

# **CURSO FÍSICA DE PARTÍCULAS Y COSMOLOGÍA:**

## **Física de Partículas**

Angel M. Uranga

Instituto de Física Teórica UAM/CSIC, Madrid

[angel.uranga@uam.es](mailto:angel.uranga@uam.es)

# Física de Partículas

Partículas e interacciones

Angel M. Uranga

Instituto de Física Teórica UAM/CSIC, Madrid  
[angel.uranga@uam.es](mailto:angel.uranga@uam.es)

$\Phi$



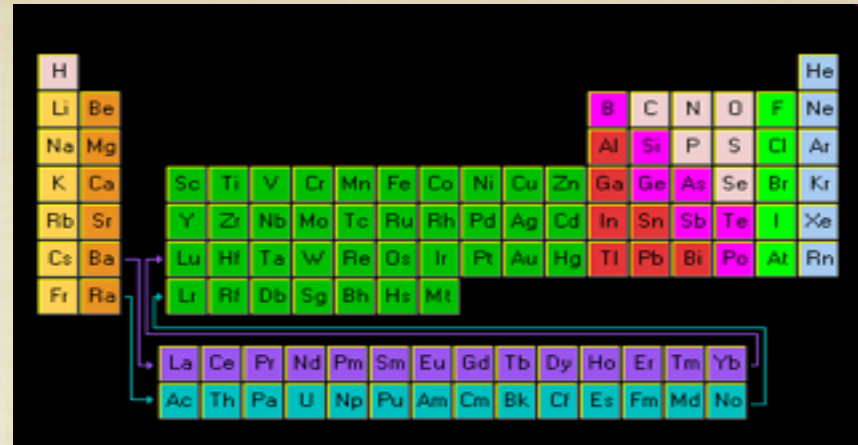
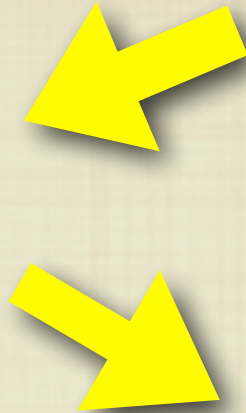
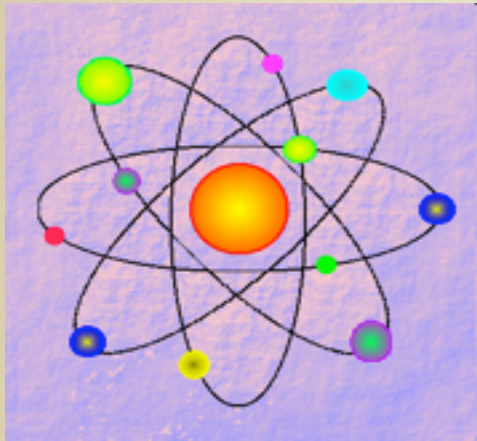
**RELATIVIDAD**

**CUANTICA**

*espaciotiempo*

*particulas*

# ¿Por qué hay tantas sustancias y objetos diversos?



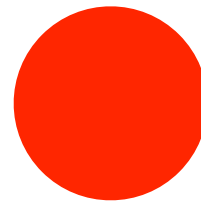
H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt									
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd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

**Tabla Periódica**

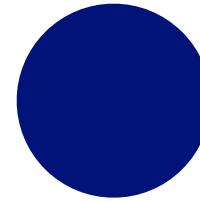
Partículas  
de materia

+

Partículas de  
interacción



*protón*

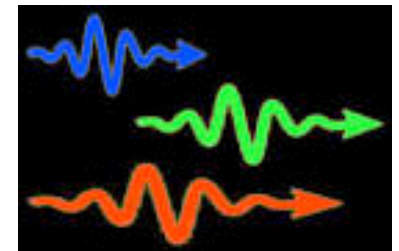


*neutrón*



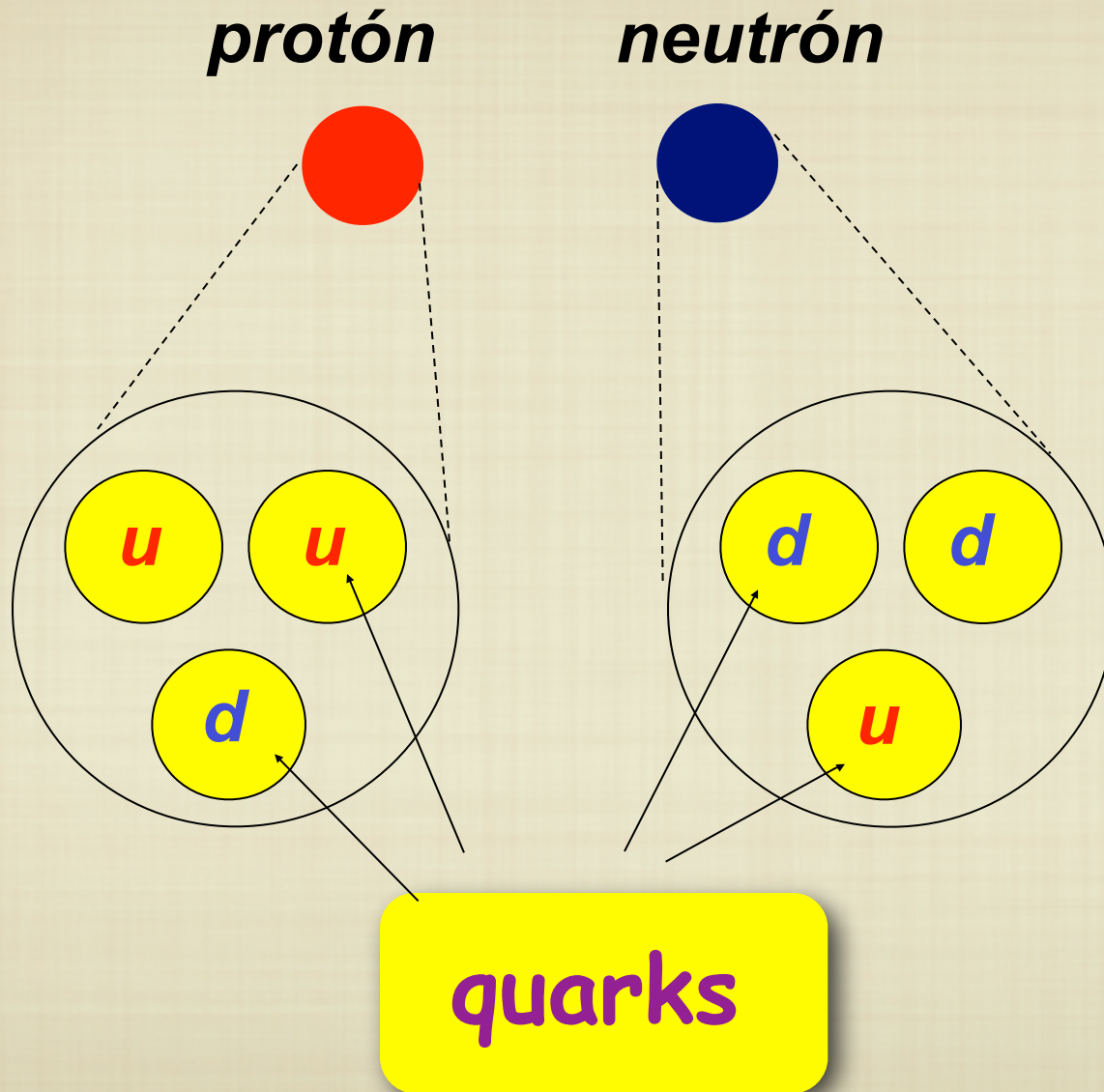
*electrón*

*Electromagnetismo*  
*Fotón*

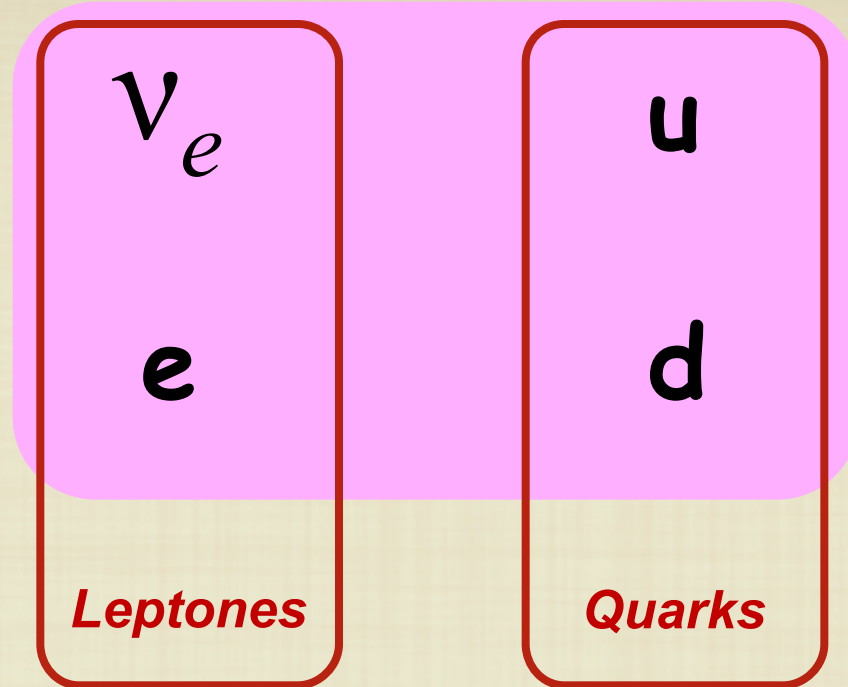




# Partículas de materia: Quarks



# Partículas de materia: Quarks y leptones

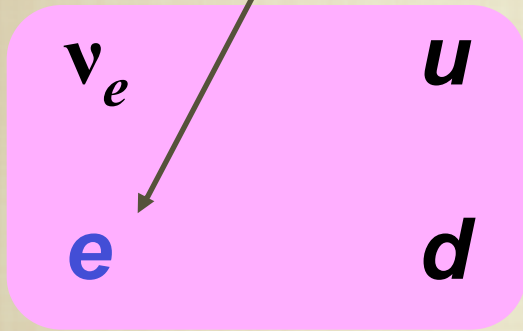


1<sup>a</sup> familia de partículas elementales

**casi** todo está hecho con ellas

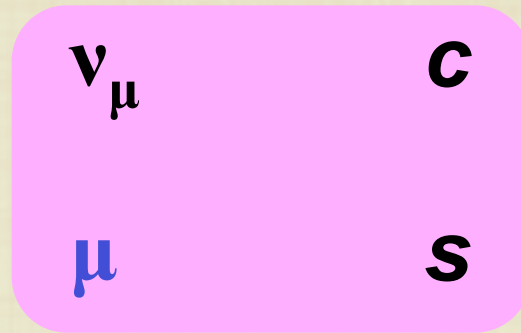
# Partículas de materia: Quarks y leptones

1897



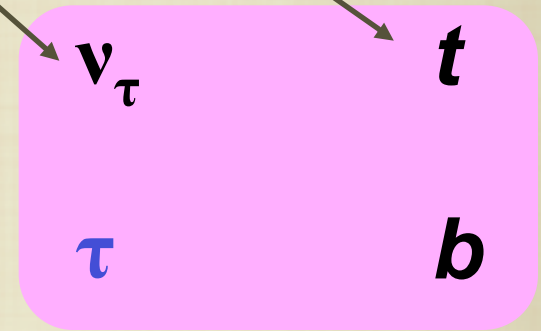
1<sup>a</sup> familia

2000



2<sup>a</sup> familia

1995

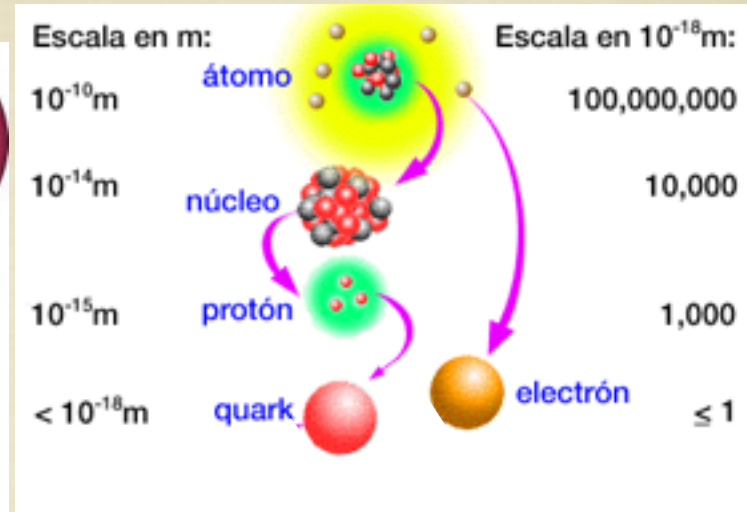
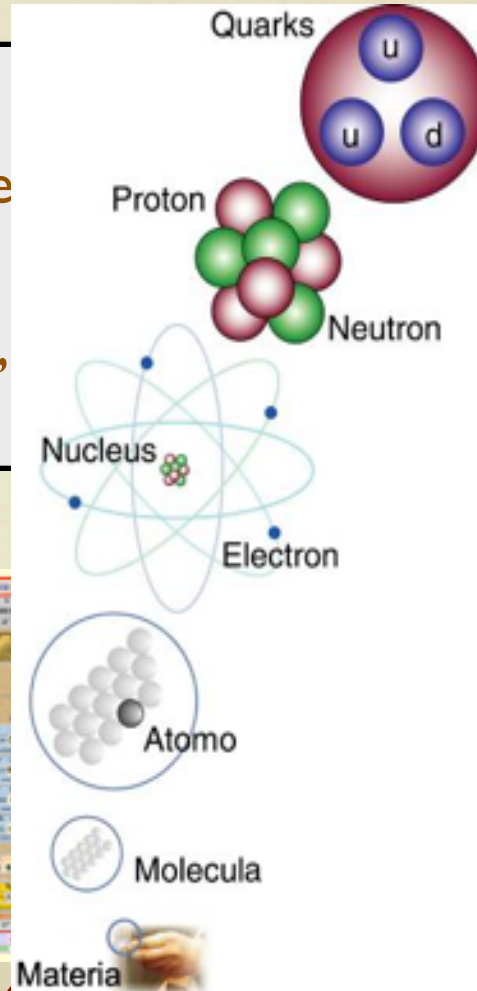


3<sup>a</sup> familia

# Quarks y leptones

Toda la materia conocida está compuesta de partículas elementales:

- Quarks: forman protone
- Leptones: p.ej. electrones,



s. XIX

**Elementary Particles**

Quarks	u	c	t	$\gamma$
	up	charm	top	photon
Leptons	d	s	b	g
	down	strange	bottom	gluon
Force Carriers	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	Z
	electron neutrino	muon neutrino	tau neutrino	Z boson
	e	$\mu$	$\tau$	W
	electron	muon	tau	W boson
	I	II	III	
Three Families of Matter				

s. XX



# Antimateria

**¡Y sus antipartículas!**

Misma masa y spin  
Cargas opuestas

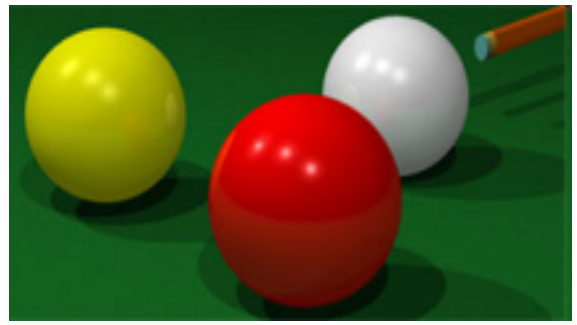


Por sí solas, estables

Los pares partícula-antipartícula se aniquilan

**La antimateria es una consecuencia de la Mecánica Cuántica y la Relatividad** (ver más adelante)

# Interacciones





# Interacciones

Todas estas interacciones son manifestaciones de sólo

4 interacciones básicas

gravitatoria

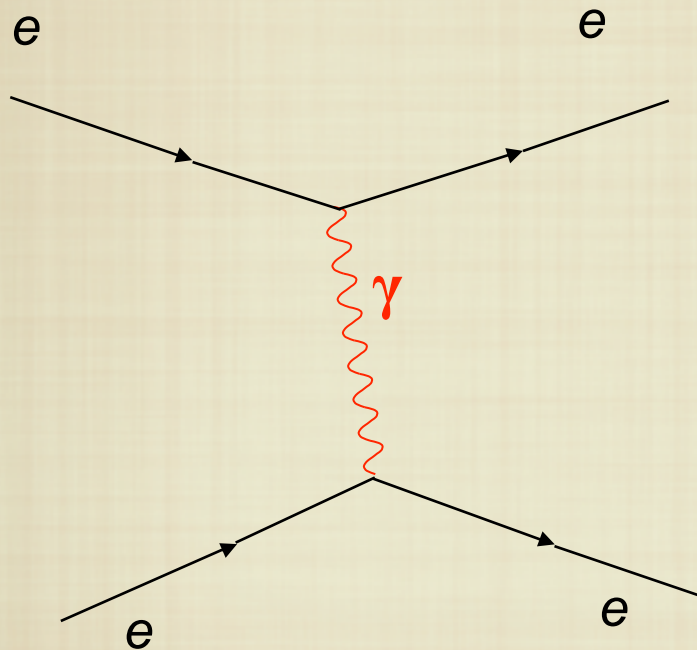
fuerte

electromagnética

débil

# Interacciones

Todas las interacciones están mediadas por otras partículas: **mensajeros de la interacción**



**Interacción Electromagnética**

➡ **Intercambio de fotones**

**Diagramas de Feynman**

Cálculo de amplitudes cuánticas mediante gráficos intuitivos

**Partícula virtual:** aparece y desaparece en el proceso.

Energía arbitrariamente alta, compatible con el principio de incertidumbre (vive un tiempo muy corto)

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar$$

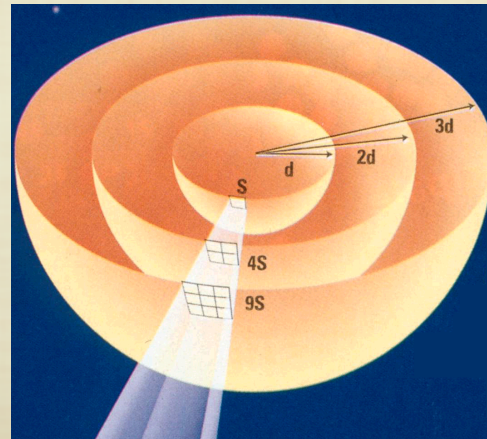
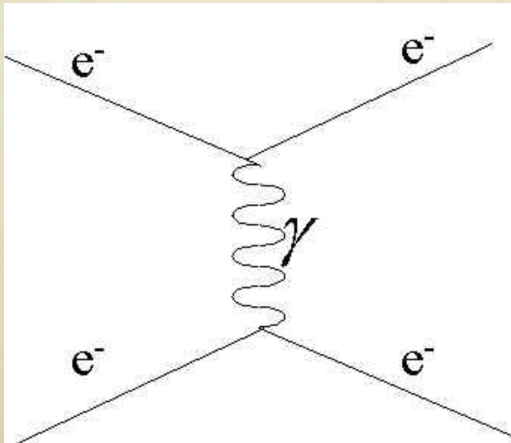
# Partículas virtuales

## Efectos reales de las partículas virtuales

La interacción electromagnética entre partículas cargadas se origina por intercambio de fotones (virtuales)

**Las cargas eléctricas emiten y absorben continuamente fotones virtuales**  
(la nube de fotones virtuales es el campo electromagnético)

La dependencia  $1/r^2$  en la ley de Coulomb describe la probabilidad de que uno de esos fotones sea absorbido por otra partícula cargada a una distancia  $r$



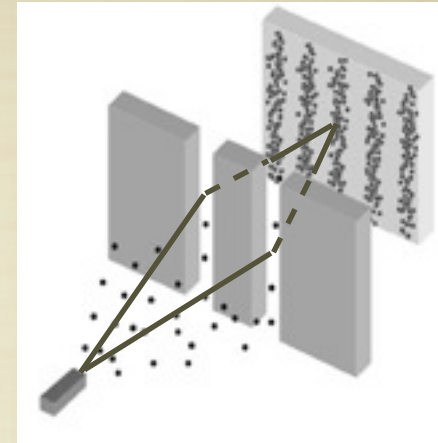
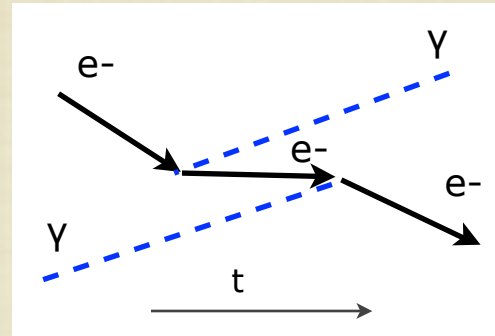
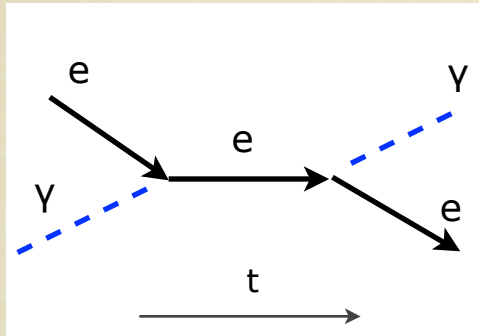
**ley  $1/r^2$**

# Diagramas y antimateria

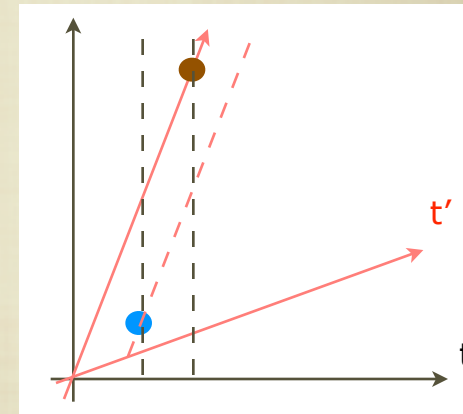
Los diagramas codifican las propiedades cuánticas y relativistas

- **Cuánticas:** Amplitud de probabilidad de un proceso =  
= suma sobre posibles maneras en que puede ocurrir  
(generalización del experimento de doble rendija)

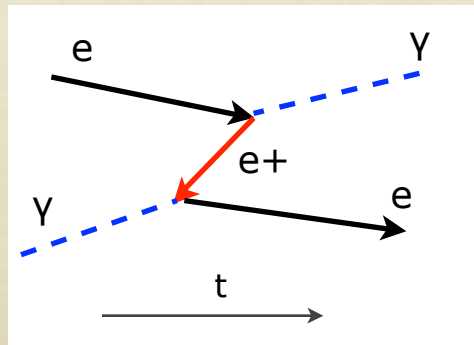
Ej: Efecto Compton



- **Relativistas:** Relatividad de la simultaneidad:  
Orden temporal de eventos puede depender del observador.  
Necesario sumar sobre diferentes ordenamientos temporales



**Antipartículas**=  
ipartículas viajando  
hacia atrás en el tiempo!



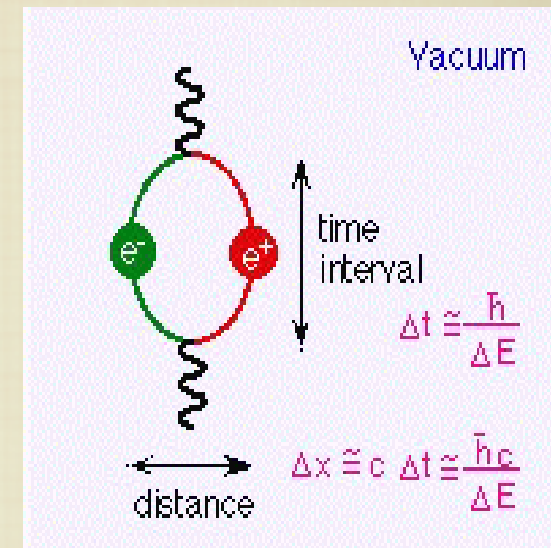
**Antipartículas:** consecuencia de la mecánica cuántica y la teoría de la relatividad

# Interacciones

**¡El vacío se convierte en un concepto complicado!**

Los campos cuánticos no pueden estar en reposo completo (principio de incertidumbre)

**FLUCTUACIONES DEL VACÍO** debidas al principio de incertidumbre



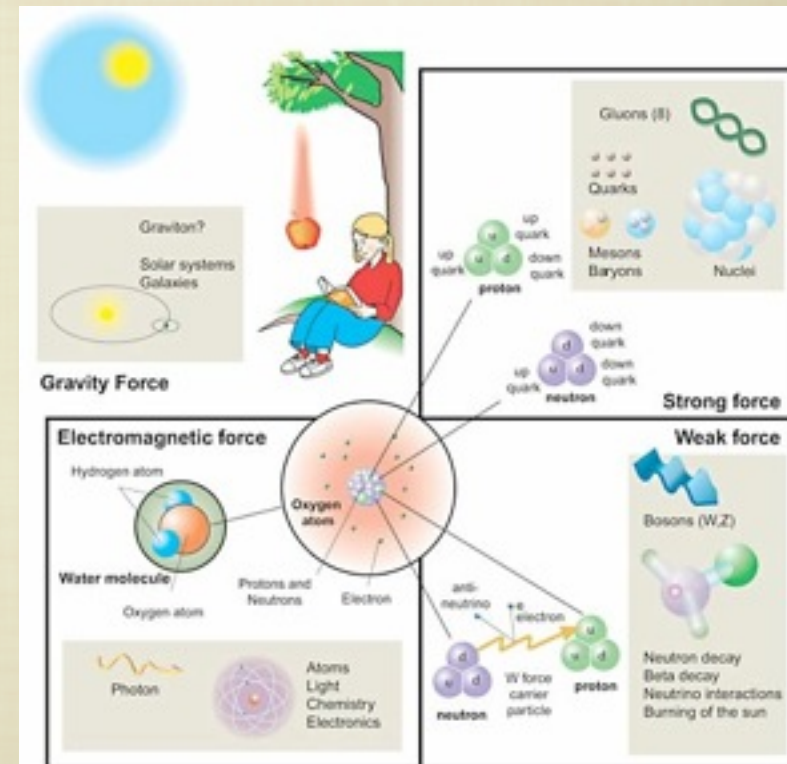
**La Teoría Cuántica de Campos y los diagramas de Feynman son el lenguaje natural para describir las interacciones a nivel cuántico.**



# Interacciones

Las partículas de materia interactúan mediante cuatro tipos de interacciones fundamentales, descritas como el intercambio de partículas de fuerza

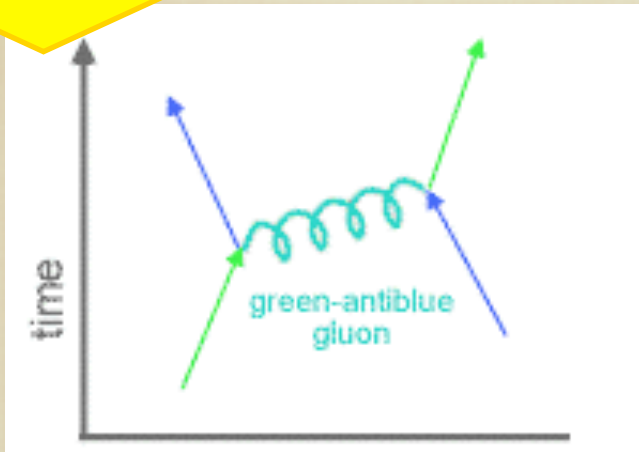
- **Electromagnetismo:** Fotón  
sin masa, largo alcance
- **Interacción fuerte:** gluón  
confina quarks en protón, neutrón  
sin masa, pero corto alcance
- **Interacción débil:** bosón Z, W  
reacciones nucleares  
masivos, corto alcance
- **Gravedad:** gravitón (?)  
sin masa, largo alcance  
muy débil pero acumulativa





# Interacciones fuertes o de color

gluones



Los **gluones** ("glue=pegamento") son los cuantos del campo que media las interacciones fuertes entre los quarks

Hay **8 gluones diferentes** \*  
Combinaciones color-anticolor



Diferencia con el electromagnetismo:  
Los gluones tienen carga de color  
¡AUTOINTERACCIÓN!

⇒ Confinamiento y libertad asintótica

\* ¿Por qué 8?

Forman una matriz

$$\begin{pmatrix} r\bar{r} & r\bar{v} & r\bar{a} \\ v\bar{r} & v\bar{v} & v\bar{a} \\ a\bar{r} & a\bar{v} & a\bar{a} \end{pmatrix}$$

Una de las 9 combinaciones no existe, el gluón "traza de la matriz"  $r\bar{r} + v\bar{v} + a\bar{a}$

# Interacciones fuertes o de color

## Confinamiento y libertad asintótica

La autointeracción entre entre la nube de gluones virtuales alrededor de cada quark produce antiapantallamiento: la carga de color aumenta con la distancia

### Libertad asintótica:

A distancias menores que  $10^{-13}$  cm los quarks y gluones son libres

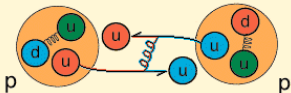
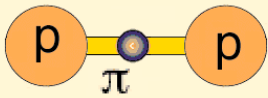
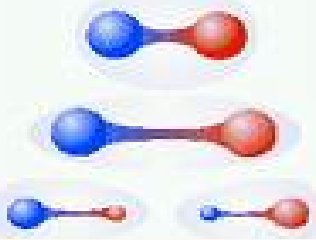
### Confinamiento:

A distancias mayores, la fuerza de color es muy intensa, los objetos coloreados se combinan en estados sin color

A pesar de que los mediadores tienen masa cero, la interacción fuerte es de corto alcance

Las interacciones fuertes entre bariones/mesones son un residuo de las interacciones gluónicas entre quarks

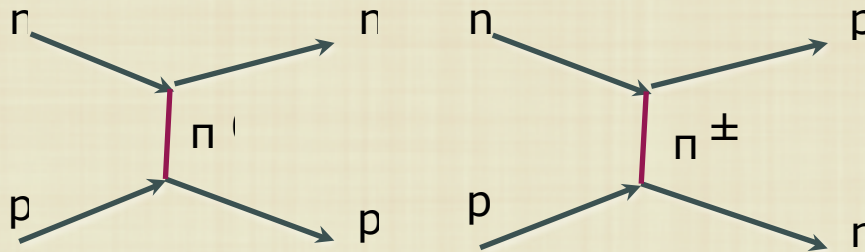
(la teoría de Yukawa es válida en el régimen nuclear)



# Interacciones fuertes o de color

**Modelo de Yukawa de la interacción fuerte:**  
mantiene unidos los protones y neutrones en el núcleo

analogía con electromagnetismo  
Intercambio de partículas, denominadas **pión**



Partículas masivas  $\Rightarrow$   
 $\Rightarrow$  **interacción de corto alcance**

Compatible con el principio de  
incertidumbre:  $1.4 \text{ fm} \sim 140 \text{ MeV}$

$$V(r) = -g^2 \frac{e^{-mr}}{r}$$

Análogo de la ley de Coulomb

**Interacción atractiva**



H. Yukawa



Banco Cuántico: ¡Oferta!  
Tome prestados  $140 \text{ MeV}$   
durante  $10^{-23} \text{ s}$ .

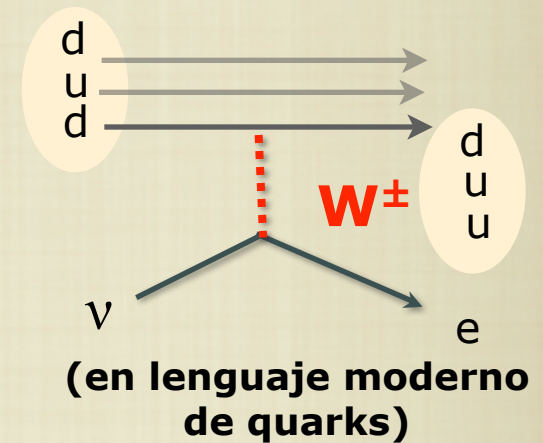
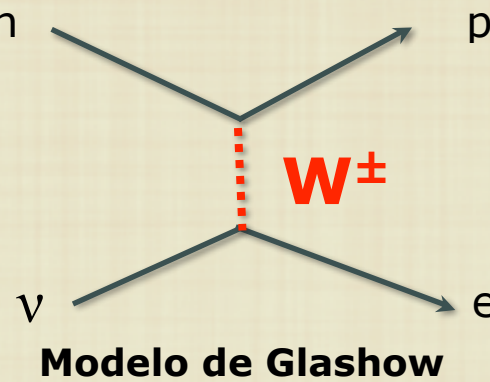
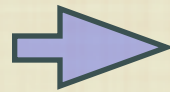
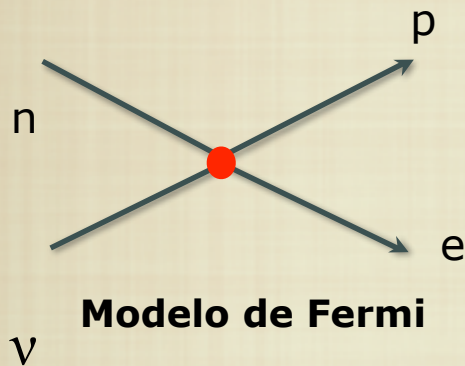
# Interacciones débiles

Única interacción que puede cambiar los tipos de partículas implicados

(Esencial para entender que **el Sol brilla**)

Aunque es poco intensa, es muy importante

## Diagramas



**Masa muy alta  $\sim 80$  GeV**

$\Rightarrow$  **corto alcance**

$\Rightarrow$  **acoplamiento pequeño**  $G_F = g^2/M_W^2$

Pero  $g^2$  comparable a constante de estructura fina  
(acoplo electromagnético)

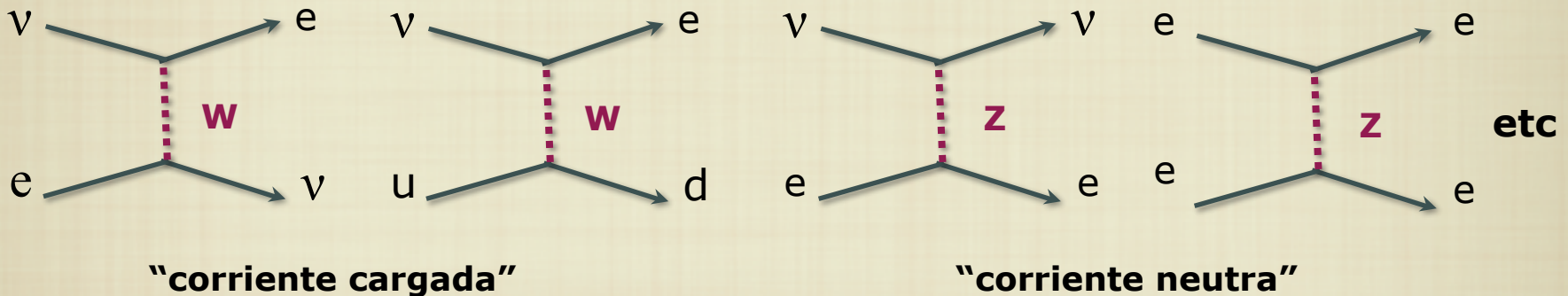


# Interacciones débiles

## Glashow, Salam, Weinberg: Interacción electro-débil

- La interacción electromagnética y la débil son diferentes aspectos de una misma fuerza "electrodébil"
- Los quarks y leptones tienen una "carga débil"
- Los intermediarios de la interacción débil son un "fotón pesado" ( $Z^0$ ) y dos bosones cargados ( $W^\pm$ ) con spin 1 y masas  $\sim 50-100$  GeV

En lenguaje moderno de quarks y leptones:

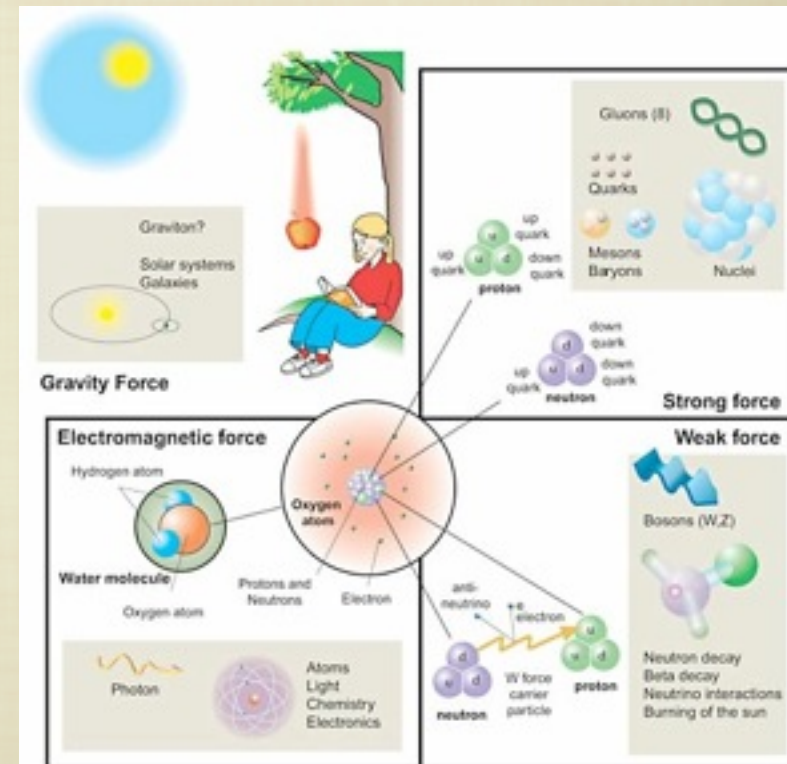


- Los bosones Z/W adquieren su masa por interacción con un campo nuevo (**Higgs**)
- Sólo la polarización levógira siente las interacciones débiles (violación de paridad, Wu et al 1957)

# Interacciones

Estas partículas de materia interactúan mediante cuatro tipos de interacciones fundamentales, descritas como el intercambio de partículas de fuerza

- Electromagnetismo: Fotón  
sin masa, largo alcance
- Interacción fuerte: gluón  
confina quarks en protón, neutrón  
sin masa, pero corto alcance
- Interacción débil: bosón Z, W  
reacciones nucleares  
masivos, corto alcance
- Gravedad: gravitón (?)  
sin masa, largo alcance  
muy débil pero acumulativa





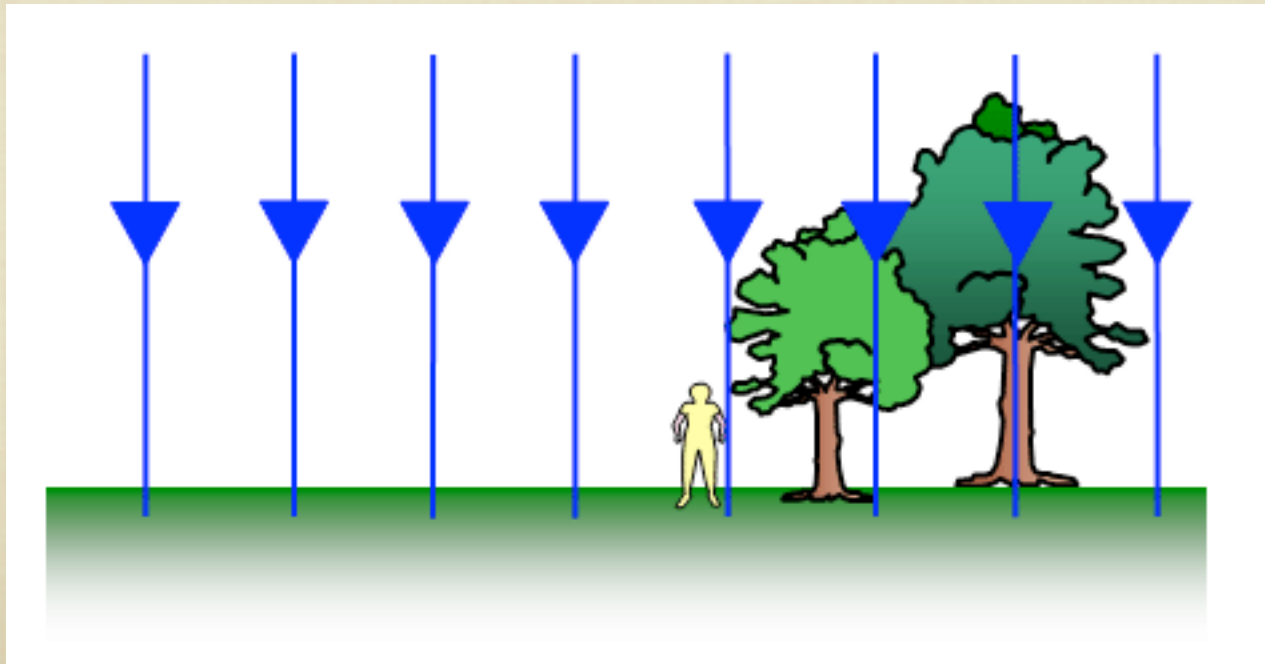
# Campo de Higgs

¿Cómo adquieren masa las partículas? El campo de Higgs

**Campo:**

magnitud definida en cualquier punto del espacio (y del tiempo)

Ejemplo: campo gravitatorio



# Campo de Higgs

¿Cómo adquieren masa las partículas? El campo de Higgs

**Campo:**

magnitud definida en cualquier punto del espacio (y del tiempo)

Ejemplo: campo gravitatorio

**Campo de Higgs:**

Similar, con la diferencia de que no tiene una dirección  
(campo escalar)



# Campo de Higgs

¿Cómo adquieren masa las partículas? El campo de Higgs

W,Z  
fotón



La masa de las partículas elementales es la manifestación de sus interacciones con el campo de Higgs

# Bosón de Higgs

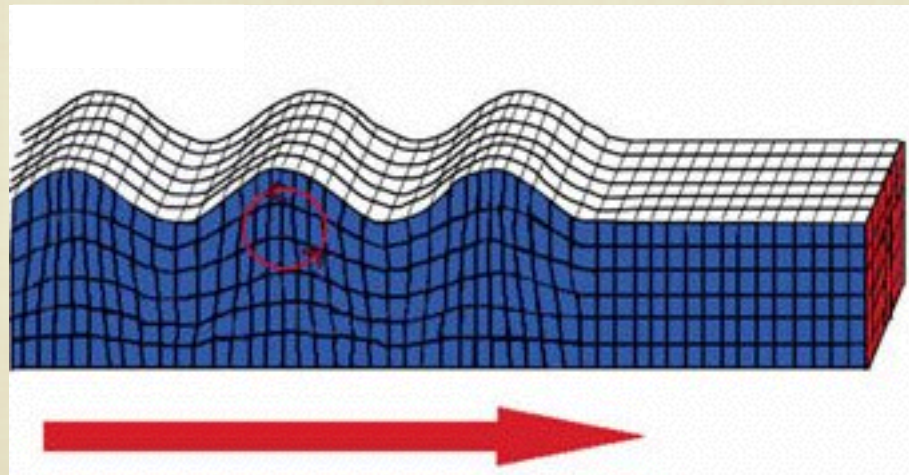
**Bosón de Higgs:**

Partícula (“cuanto”) asociada al campo de Higgs

Bosón de Higgs



Ondas en el  
campo de Higgs



¡ Descubierta en el LHC en CERN (ATLAS, CMS) en 2012 !



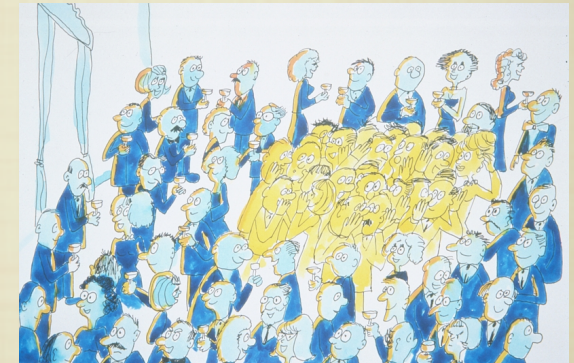
# Higgs

## Masa (inercia) de las partículas: "fricción en el vacío"

Masa de una partícula, proporcional a su acoplamiento con el campo de Higgs



**La partícula de Higgs es el cuanto asociado al campo de Higgs**  
**Es una fluctuación del campo de Higgs**



El modelo de Higgs predice las propiedades de la partícula de Higgs

¡ Descubierta en el LHC en CERN (ATLAS, CMS) en 2012 !

# Higgs y cia.

## Mecanismo de Brout-Englert y Higgs, partícula de Higgs



P. Higgs

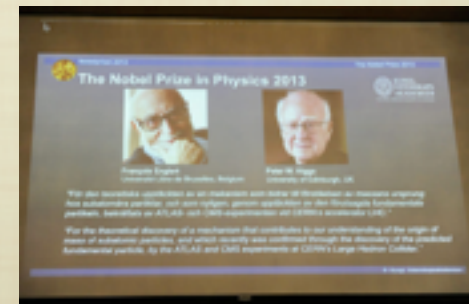


F. Englert




















Nobel de Física 2013

(tras el descubrimiento  
en el CERN)



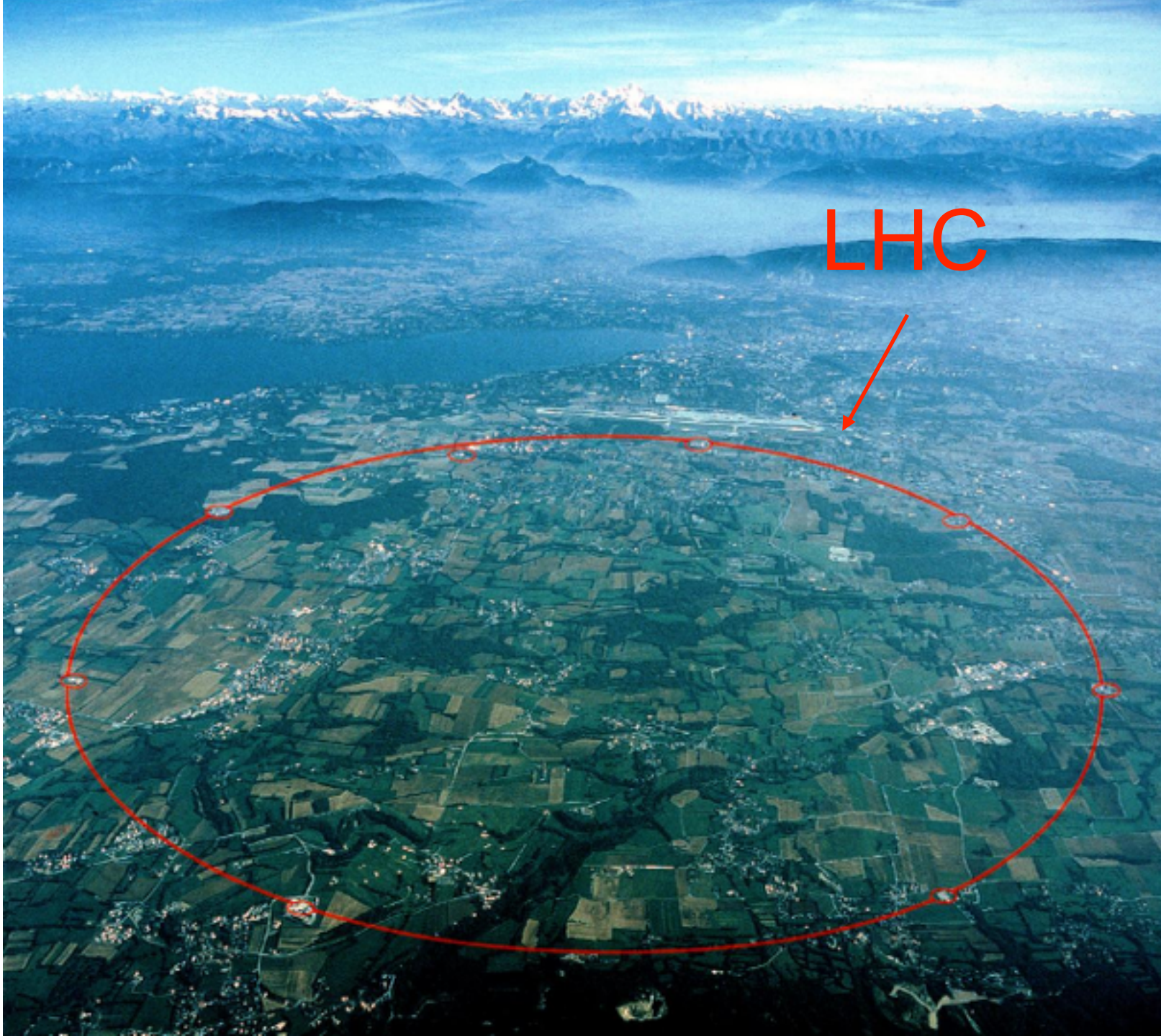


# El Modelo Estándar de Partículas Elementales

	partículas materiales			partículas gauge		
	1ra gen.	2da gen.	3ra gen.	Fuerza fuerte		
QUARKS	 $u$ <i>up</i>	 $c$ <i>encanto</i>	 $t$ <i>top</i>	 $g$ <i>gluón</i>		
	 $d$ <i>down</i>	 $s$ <i>extraño</i>	 $b$ <i>belleza</i>			
LEPTONES	 $\nu_e$ <i>neutrino e</i>	 $\nu_\mu$ <i>neutrino <math>\mu</math></i>	 $\nu_\tau$ <i>neutrino <math>\tau</math></i>	 $\gamma$ <i>fonón</i>		
	 $e^-$ <i>electrón</i>	 $\mu^-$ <i>muón</i>	 $\tau^-$ <i>tau</i>			
partícula(s) escalar(es)				 $H$ <i>Higgs</i>  ?  ?    . . .		

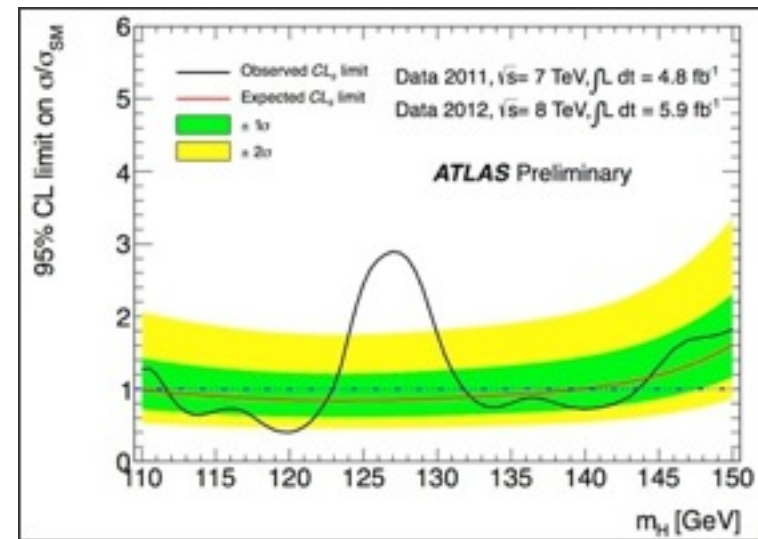
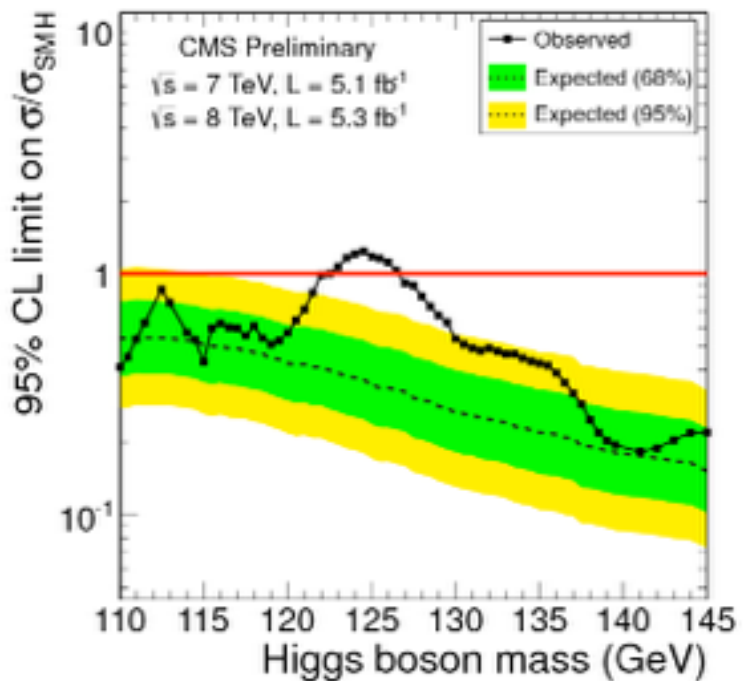
## Ingredientes del Modelo Estándar

**Una proeza del intelecto humano  
Describe la materia y fuerzas conocidas,  
con un rango de validez de 20 órdenes de magnitud  
y con una precisión asombrosa**



LHC





In summary

We have observed a new boson with a mass of  
 **$125.3 \pm 0.6 \text{ GeV}$**   
 at  
 **$4.9 \sigma$**  significance !

Julio 2012



# Gravitación y Relatividad

Relatividad General y Cosmología

Angel M. Uranga

Instituto de Física Teórica UAM/CSIC, Madrid

[angel.uranga@uam.es](mailto:angel.uranga@uam.es)



# ¿ Y la interacción gravitatoria ?

**Domina a escalas cotidianas, y a nivel cósmico**

pero irrelevante a nivel de partículas elementales

gravitón

**A estas grandes escalas basta con la descripción clásica**

Partículas sin masa  $\Rightarrow$  largo alcance

La ley de Newton es similar a la de Coulomb, pero muchíiiiiiiiiiiiiisimo menos intensa

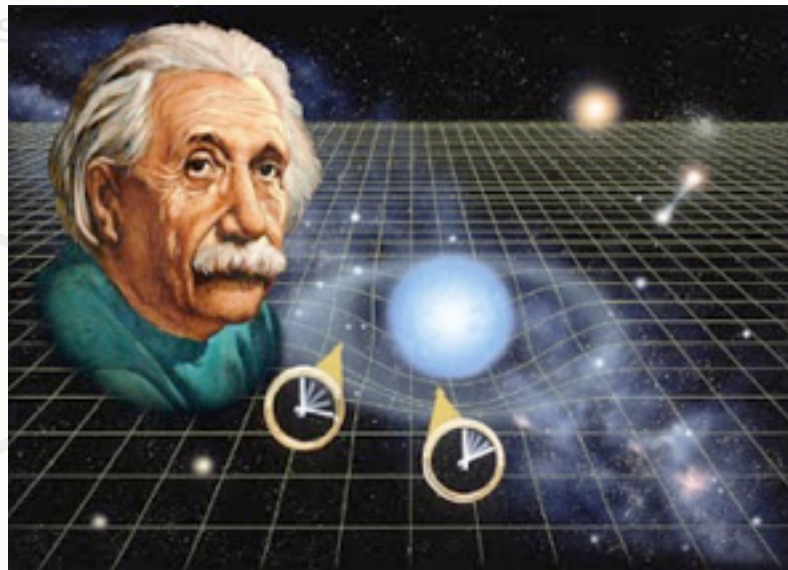
**Teoría de la Relatividad General de Einstein**

La versión cuántica **no** es matemáticamente consistente

La teoría clásica es

Gravedad:  
Sistemas  
muy masivos

Mecánica Cuántica:  
Sistemas  
muy pequeños



Agujeros negros



Origen del Big Bang

# Universo

La visión del cielo nocturno, del Universo, mueve al ser humano hacia estas preguntas fundamentales

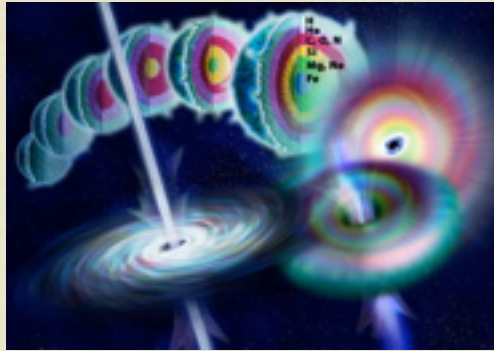


Antes del s. XX, el Universo se consideraba infinito, esencialmente inmutable, y regido por la ley de la gravitación de Newton

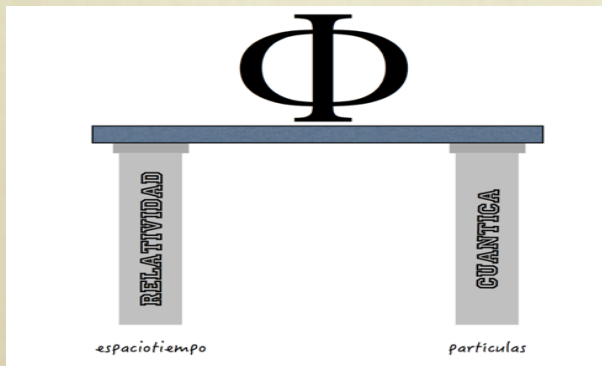
# Universo

Sin embargo, gran riqueza y actividad en el Cosmos

Las estrellas nacen, viven y mueren



Las galaxias son activas

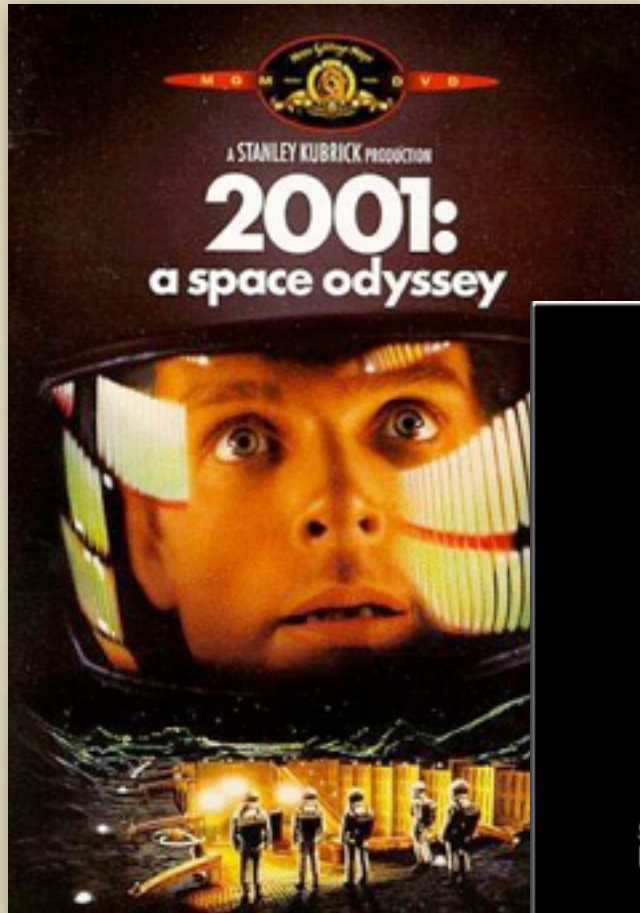


etc... agujeros negros, estrellas de neutrones, ...



# Universo

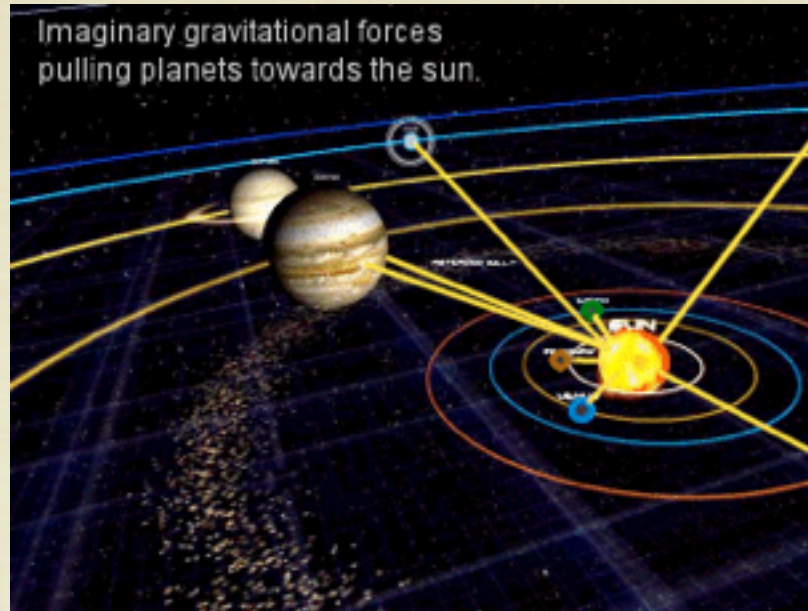
... que ejerce una fascinación sin límite en el ser humano





# Interacción gravitatoria

La gravitación Newtoniana es una acción instantánea a distancia



Pero la Relatividad prohíbe que nada se propague más rápidamente que la velocidad de la luz

**La gravedad de Newton  
es incompatible con la teoría de la relatividad**

# Principio de equivalencia

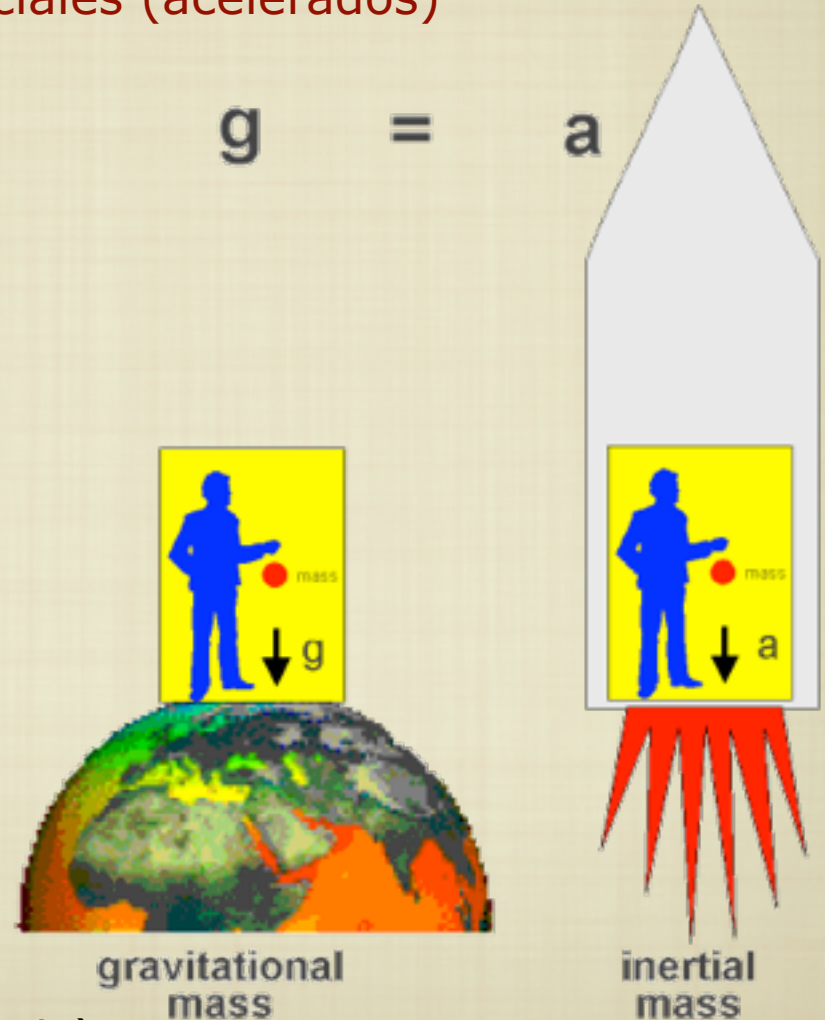
**Relatividad General** (Einstein): leyes físicas para observadores en sistemas de referencia no inerciales (acelerados)

⇒ **Principio de equivalencia**

Una aceleración es indistinguible de un campo gravitacional

(masa inercial = masa gravitatoria)

$$g = a$$

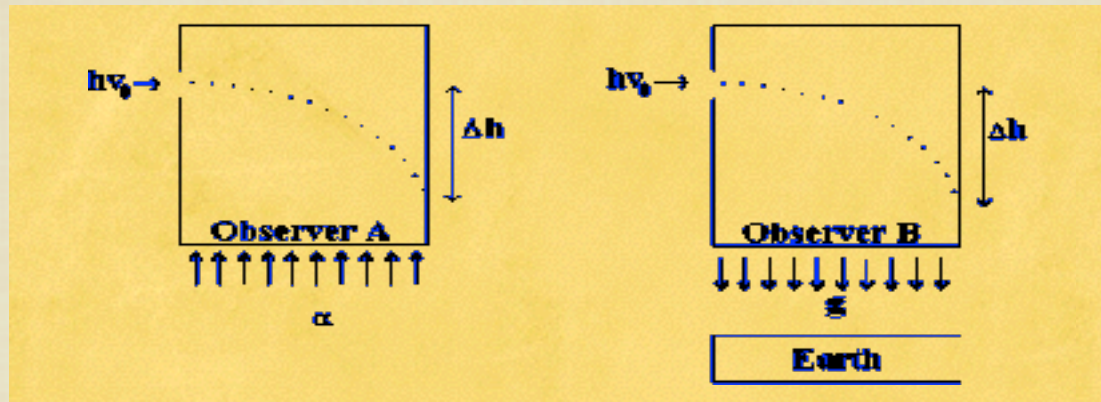


"El pensamiento más feliz de mi vida"

*"The happiest thought of my life"* (A. Einstein)

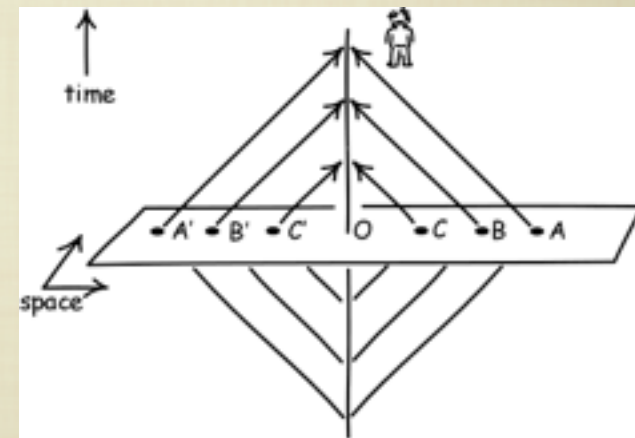
# Curvatura

⇒ Las trayectorias de la luz se curvan en campos gravitatorios



Recordemos que en Relatividad, los rayos de luz son un ingrediente crucial en la definición operativa del espacio-tiempo

**¡La gravedad se describe como la curvatura del espacio-tiempo!**





# Curvatura

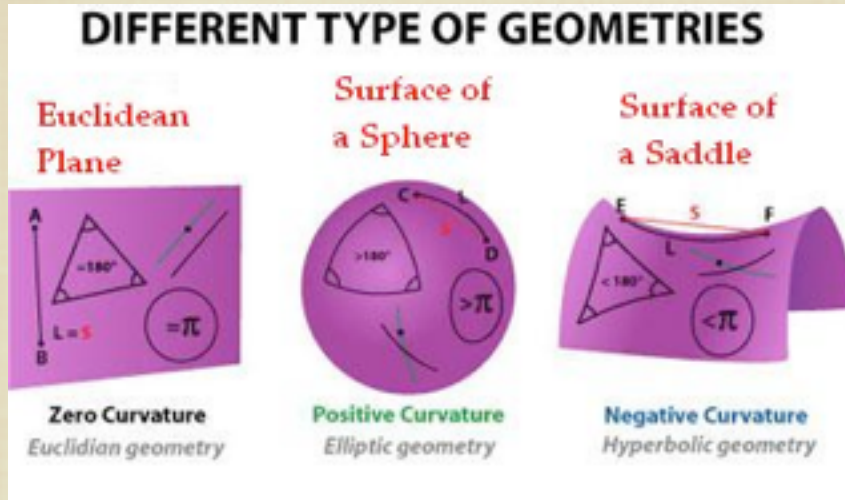


**i Nos lanzamos al estudio  
de espacios curvos !**



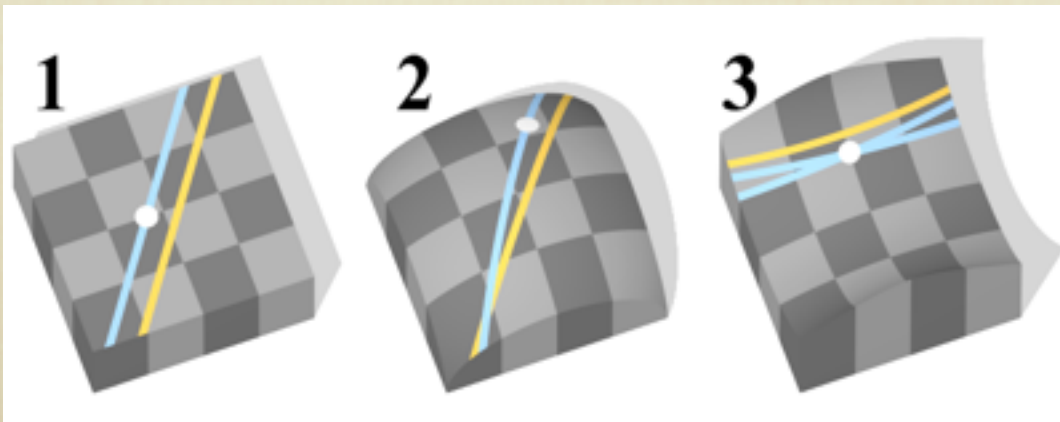
# Curvatura

Plana, curvatura positiva o curvatura negativa



Carl Friedrich Gauss  
s.XIX

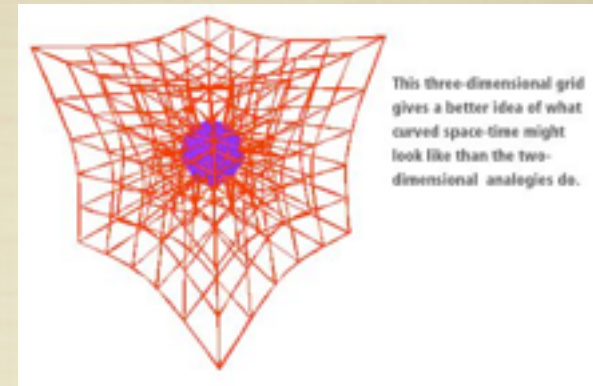
Suma de los ángulos de un triángulo igual que, o mayor o menor a 180 grados



Líneas paralelas permanecen paralelas, o convergen, o divergen

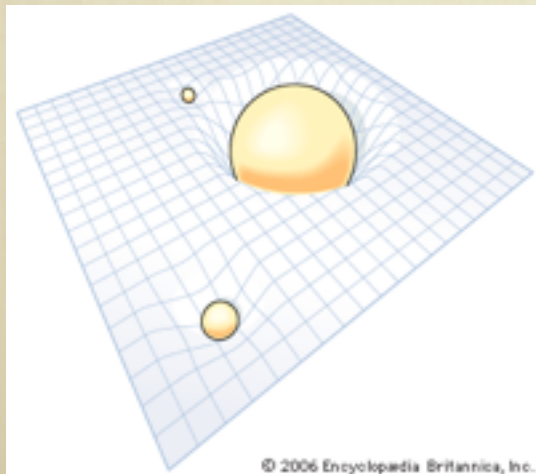
# Interacción gravitatoria

**¡La gravedad se describe como la curvatura del espacio-tiempo!**

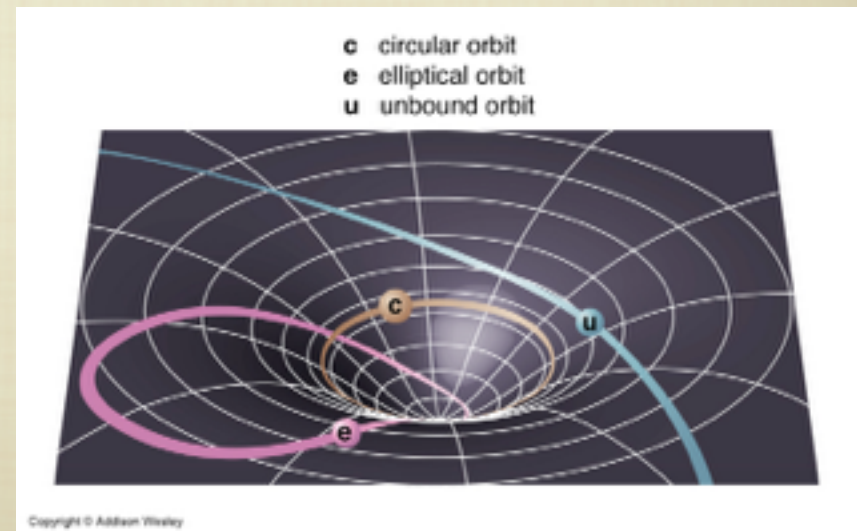


## Ecuaciones de Einstein:

- La Materia dicta al Espacio cómo curvarse



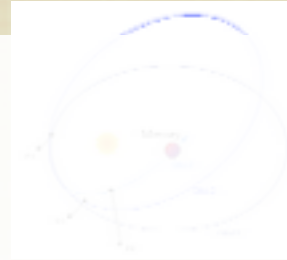
- El Espacio dicta a la Materia cómo moverse



# Relatividad General

## Tests clásicos

- Precesión anómala del perihelio de Mercurio



## GPS

- Lentes gravitacionales: Eddington



- Cor Pound

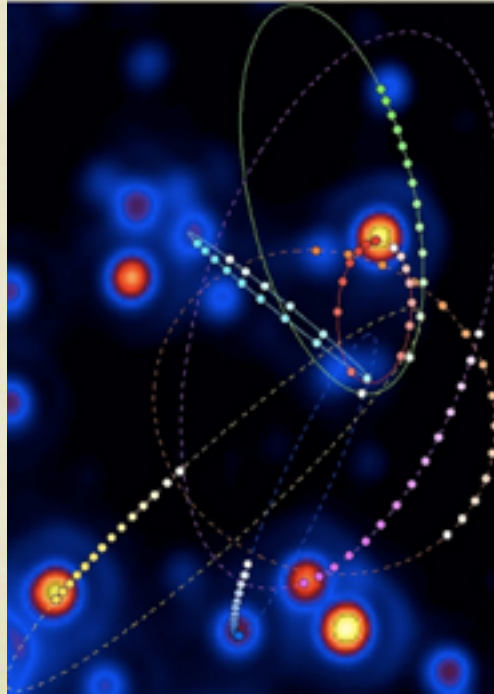
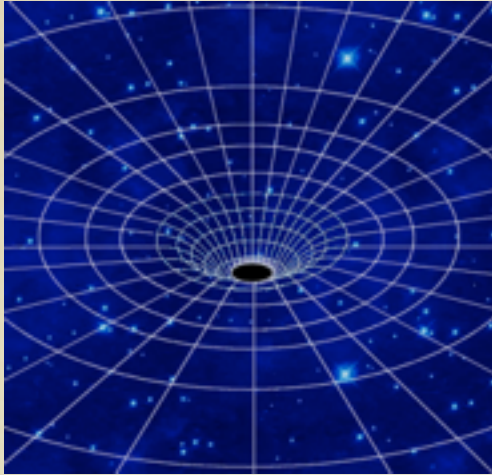


# Relatividad General

y fenómenos espectaculares, p.ej **Agujeros negros**

K. Schwarzschild

Campo gravitatorio tan intenso  
que ni la luz puede escapar



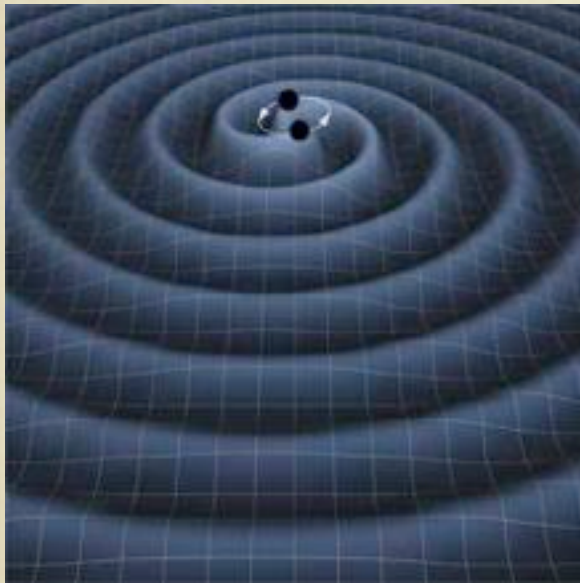
$$c^2 d\tau^2 = \left(1 - \frac{r_s}{r}\right) c^2 dt^2 - \left(1 - \frac{r_s}{r}\right)^{-1} dr^2 - r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2)$$

# Relatividad General

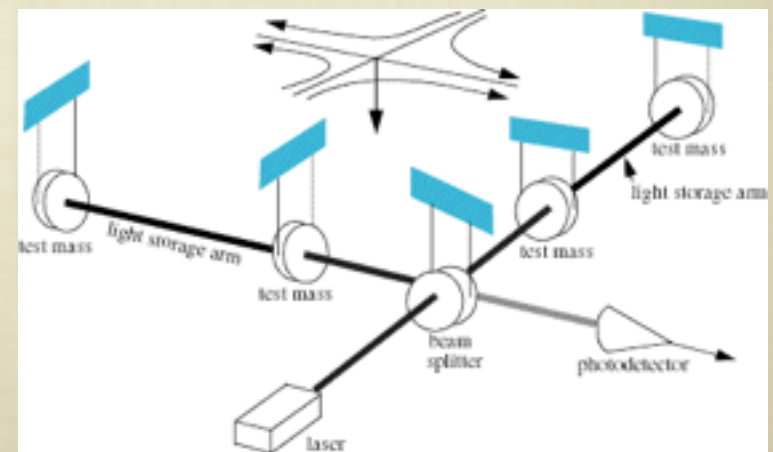
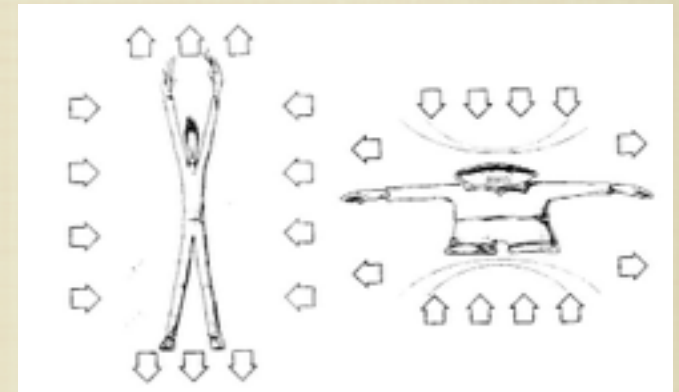
## y fenómenos espectaculares, p.ej Ondas gravitacionales

Distorsiones del espacio-tiempo que se propagan como ondas análogas a las electromagnéticas

Se busca su detección directa con interferómetros (LIGO, LISA)



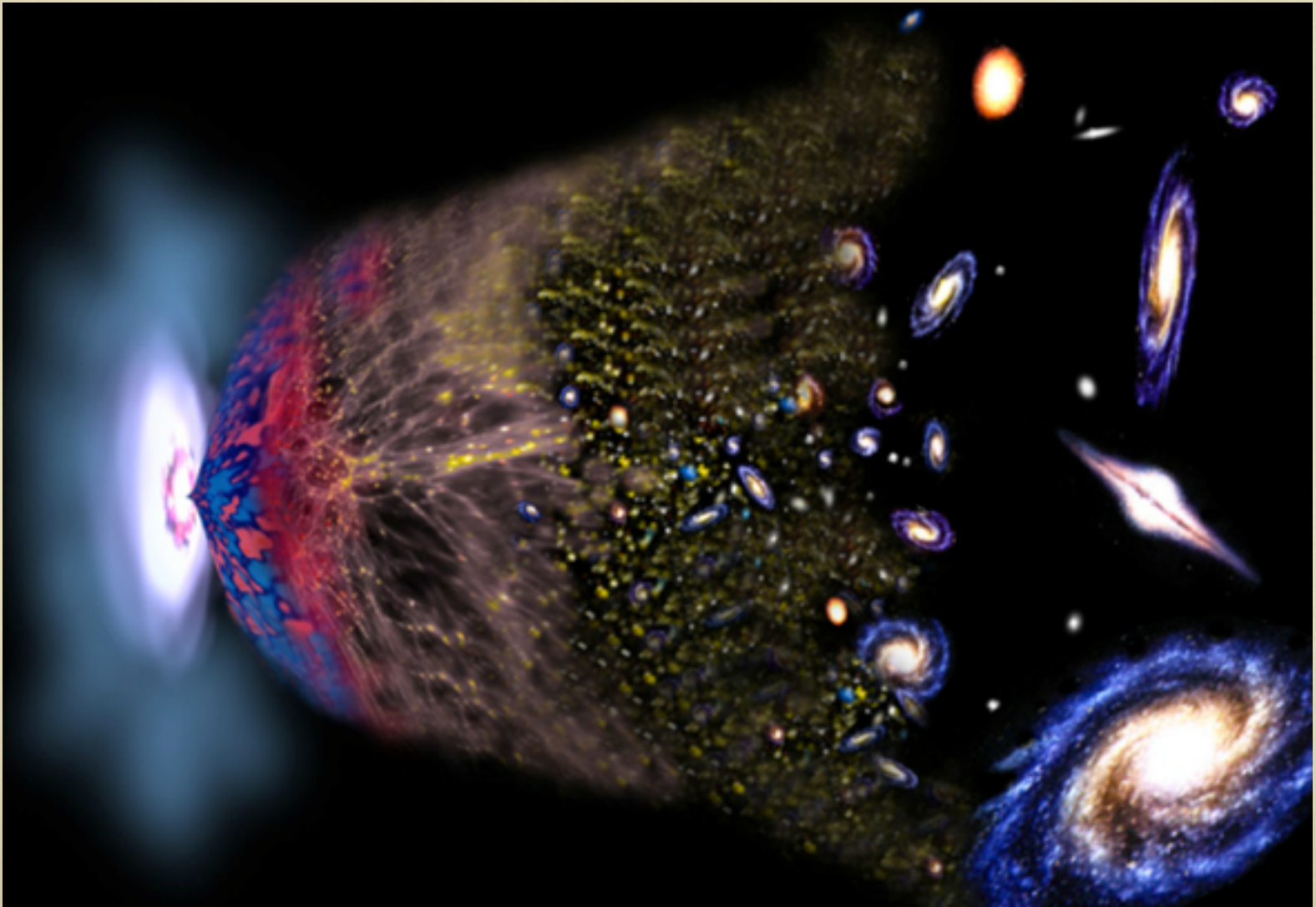
Medidas indirectamente como pérdida de energía en púlsares binarios



# Cosmología

**Pero la más fascinante...**

**Aplicación a Universo dinámico y en evolución**



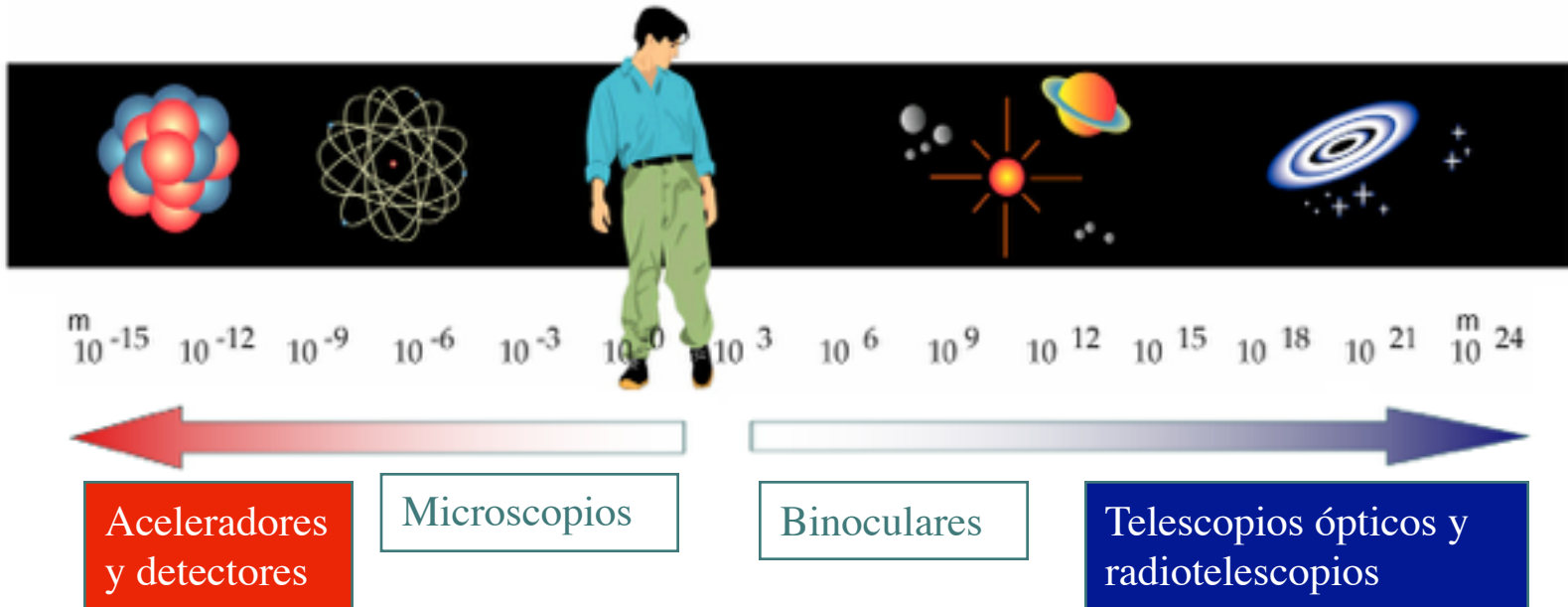


# THE TWO FRONTIERS OF PHYSICS

## LAS DOS FRONTERAS DE LA FISICA

La física de partículas estudia la materia en sus dimensiones más diminutas

La astrofísica y la cosmología estudian la materia en sus dimensiones más grandes

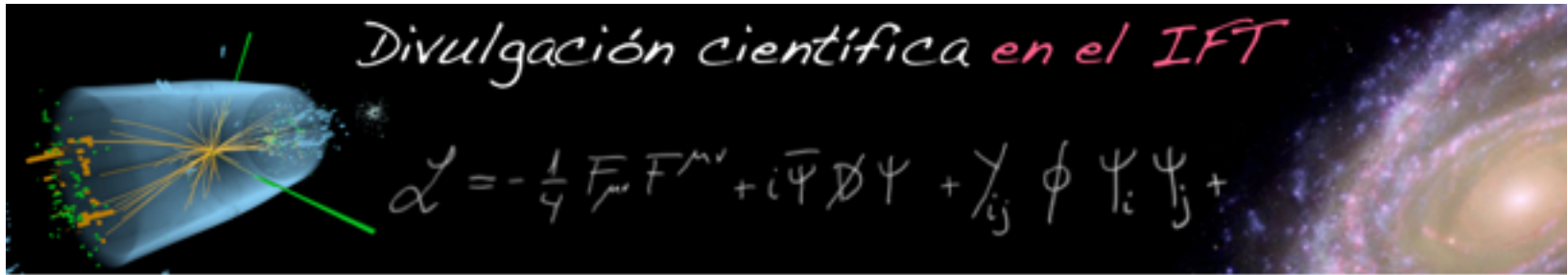


*¡ Muchas Gracias !*



# Para más información...

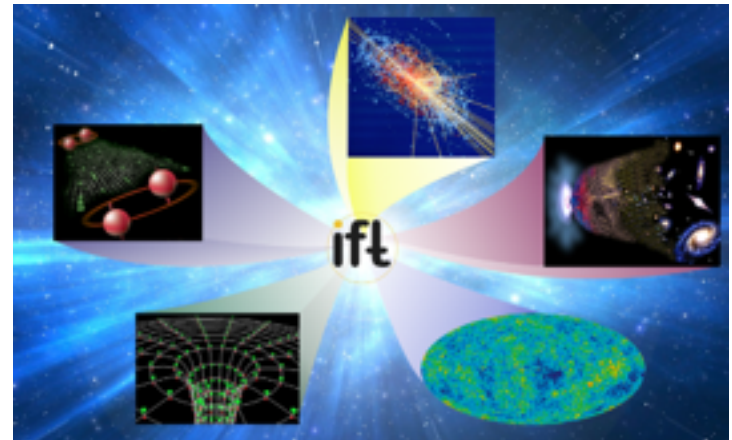
---



<http://projects.ift.uam-csic.es/outreach/index.php/es/>

Igualmente, <http://www.ift.uam-csic.es/>  
y click en “Divulgación”

- artículos, charlas
- “pregunta a un científico”
- Google hangouts
- y más...



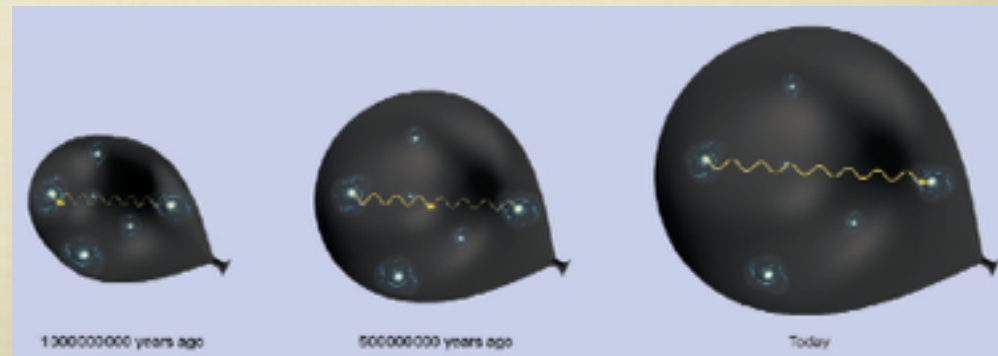
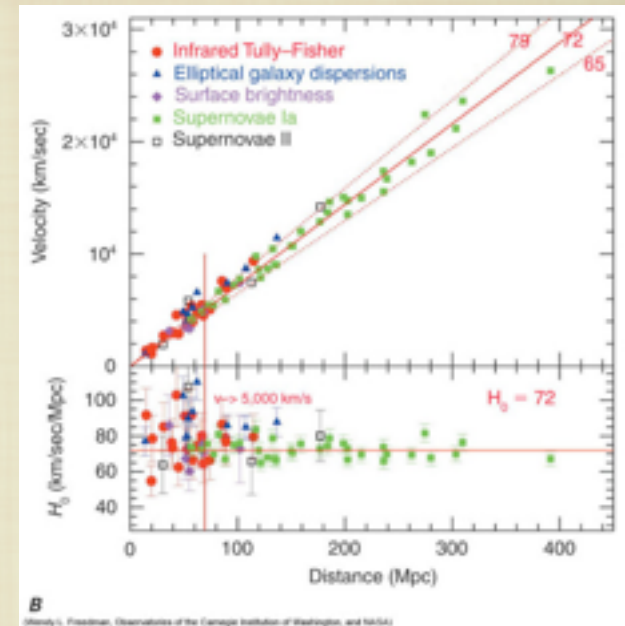
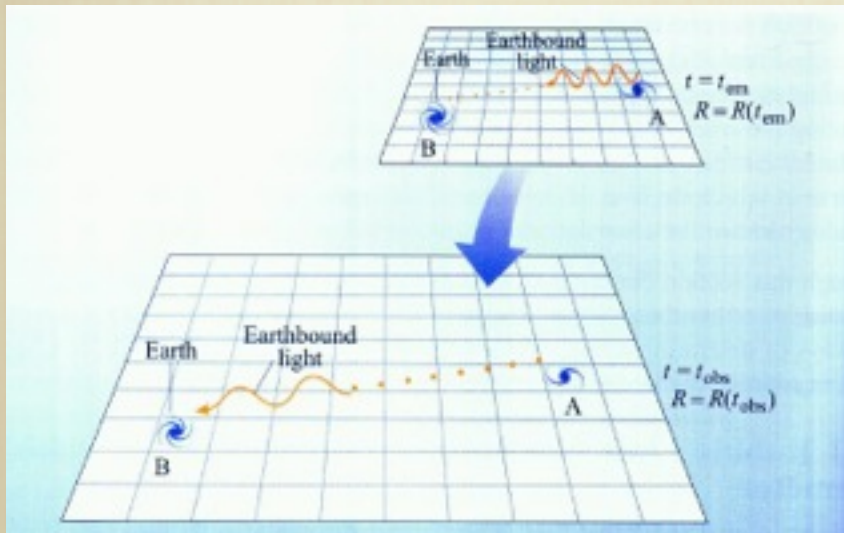


# Cosmología

El Universo es dinámico y se expande con el tiempo

Hubble midió las velocidades de alejamiento entre galaxias (1922):

¡El espacio entre galaxias se expande!



# Cosmología

Principio del Universo hace aprox. 13.000.000.000 años  
Big Bang: Explosión primigenia en la que está concentrado todo el Universo conocido

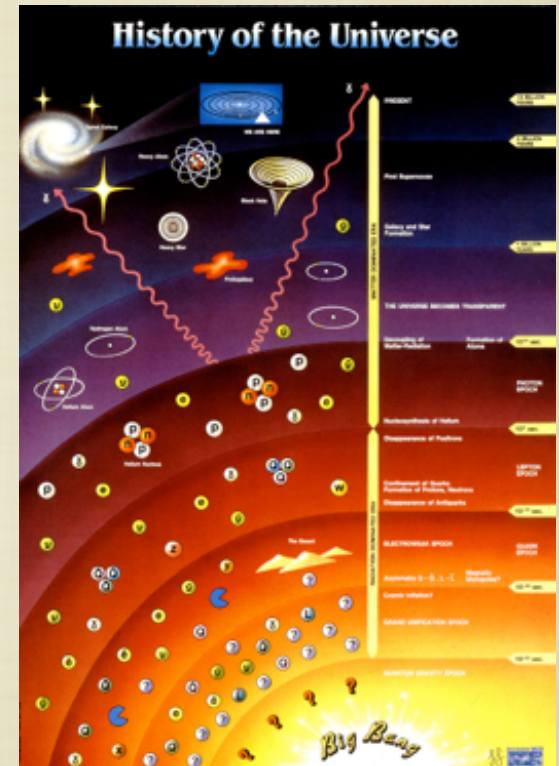


G. Gamov

- Primeras fases, pura radiación (fotones).
- Posteriormente aparecen las partículas (protones, neutrones, electrones).
- Con el progresivo enfriamiento se formaron núcleos, luego los átomos, etc hasta finalmente estructuras astronómicas (estrellas, galaxias)

**Predicciones claras y correctas:**

- **Nucleosíntesis primordial:**
- **Radiación de fondo de microondas**
- **Formación de estructura**

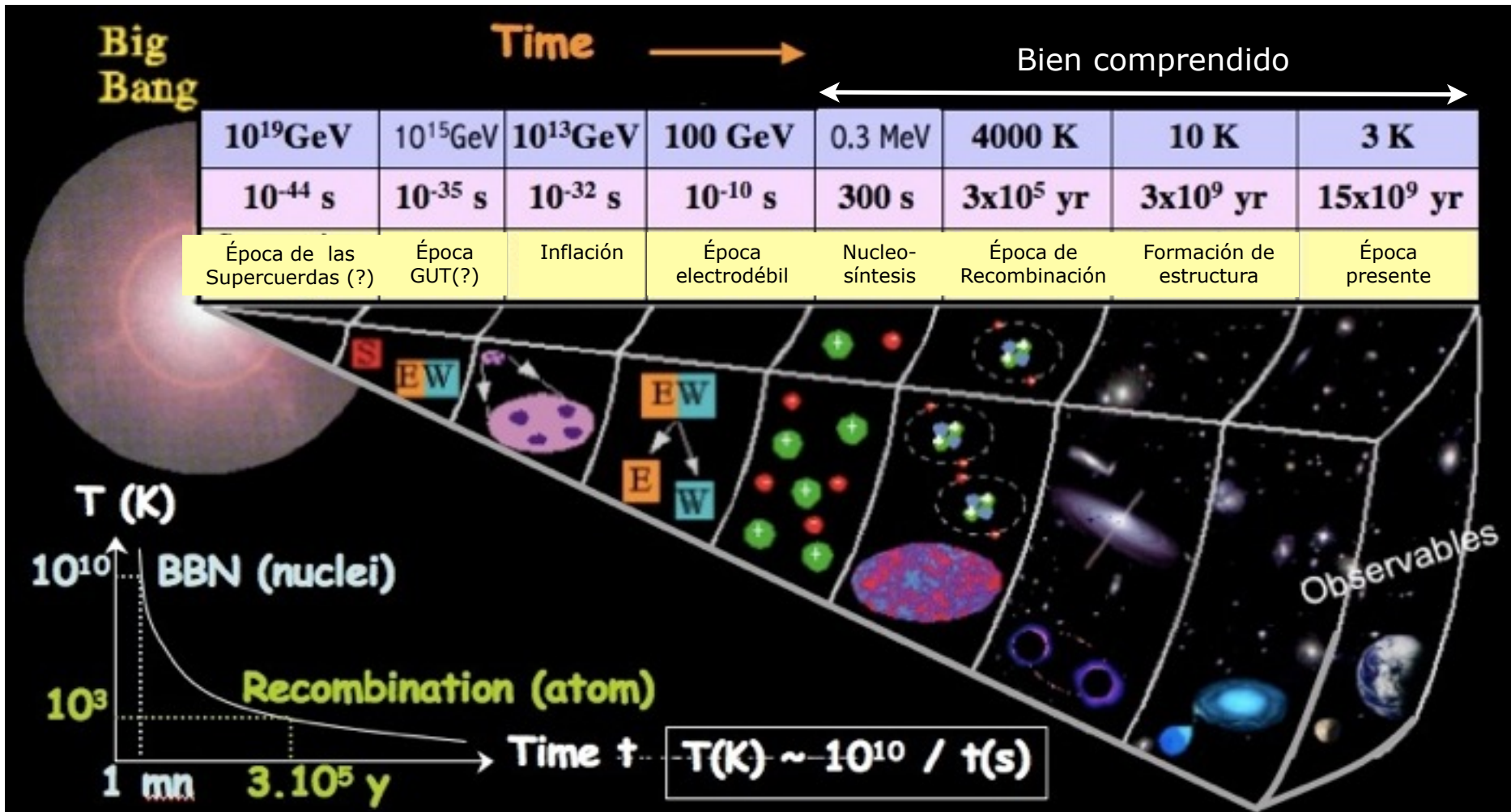


**¡Fascinante nueva visión del Universo!**

# Terra incognita

Nuestro conocimiento incompleto de las leyes física a altas energías no nos permiten retroceder hasta el "instante cero"

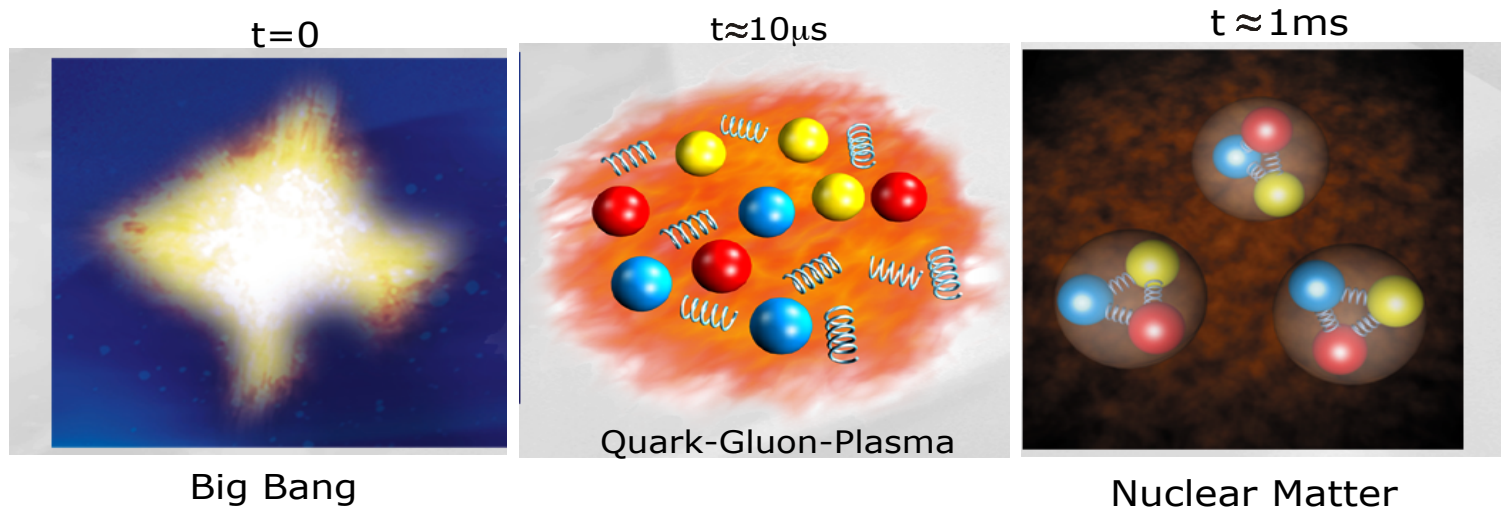
Pero nos proporcionan una imagen bastante detallada de la evolución del Universo a partir de las primeras fracciones de segundo





# Física de Partículas y Cosmología

La Física de Partículas empuja las fronteras del conocimiento hacia etapas más y más tempranas en la evolución del Universo



Estrecha relación entre preguntas en ambos campos

- Materia oscura  $\Leftrightarrow$  Partículas supersimétricas
- Inflación  $\Leftrightarrow$  Campos escalares similares al Higgs
- Asimetría materia-antimateria  $\Leftrightarrow$  violación CP, núm. bariónico
- ...