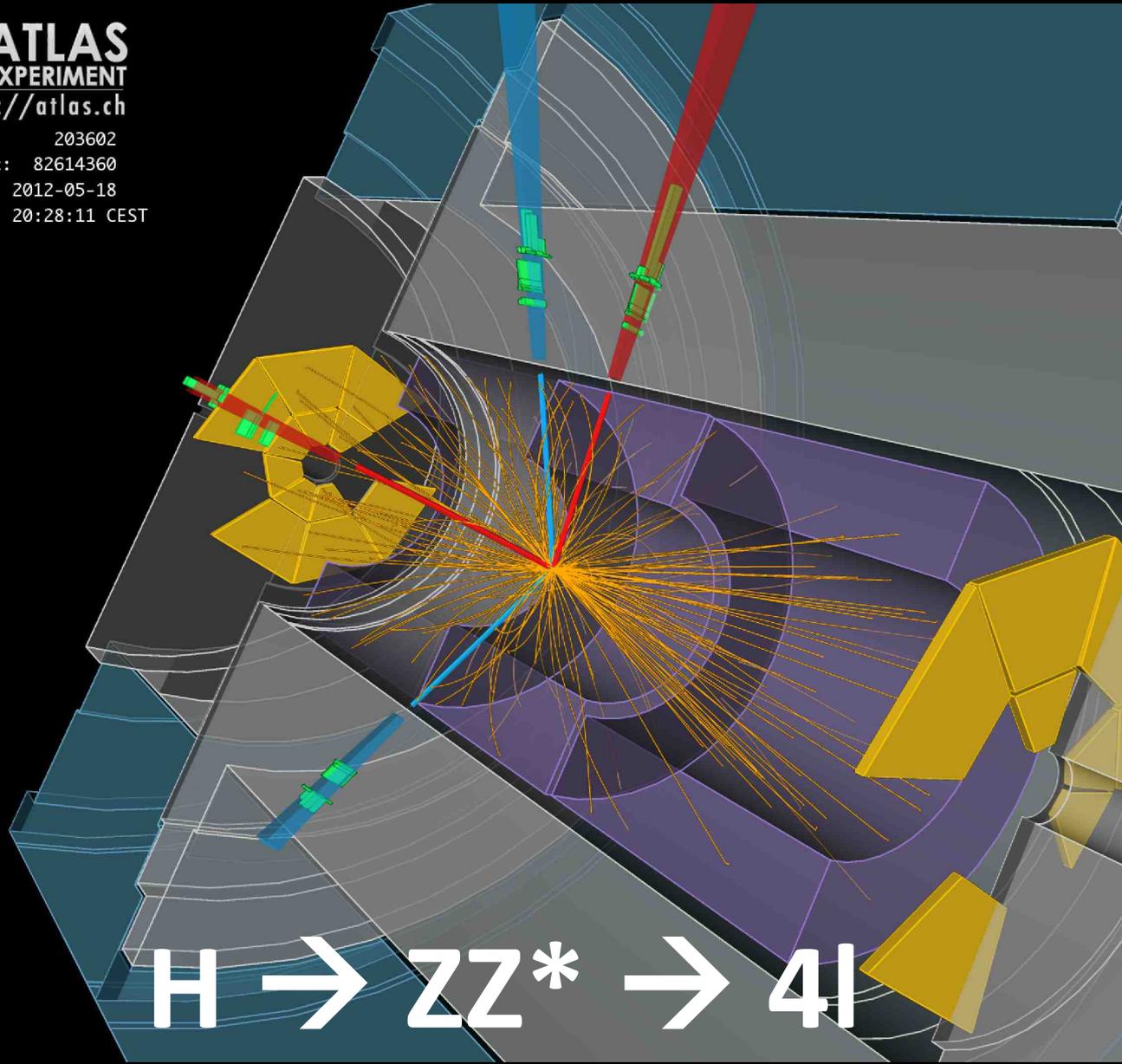


 **ATLAS**
EXPERIMENT

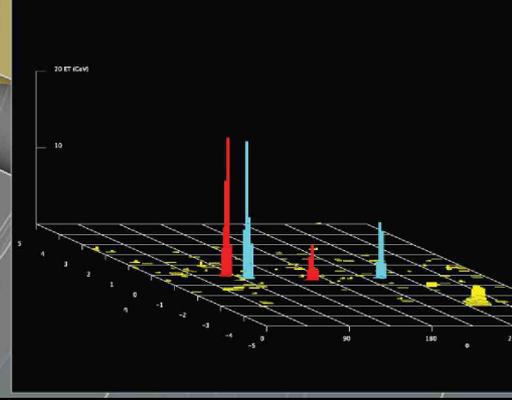
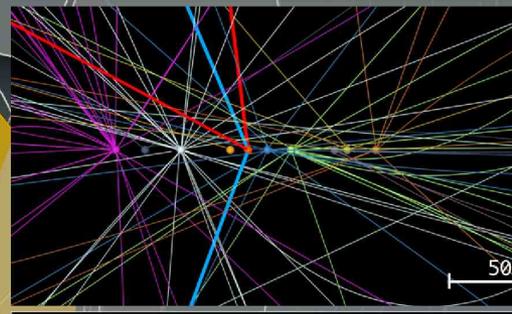
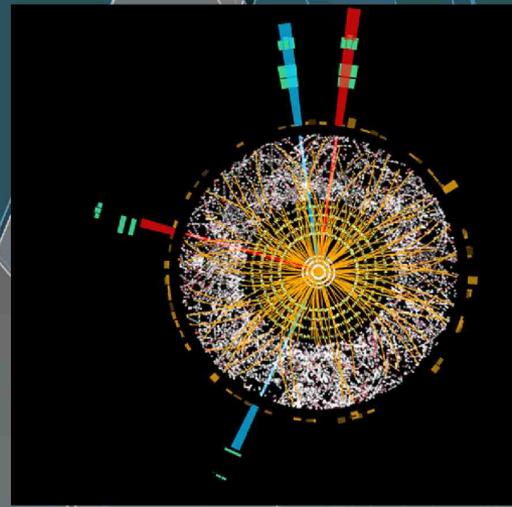
Run Number: 204769, Event Number: 24947130

Date: 2012-06-10 08:17:12 UTC





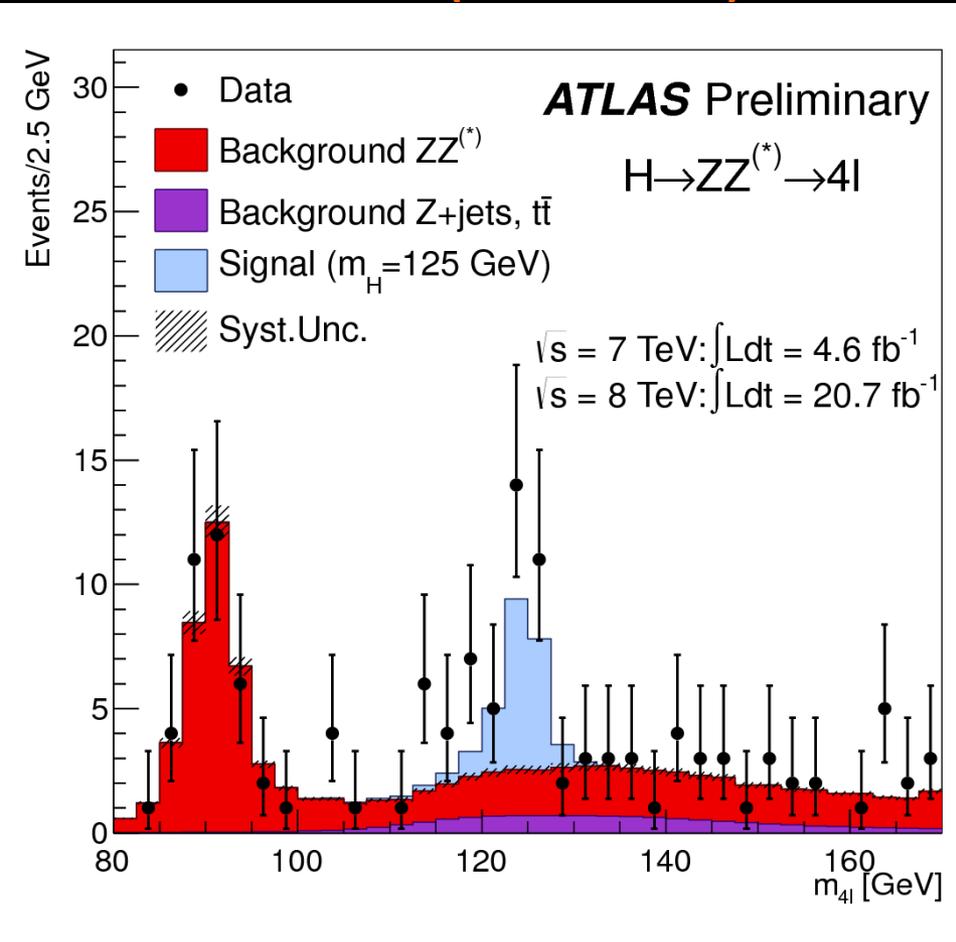
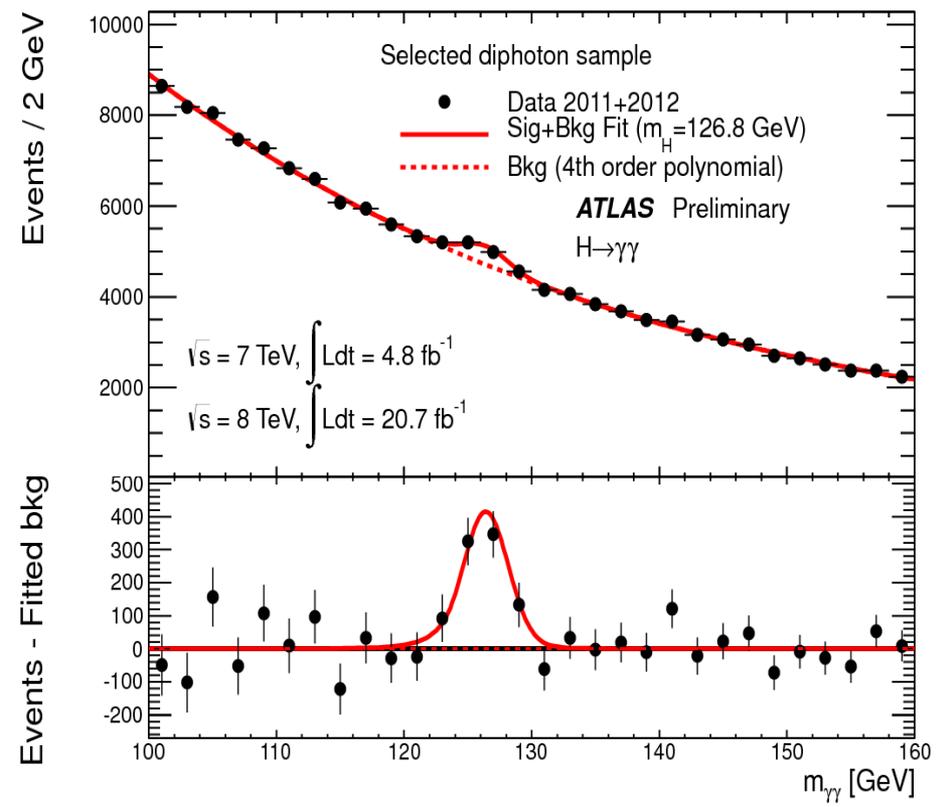
$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$



Descubrimiento
4 Julio 2012

¡¡ Higgs !!

Estos son resultados
con todos los datos
(Marzo 2013)



Los dos experimentos ATLAS y CMS
observan resonancias alrededor de 125 GeV
(ahora estamos estudiando sus propiedades....)

8th Oct. 2013



The Nobel Prize in Physics 2013

François Englert, Peter Higgs

The Nobel Prize in Physics 2013

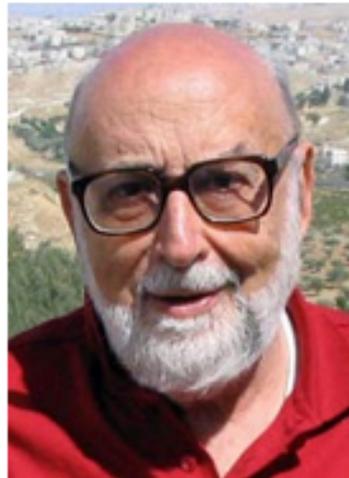


Photo: Pnicolet via
Wikimedia Commons

François Englert

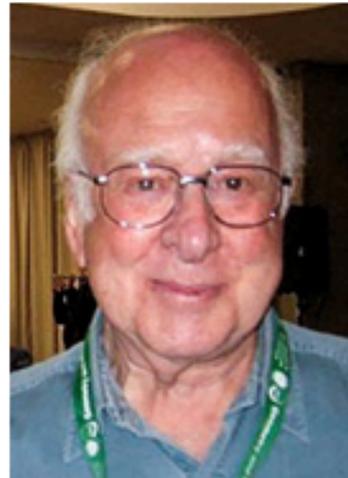


Photo: G-M Greuel via
Wikimedia Commons

Peter W. Higgs

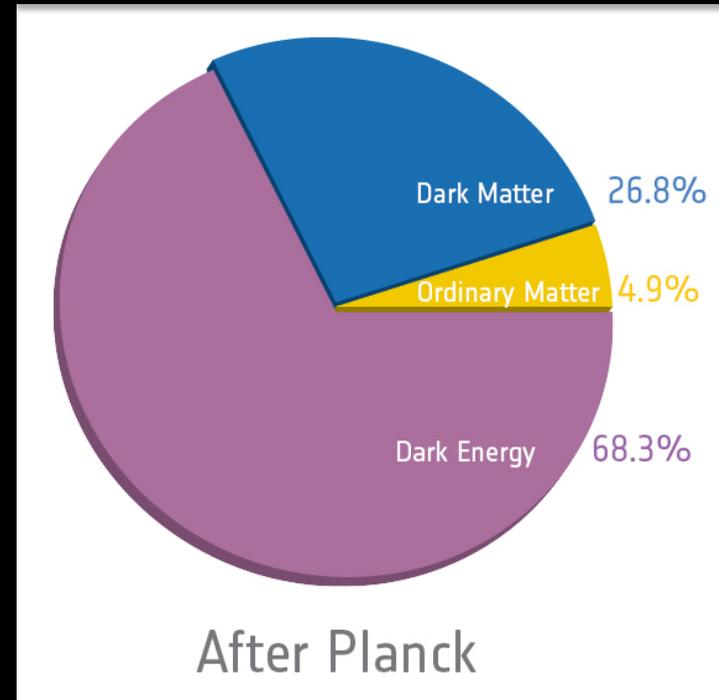
The Nobel Prize in Physics 2013 was awarded jointly to François Englert and Peter W. Higgs *"for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider"*

Un momento histórico

*...pero sólo hemos explicado un 15%
de la materia del Universo... el resto
es materia oscura....*

La composición del Universo

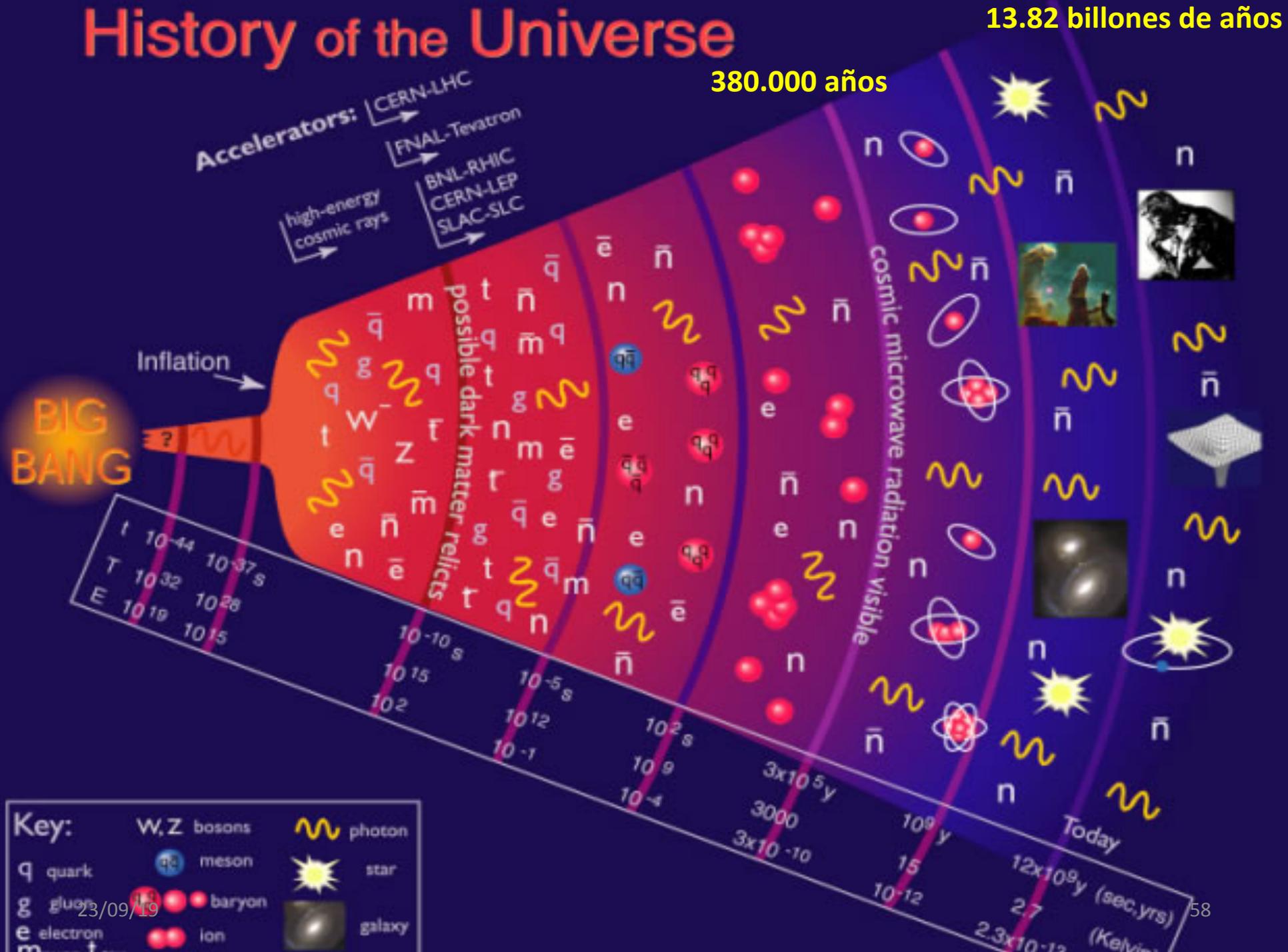
*...radiación de fondo de
microondas...*



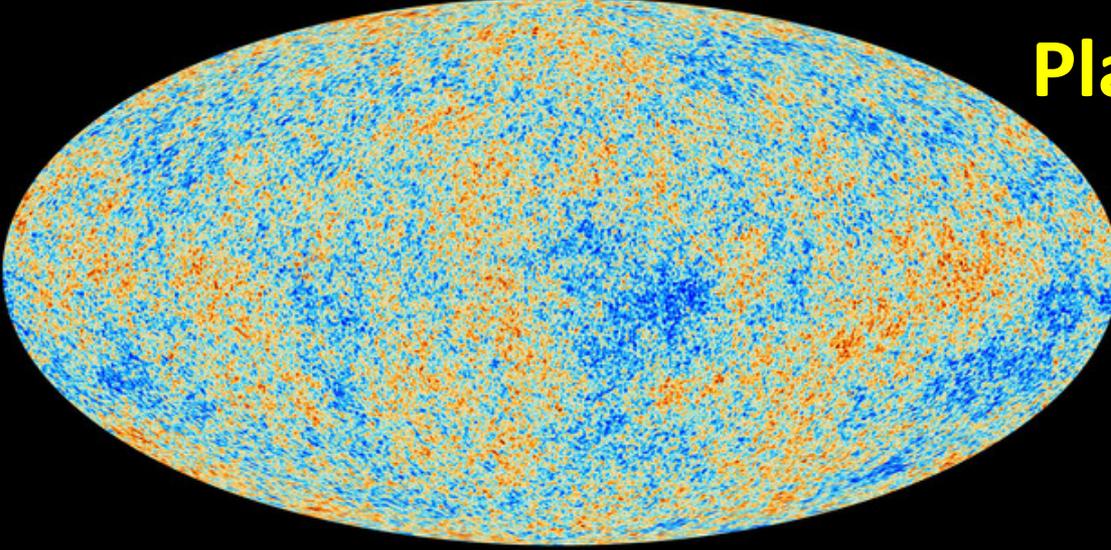
History of the Universe

13.82 billones de años

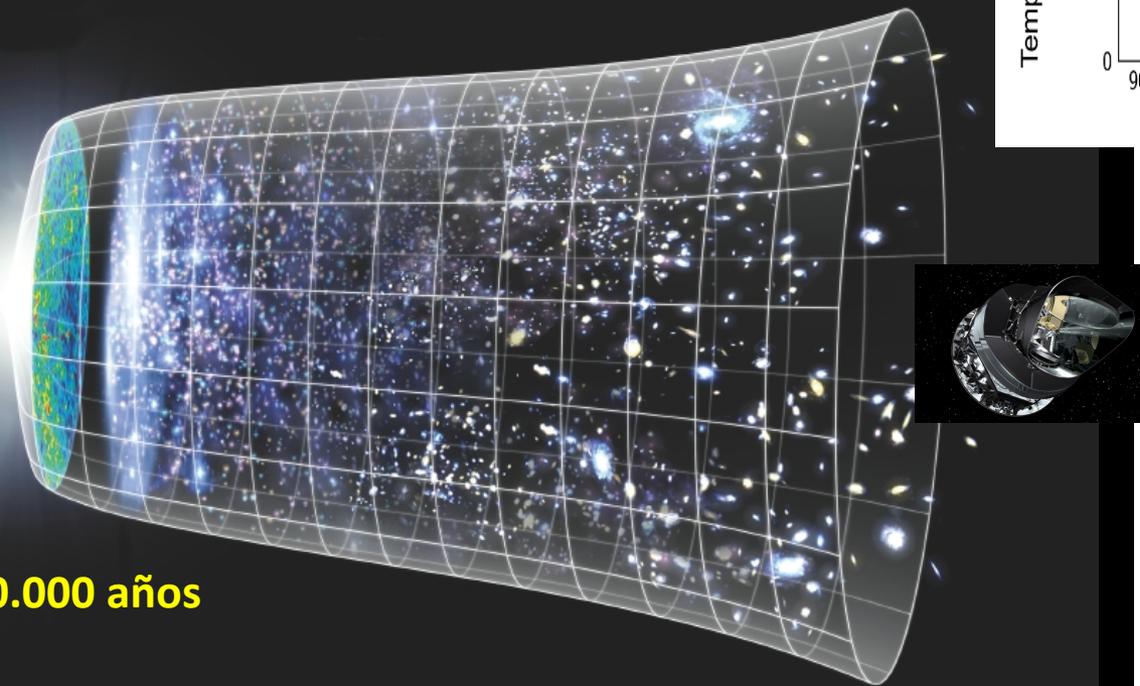
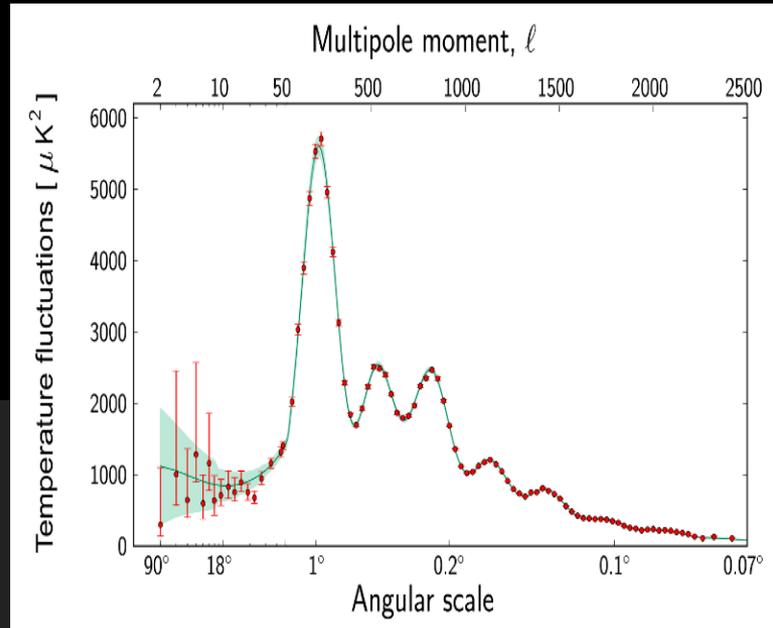
380.000 años



Planck (21 Marzo 2013)

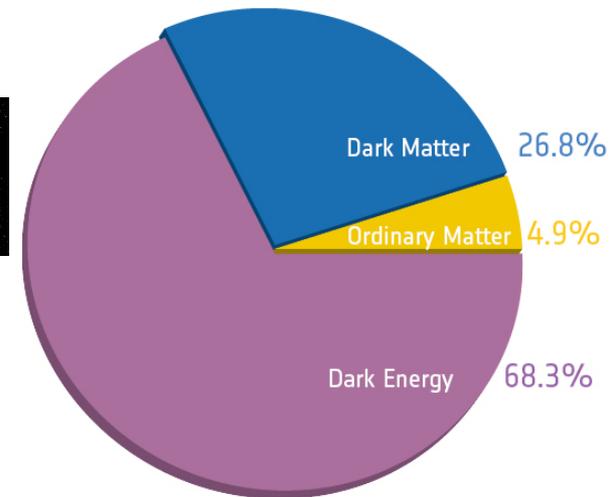


Radiación de fondo de microondas



380.000 años

13.82 billones de años



After Planck

¿Materia oscura?

...más indicios de materia oscura en el Universo.....

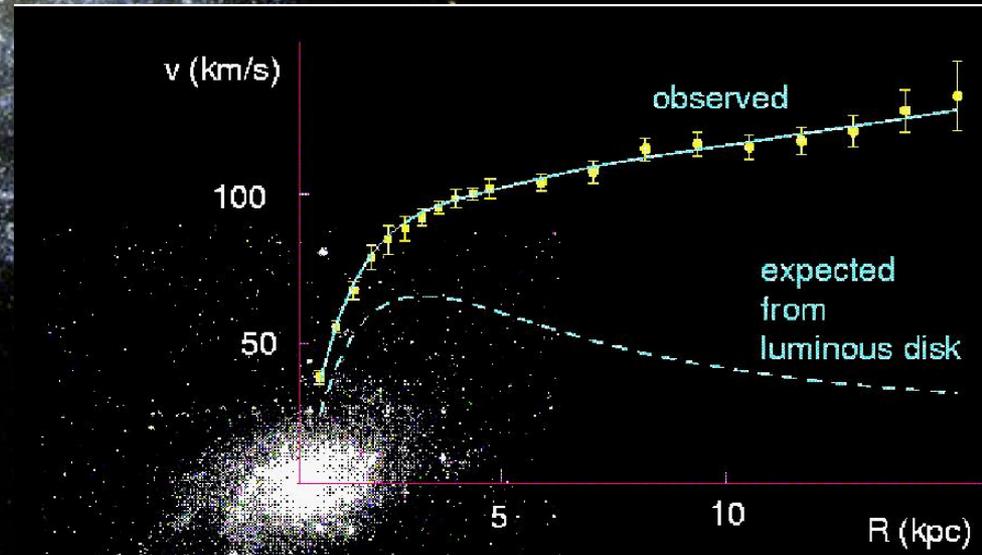
WIMPS

Weakly interacting massive particles

Otra posibilidad son axiones
(de los que no voy a hablar...)

Galaxia M33

La velocidad de rotación de las estrellas alrededor del centro de las galaxias no es consistente con la cantidad de materia observada $(L/M)_{SOL}$



M33 rotation curve

Halo de Materia Oscura

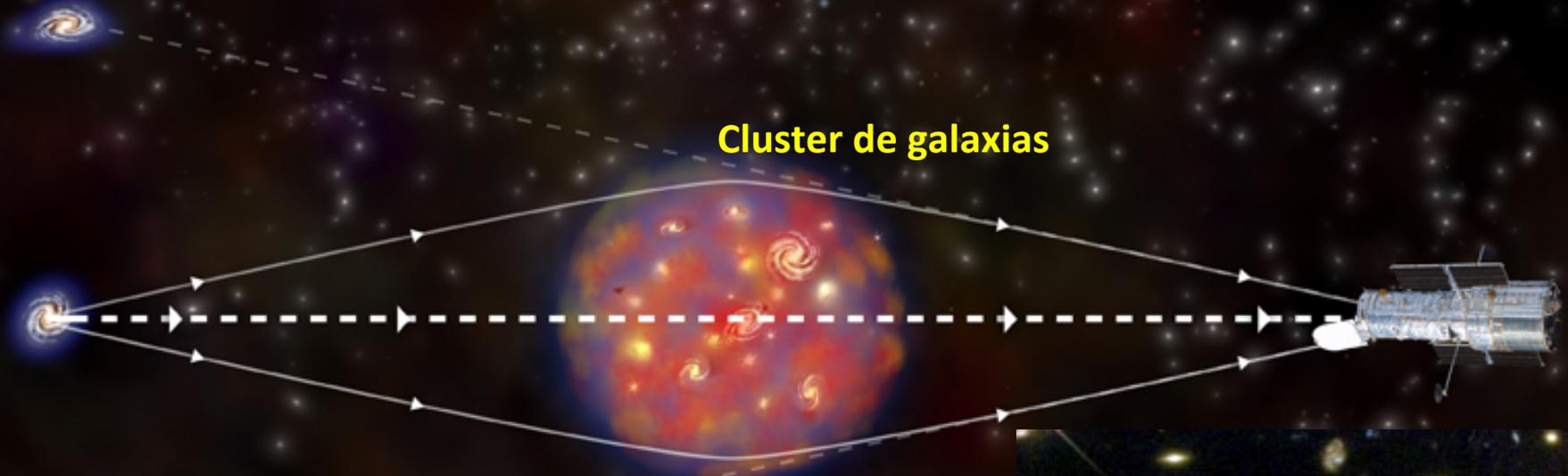


$$\rho(r) \sim \rho_0 \exp(-\alpha r^n)$$

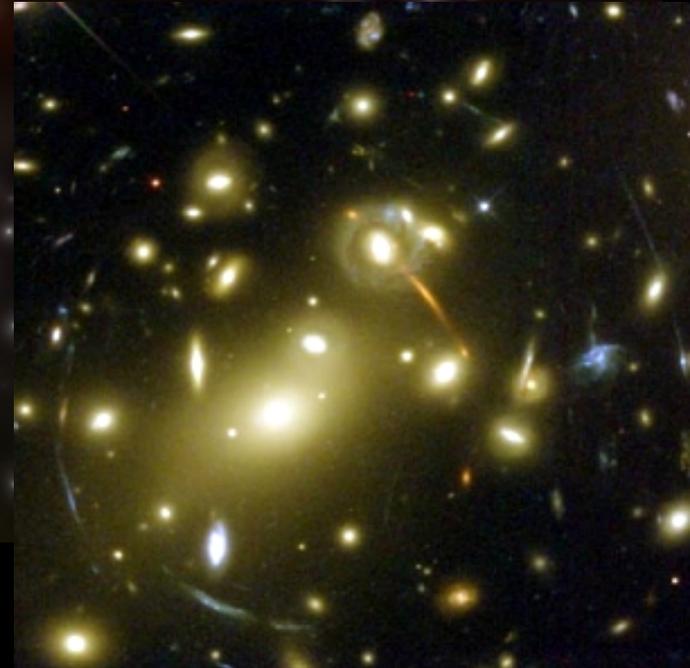
Datos consistentes con una distribución esférica de materia oscura alrededor de la galaxia

$$\rho_0 = 4.5 \times 10^{-2} (r_0/\text{kpc})^{-2} / M_{\text{SOL}} \text{ pc}^{-3}$$

Lentes Gravitacionales



La distorsión de la imagen da información de
La cantidad de materia oscura en el cluster



Colisiones de clusters de galaxias

Via Lentes Gravit

Via Rayos X

1.5'

64



¿Materia Oscura?

	$2.4 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ u $\frac{1}{2}$ up	$1.27 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ c $\frac{1}{2}$ charm	$171.2 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ t $\frac{1}{2}$ top	0 0 γ 1 photon
Quarks	$4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ d $\frac{1}{2}$ down	$104 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ s $\frac{1}{2}$ strange	$4.2 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ b $\frac{1}{2}$ bottom	0 0 g 1 gluon
	$<2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 ν_e $\frac{1}{2}$ electron neutrino	$<0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 ν_μ $\frac{1}{2}$ muon neutrino	$<15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 ν_τ $\frac{1}{2}$ tau neutrino	$91.2 \text{ GeV}/c^2$ 0 Z^0 1 Z boson
Leptons	$0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 e $\frac{1}{2}$ electron	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ -1 μ $\frac{1}{2}$ muon	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ -1 τ $\frac{1}{2}$ tau	$80.4 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 W^\pm 1 W boson
				Gauge bosons

Debe ser estable
 Debe ser neutro
 Interacción débil

WIMPS

Ah! ... neutrinos ?

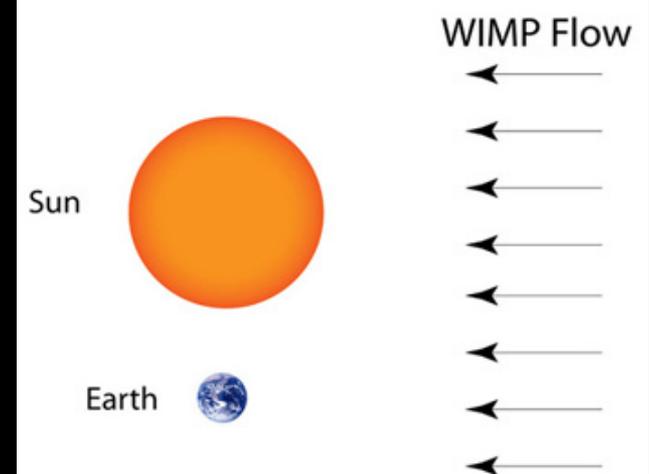
NO !..... son demasiado ligeros...

No tenemos una explicación dentro de nuestro modelo elegante...

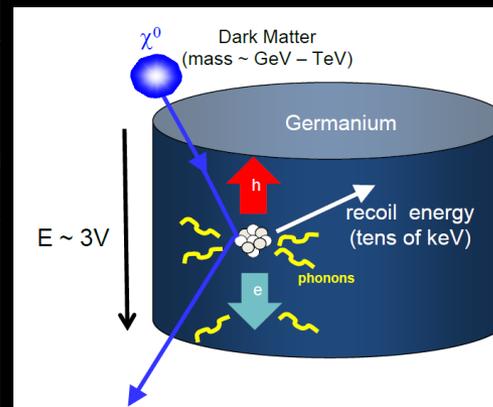
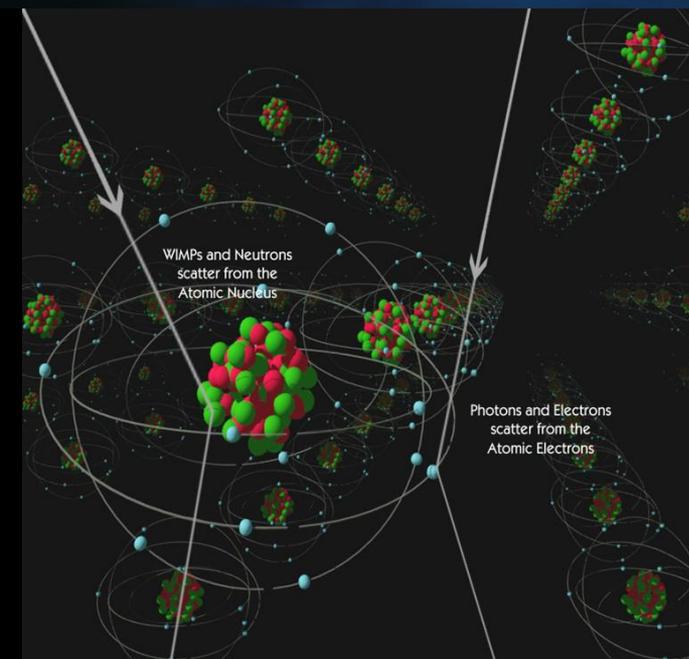
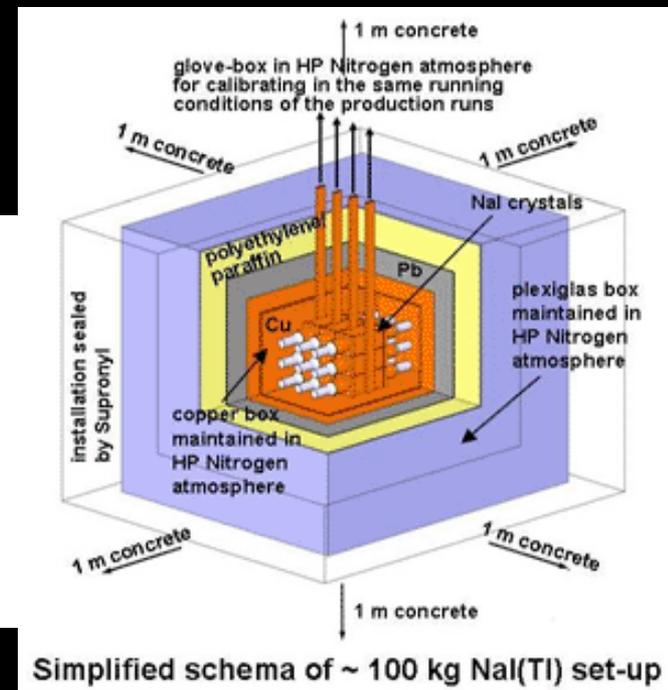
A la caza de la materia oscura

Detección directa

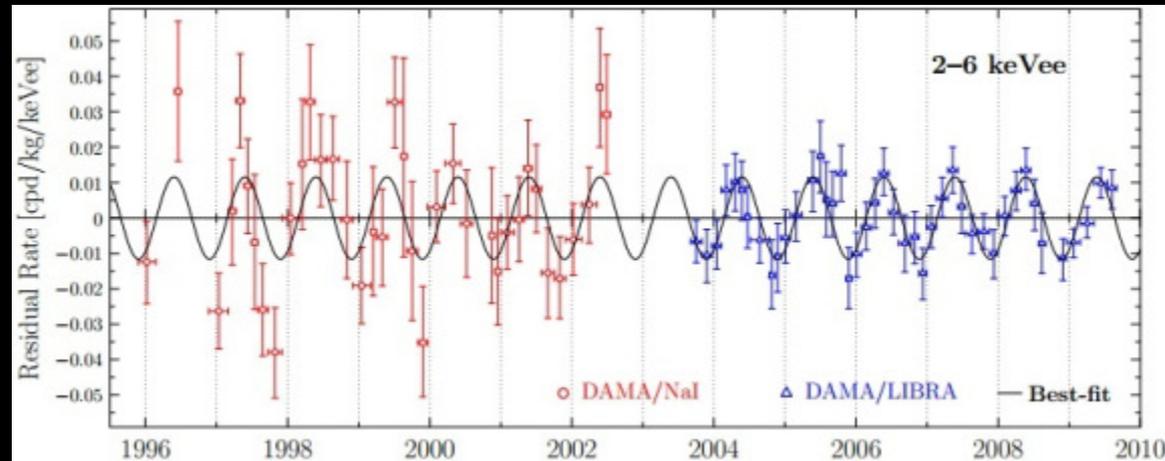
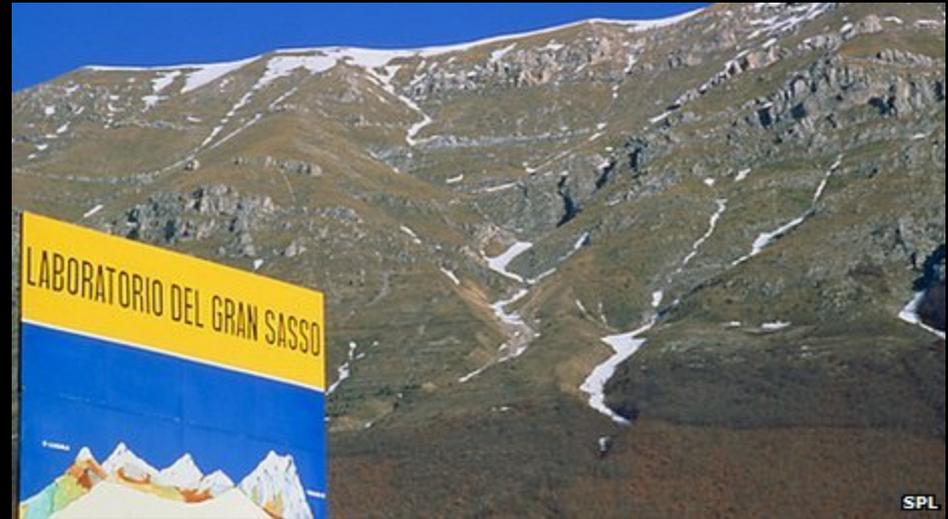
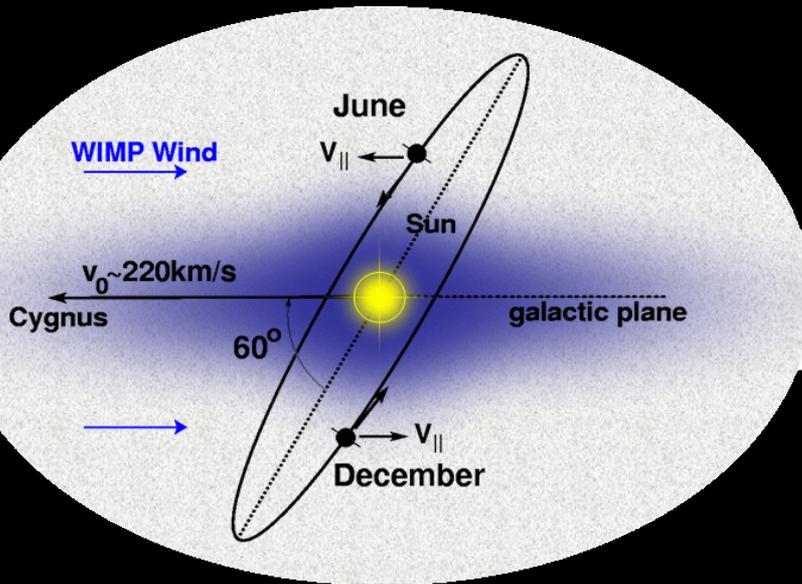
Hasta el momento no hay resultados conclusivos



Ver la interacción de WIMPS con detectores muy precisos



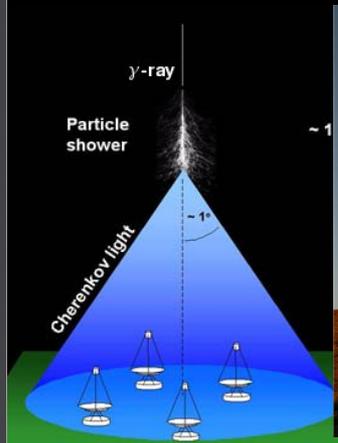
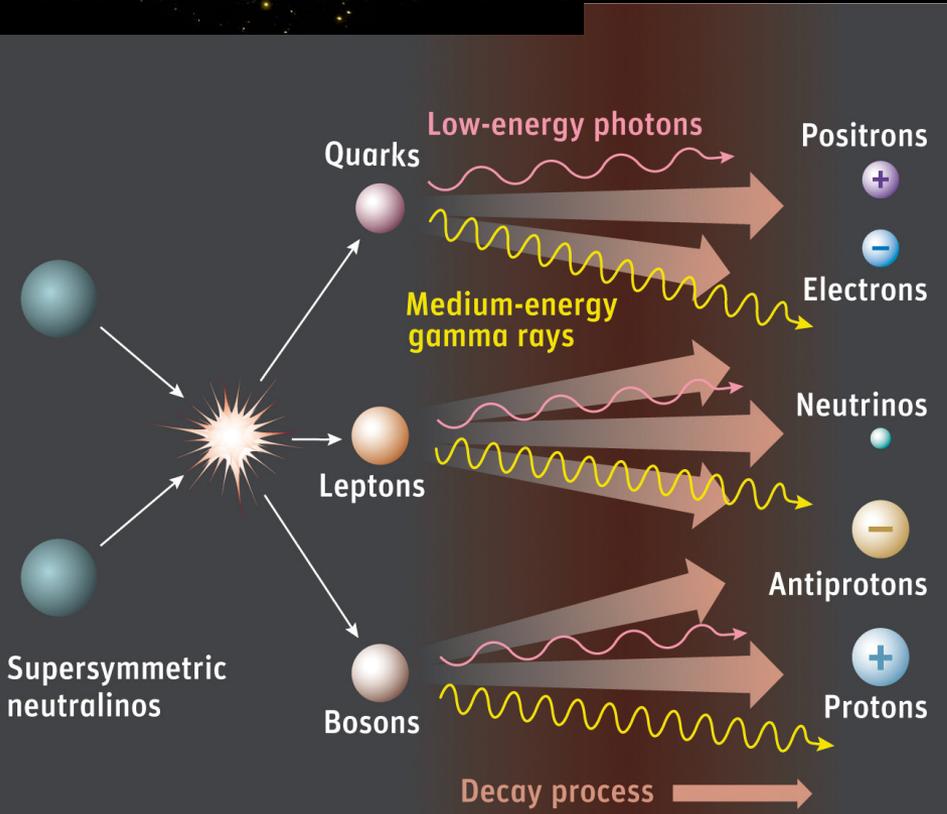
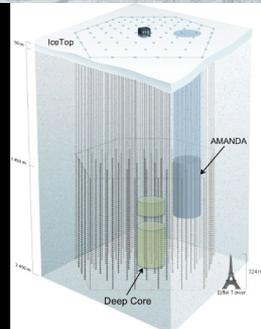
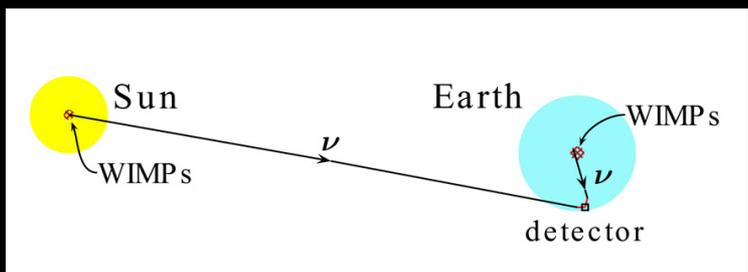
DAMA/Libra



Modulación anual que sugiere la señal de materia oscura... pero los resultados aún son controvertidos para la comunidad científica

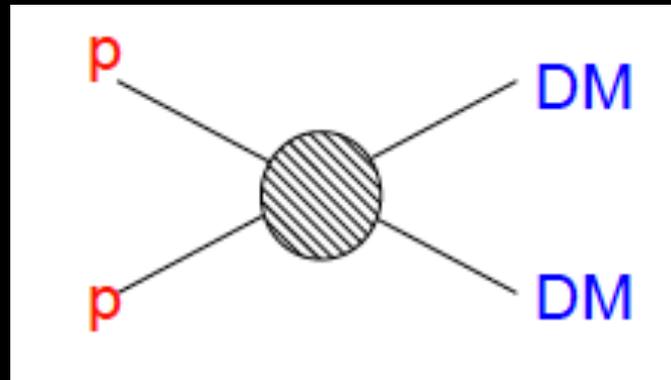
Detección Indirecta

Hasta el momento no hay resultados conclusivos



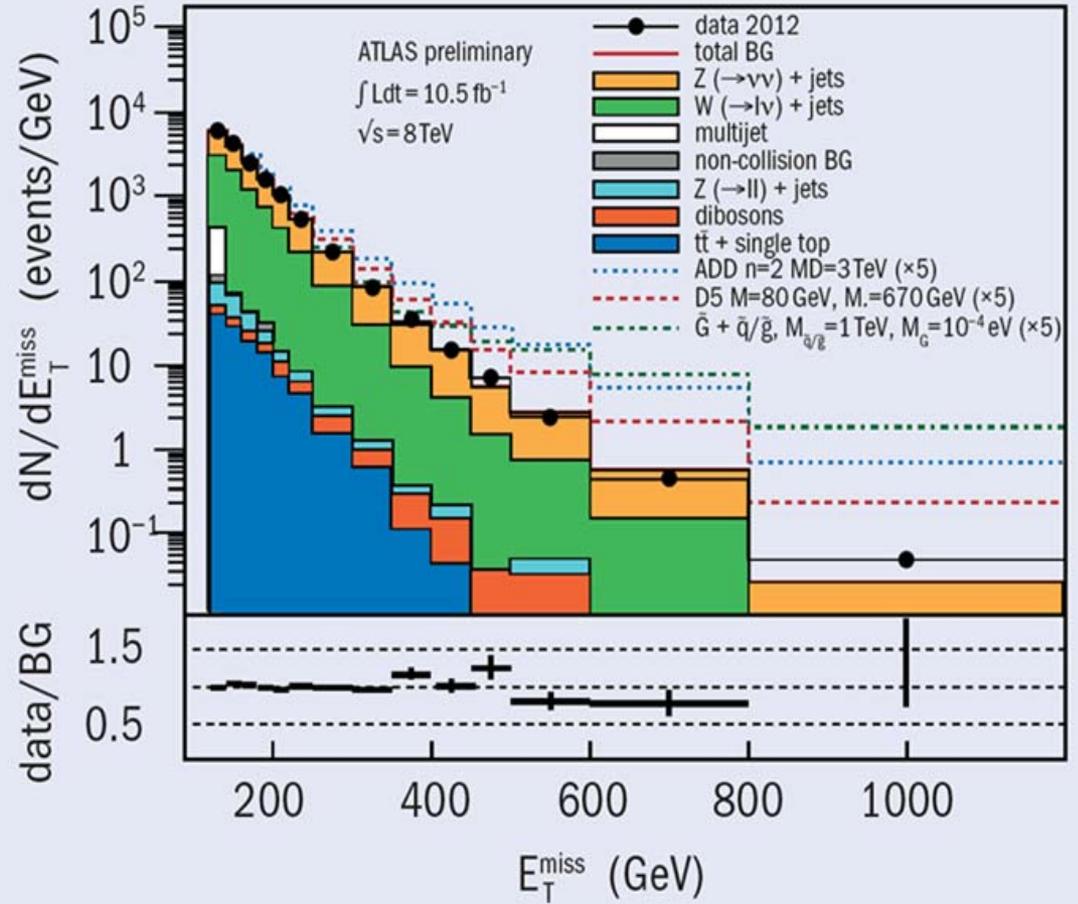
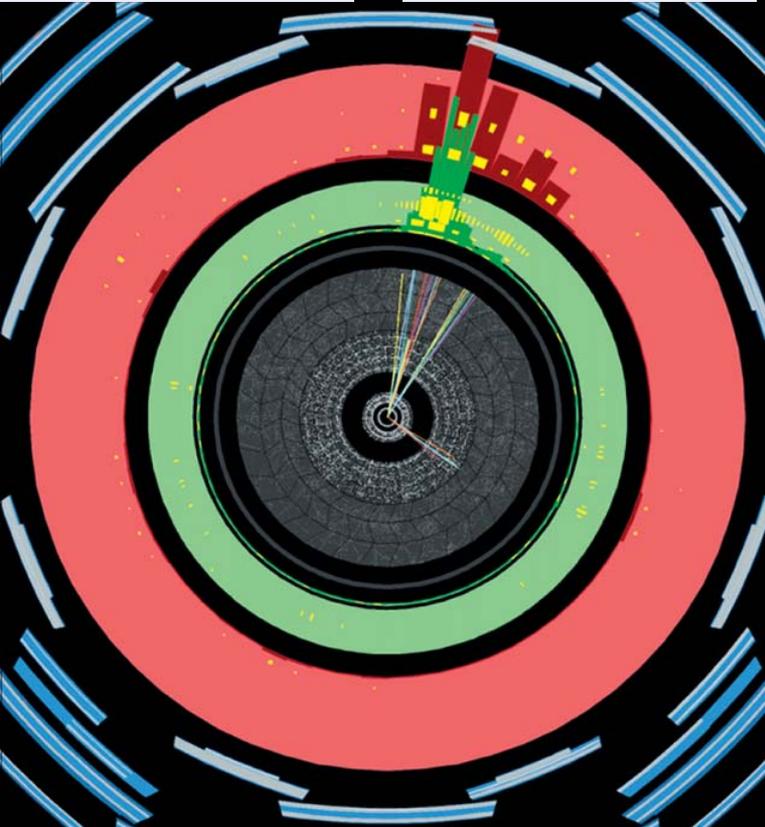
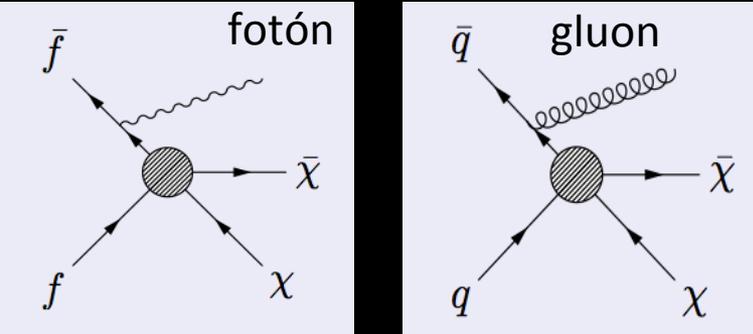
¿Producción de materia oscura ?

... volvamos al LHC ...



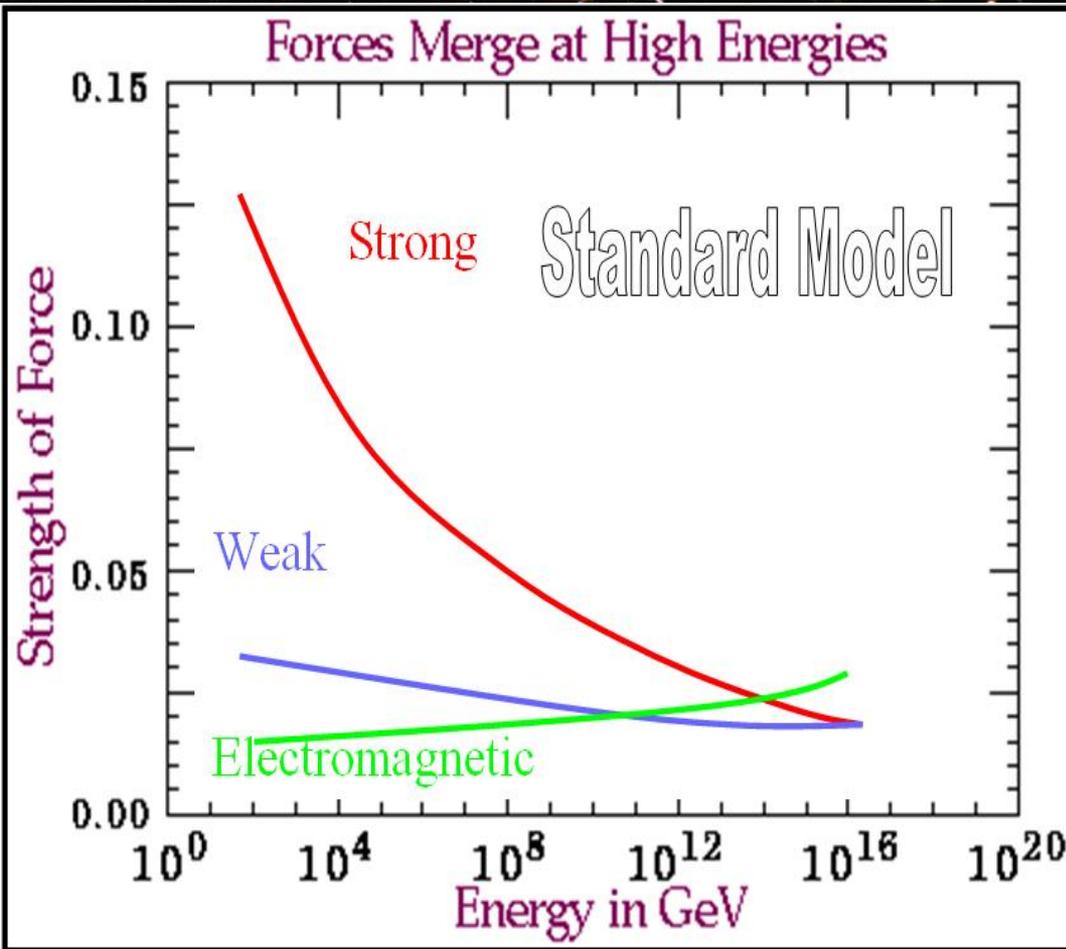
Si... pero estos sucesos serían invisibles en el LHC
...DM atraviesa los detectores sin dejar rastro.

Búsqueda en el LHC



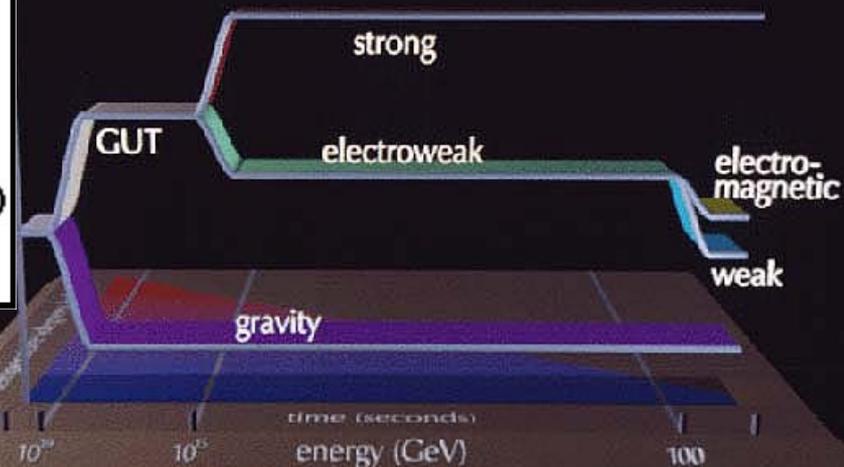
Sucesos claros y limpios pero (de momento) sin presencia de materia oscura...

¿Unificación de Fuerzas?



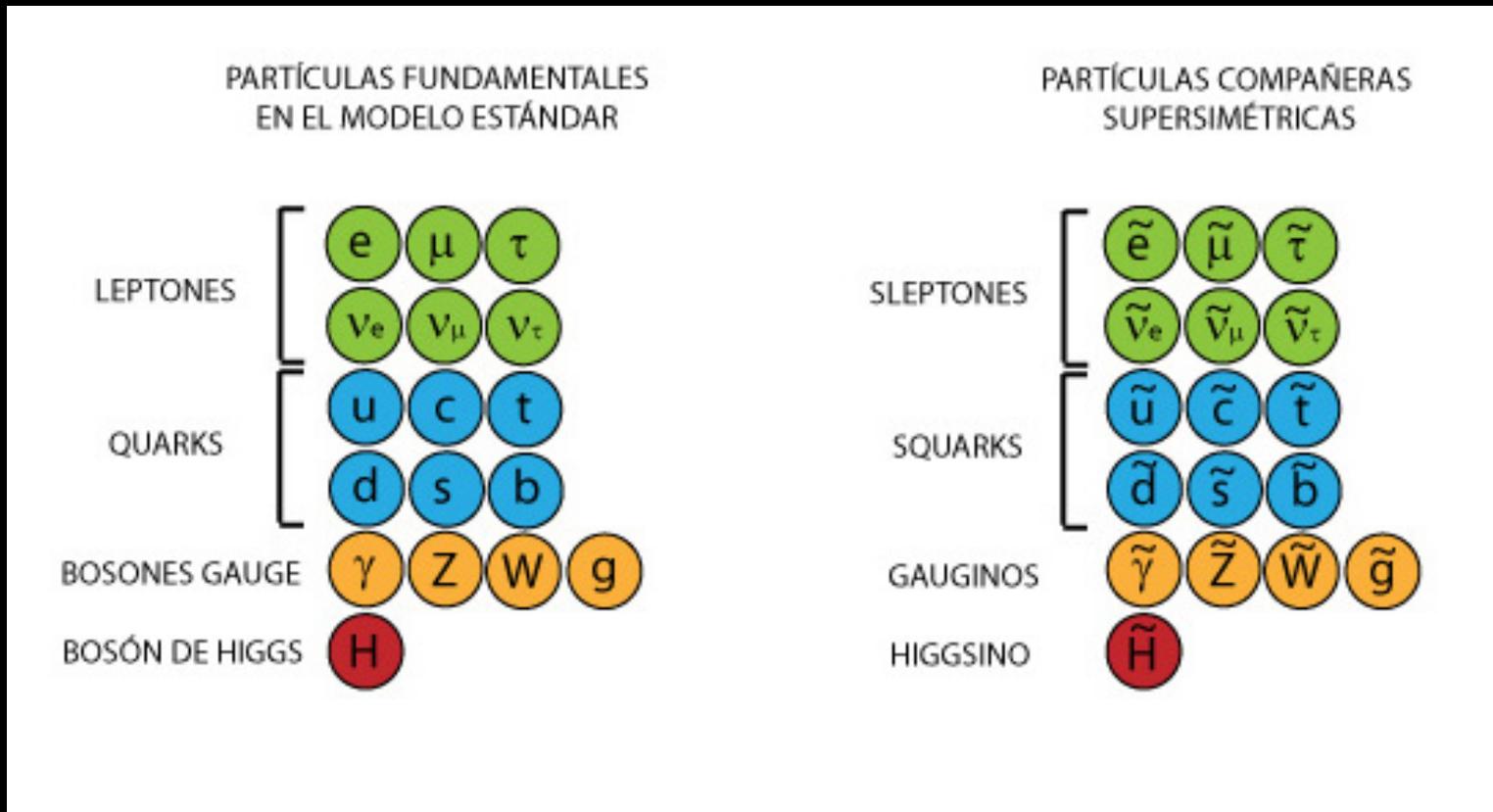
La deseada unificación de fuerzas también requiere una extensión de la teoría

¿Supersimetría?



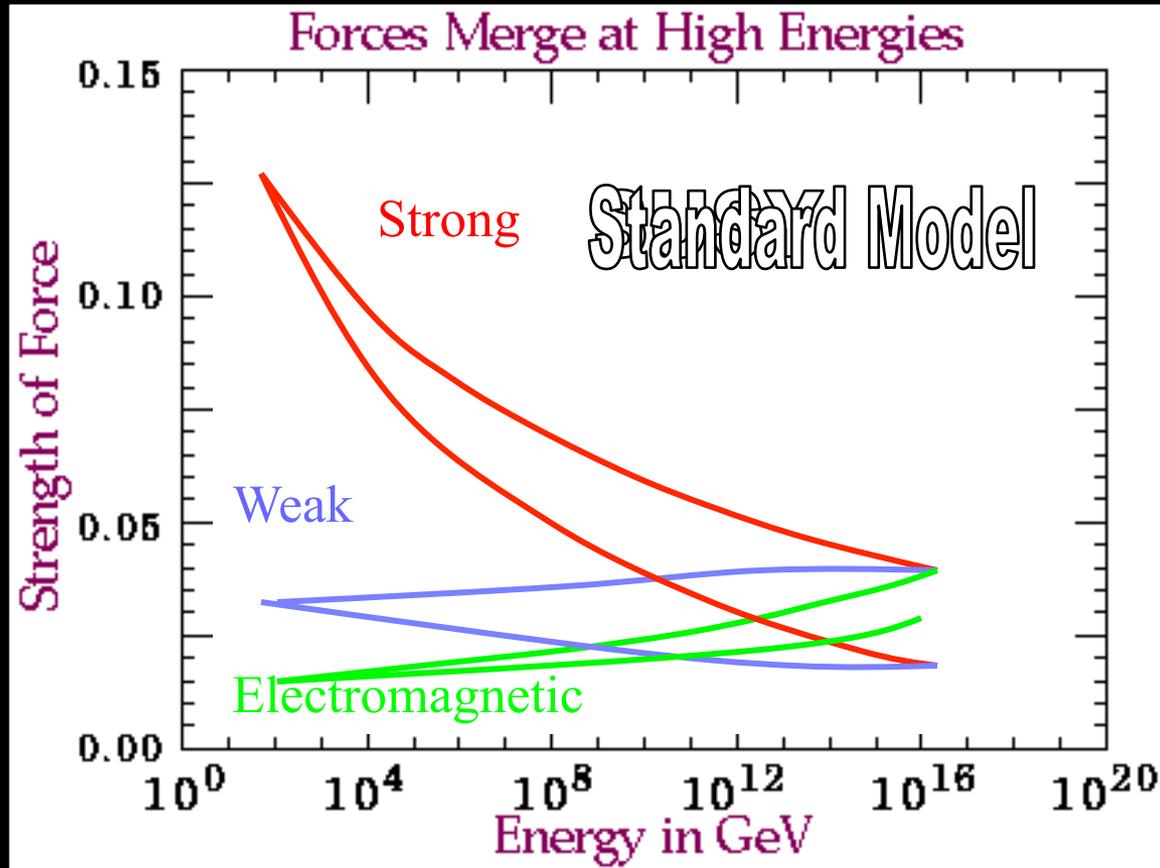
Supersimetría (SUSY) en 30''

Establece una relación entre Fermiones (espín ½) y Bosones (espín 1)

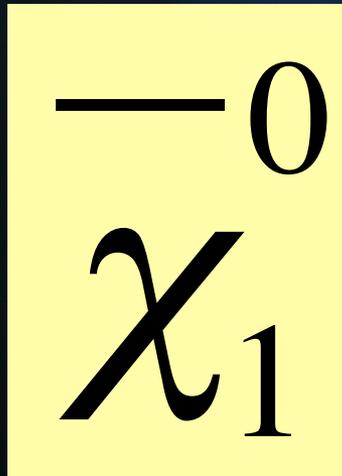


**Duplica el número de partículas:
para cada partícula existe un primo "supersimétrico"**

Unificación de Fuerzas & SUSY



SUSY incluye de forma natural un candidato para material oscura



neutralino

Junto con el bosón de Higgs la búsqueda de materia oscura es la misión más importante del LHC y de los futuros colisionadores
→ SUSY o cualquier otra cosa !

FCC (pp and ee) @ CERN



Quasi-circular tunnel of 80 to 100 km perimeter

e+ e- collider
Collision energy 90 to 350 GeV
Very high luminosity

Hadron collider
16 T \Rightarrow 100 TeV for 100 km
20 T \Rightarrow 100 TeV for 80 km

Future
Circular
Collider



Google Earth
Image © 2016 DigitalGlobe
Image Landsat / Copernicus

LHC planea tomar datos hasta 2035

→ El futuro es un acelerador más grande y con más energía (?)



WE NEED

YOU

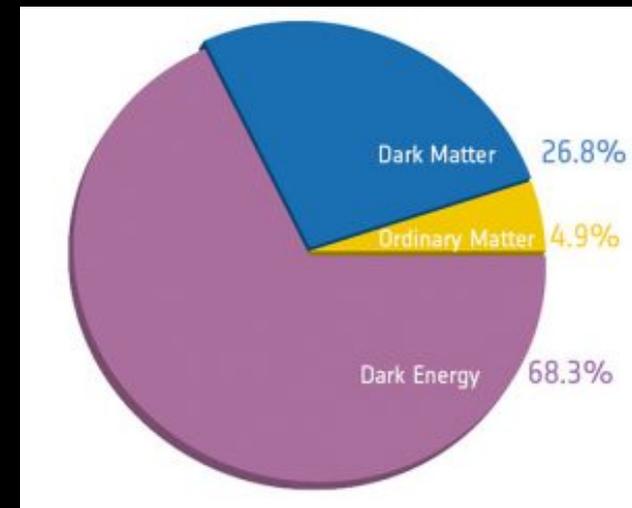
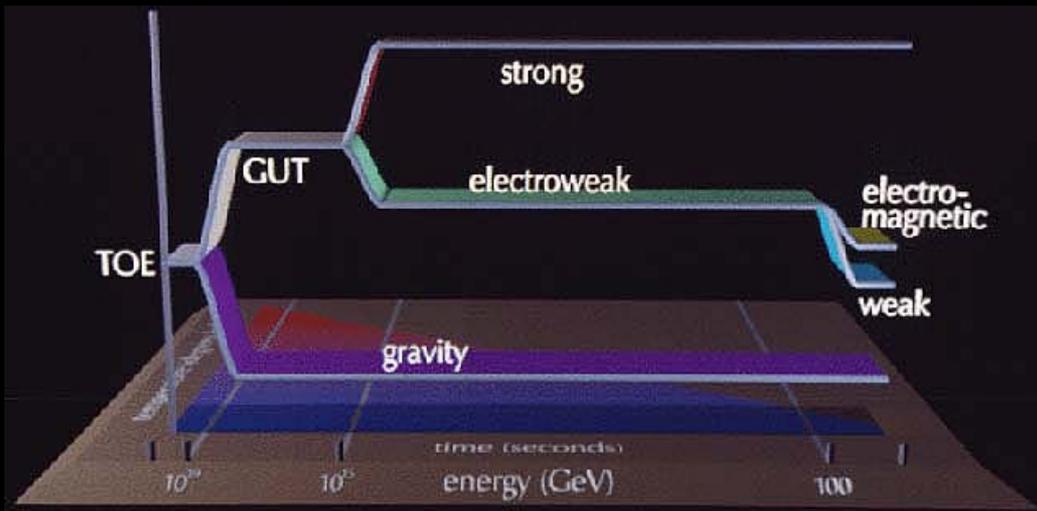
TO

JOIN

US

¿Energía Oscura ?

¿Gravedad ?





Geometry & Gravity



Euclid

I. Newton

3D space + time as absolute concepts

Space just a geometrical framework (box) where particles are

Distances are computed using the (familiar) Euclidean expressions

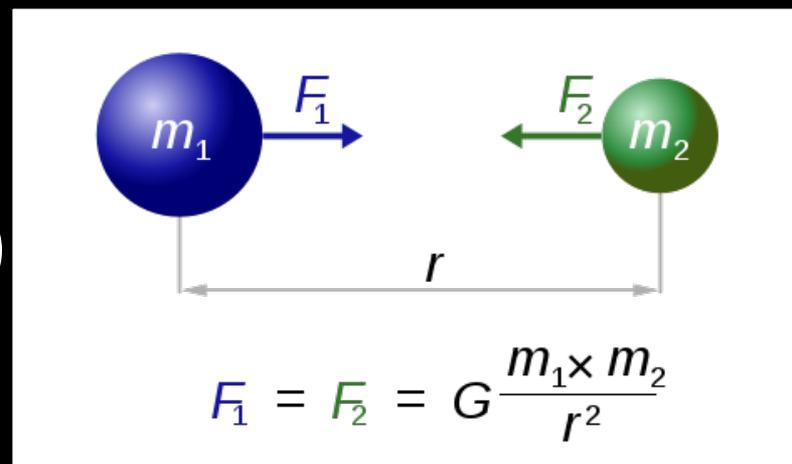
Time clocks the evolution of the system

$F = M a$ (which mass is this ?)

Equivalence Principle:

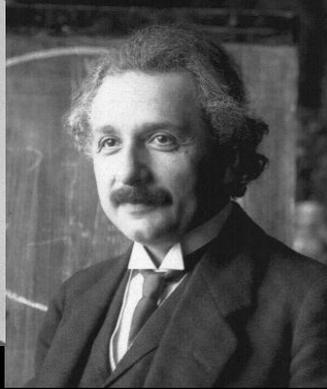
(Inertial mass = Gravitational mass)

$$r^2 = x^2 + y^2 + z^2$$





H. Minkowski

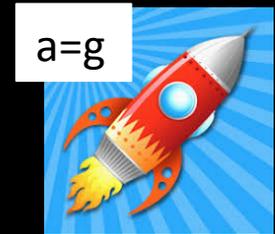


A. Einstein

Geometry & Gravity

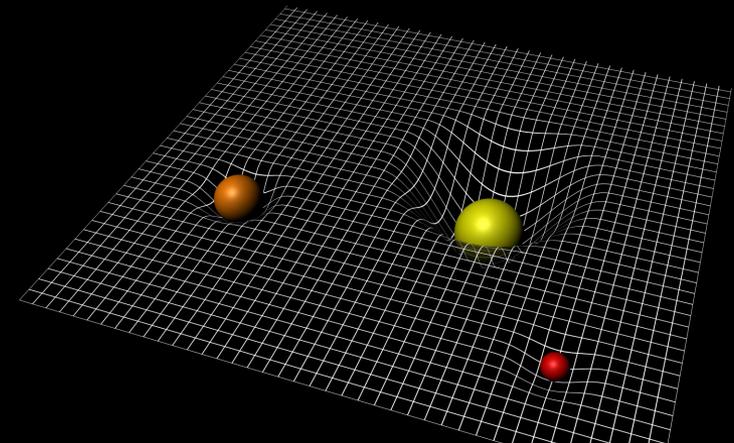


Equivalent Principle:
complete physical equivalence of a gravitational field and
a corresponding acceleration of the reference system

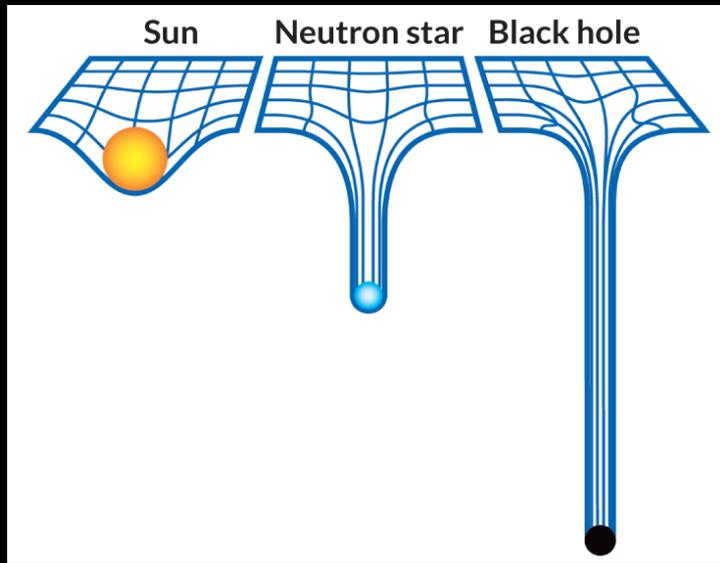


4D (spacetime) geometry, distance in space and time are relative
The spacetime geometry and the mass/energy budget interplay

$$G_{\mu\nu} = 8\pi \frac{G}{c^4} T_{\mu\nu}$$



Black hole

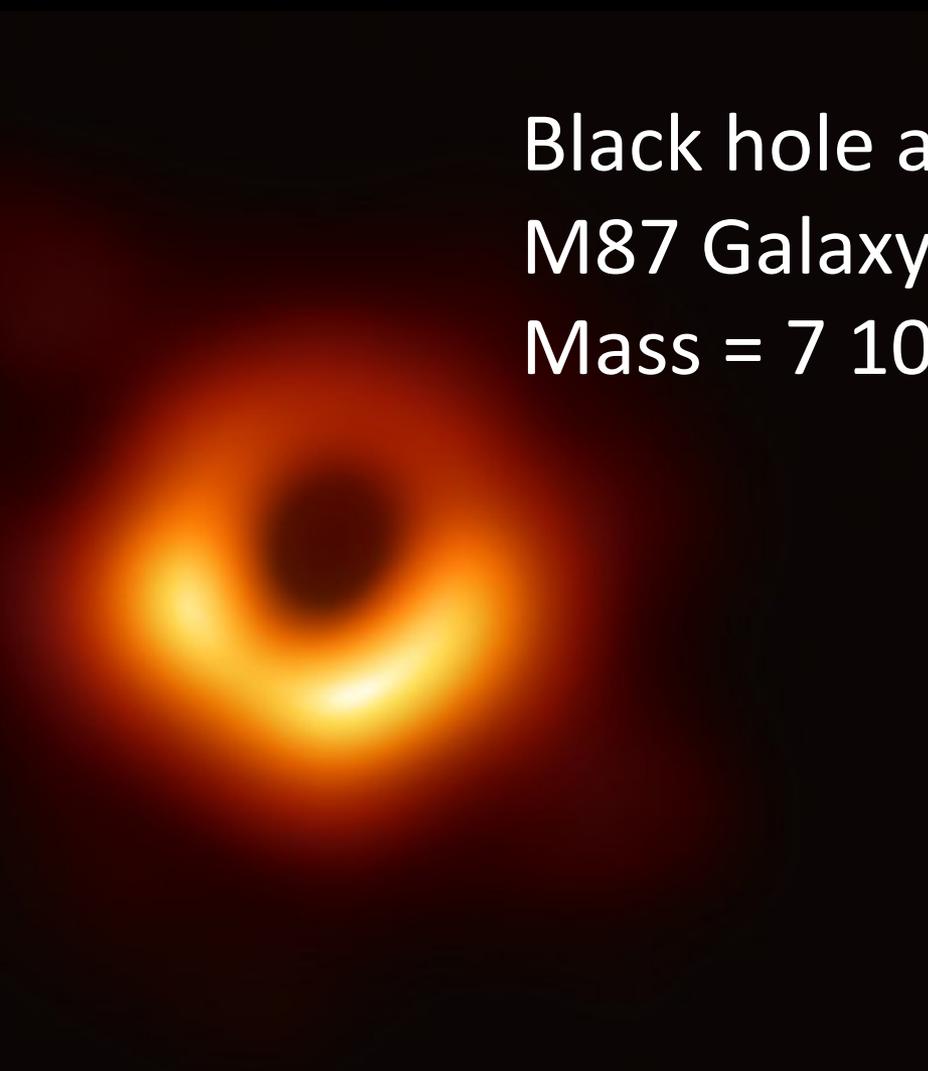


EHT (April 2019)

Black hole at
M87 Galaxy
Mass = $7 \cdot 10^9 M_{\odot}$

$$r_s = \frac{2GM}{c^2}$$

Schwarzschild radius



Universo en expansión acelerada ??

The Nobel Prize in Physics 2011



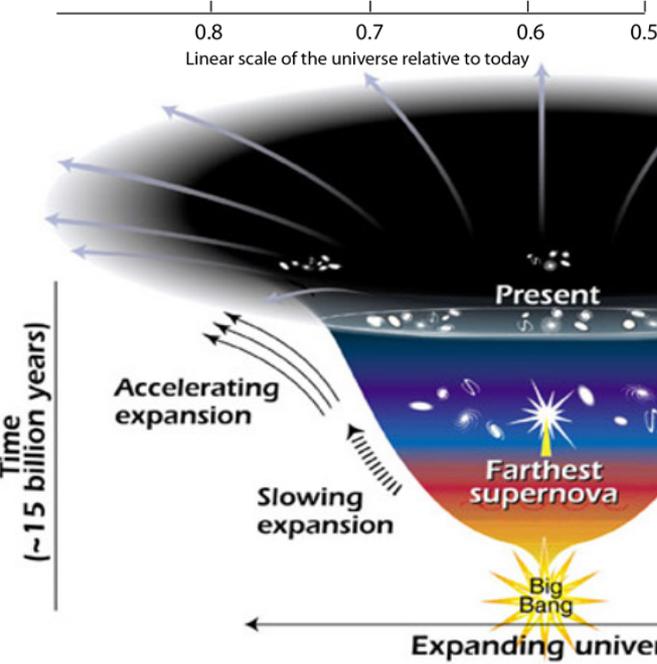
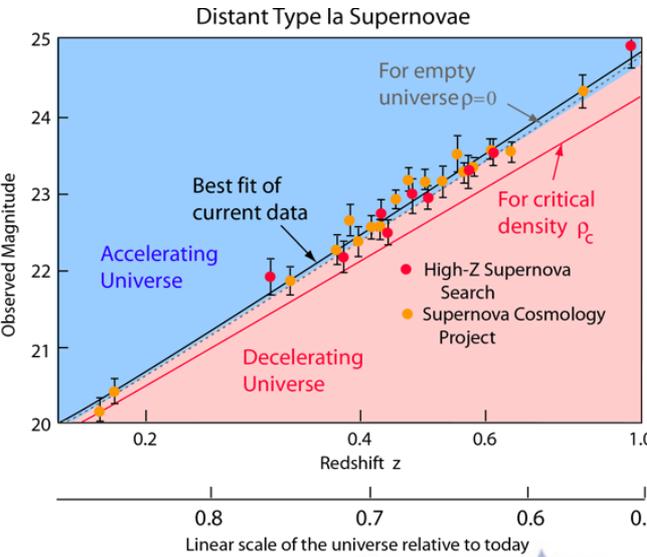
© The Nobel Foundation. Photo: U. Montan
Saul Perlmutter
Prize share: 1/2

© The Nobel Foundation. Photo: U. Montan
Brian P. Schmidt
Prize share: 1/4

© The Nobel Foundation. Photo: U. Montan
Adam G. Riess
Prize share: 1/4

La presencia de una “energía del vacío” (dark energy) balancea la fuerza gravitatoria (atractiva) haciendo que el universo se expande de forma acelerada

¿Qué es?



$$G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu} \quad \text{Einstein's original equation}$$

Law of an expanding universe All matter and energy in the universe

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

Law of an expanding universe Cosmological constant All matter and energy in the universe

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G (T_{\mu\nu} - \bar{\rho}_{DE} g_{\mu\nu})$$

Law of an expanding universe All matter and energy in the universe

Einstein Field Equation

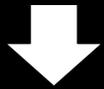
Newton constant

$$G_{\mu\nu} = 8\pi \frac{G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

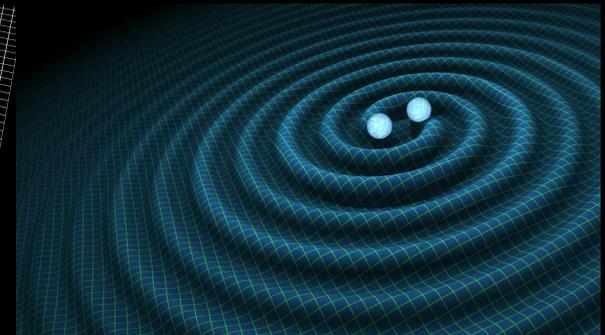
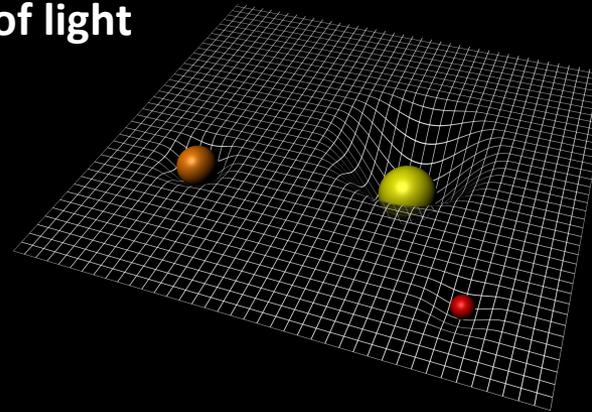
Matter/energy tensor
(distribution of mass/energy)

Einstein tensor
space-time geometry

Speed of light



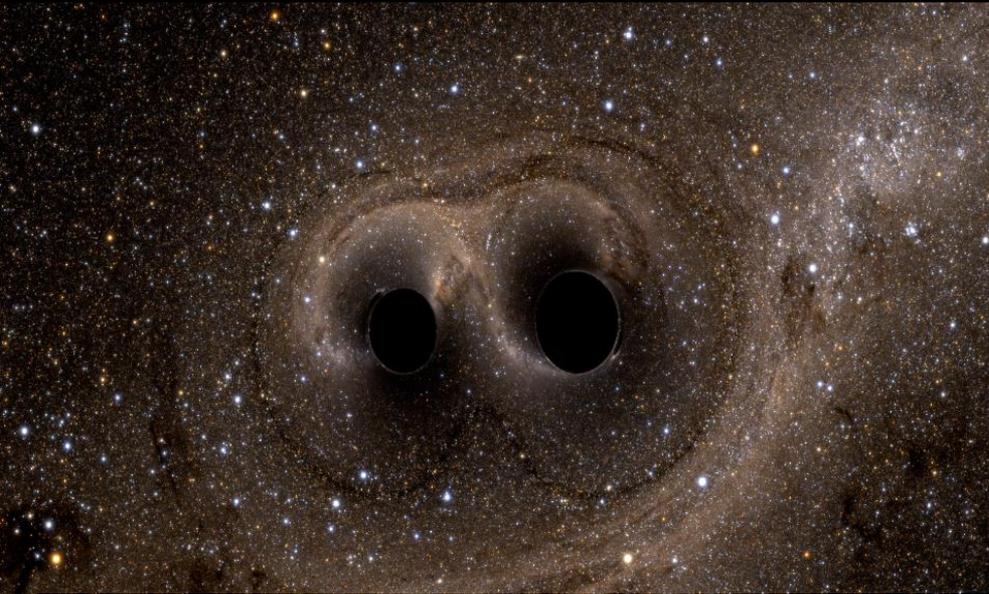
Compute distances in 4D



→ Fluctuations in the spacetime geometry triggered by changes in the energy/mass distributions will produce GWs

→ GWs will propagate throughout the Universe at the speed of light

Black hole Binary

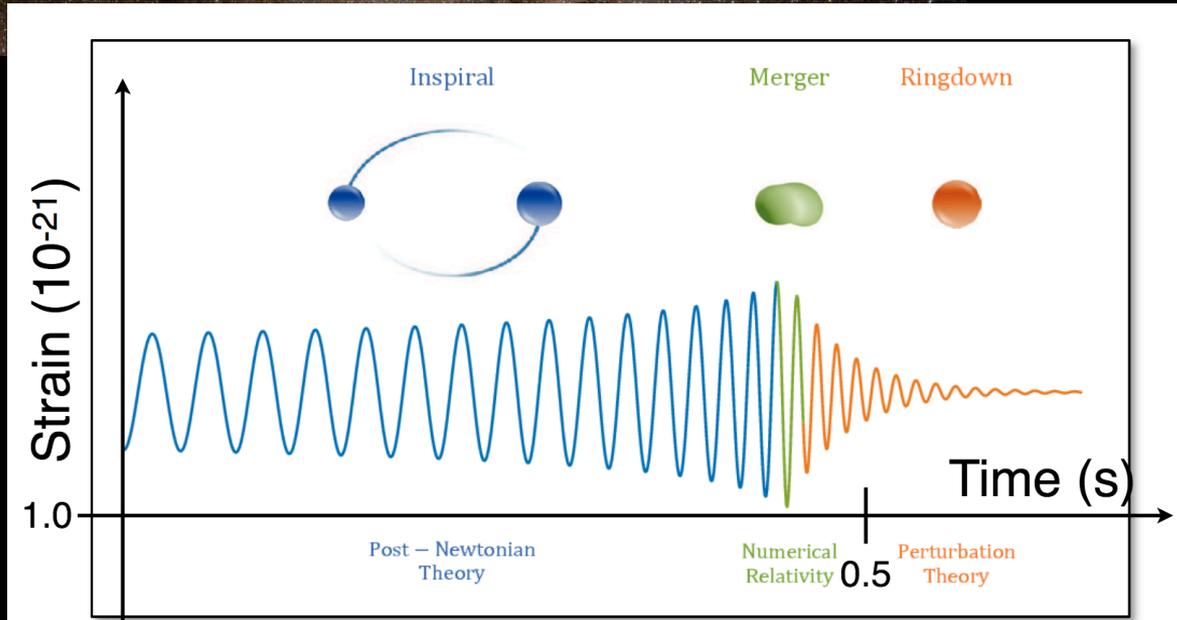


$m_1 = m_2 = 30 M_\odot$
Distance = 100 km
frequency = 100 Hz
 $r = 3 \cdot 10^{24}$ m (500 Mpc)

1 Mpc = 31×10^{18} km

0.000000000000000000000001

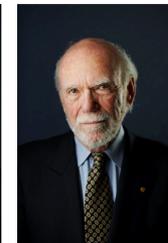
$h \sim 10^{-21}$



The Nobel Prize in Physics 2017



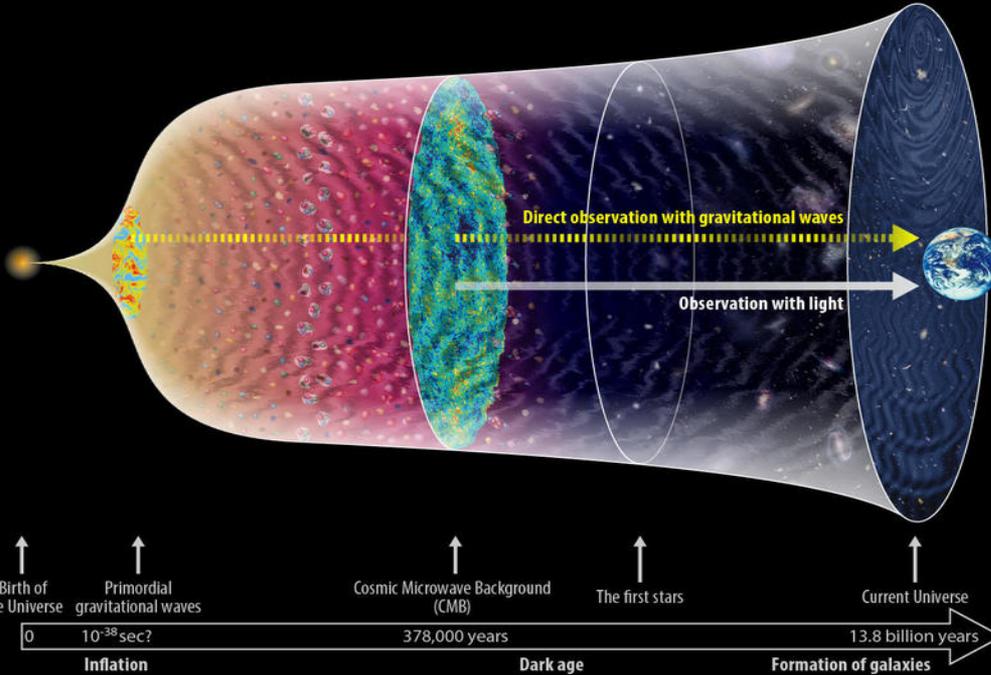
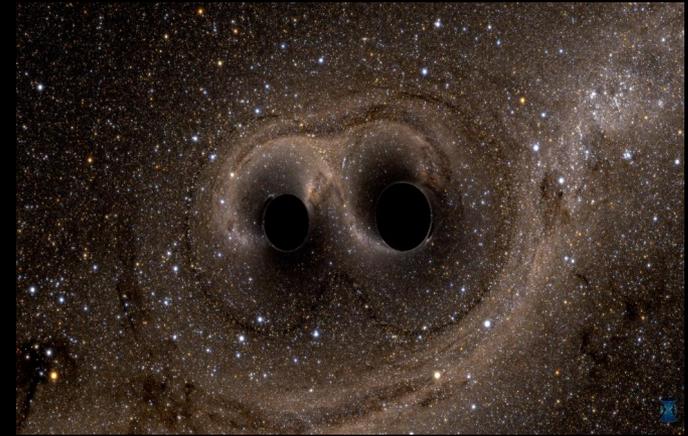
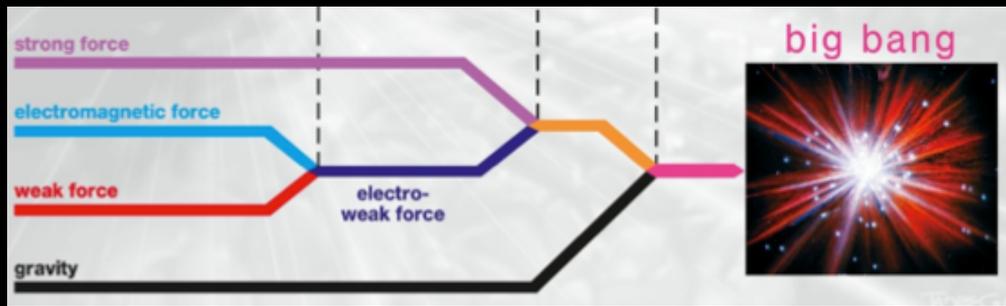
© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud
Rainer Weiss
Prize share: 1/2



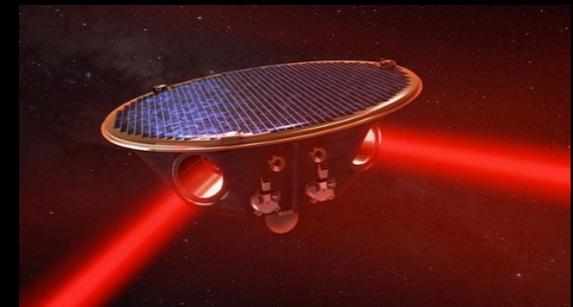
© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud
Barry C. Barish
Prize share: 1/4



© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud
Kip S. Thorne
Prize share: 1/4



- Window to EWK phase transition/inflation
- Independent measurement of the Universe Expansion rate
- Stringent tests of General Relativity
- Information on primordial black holes as Dark Matter ?
- Are we opening a window for formulating Quantum Gravity ?



FIN

