

El Modelo Estándar de las Interacciones Fundamentales

Antonio Pich

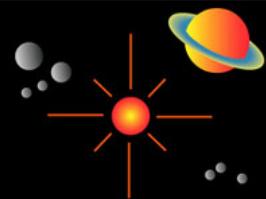
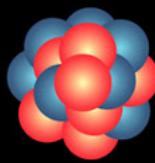
ESTRUCTURA DE LA MATERIA

Física de Partículas

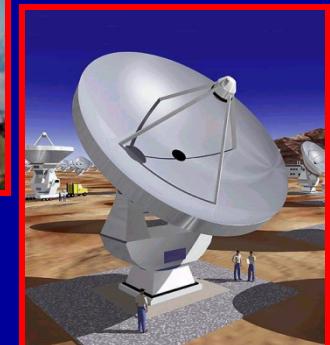
Pequeñas Distancias

Astrofísica

Grandes Distancias

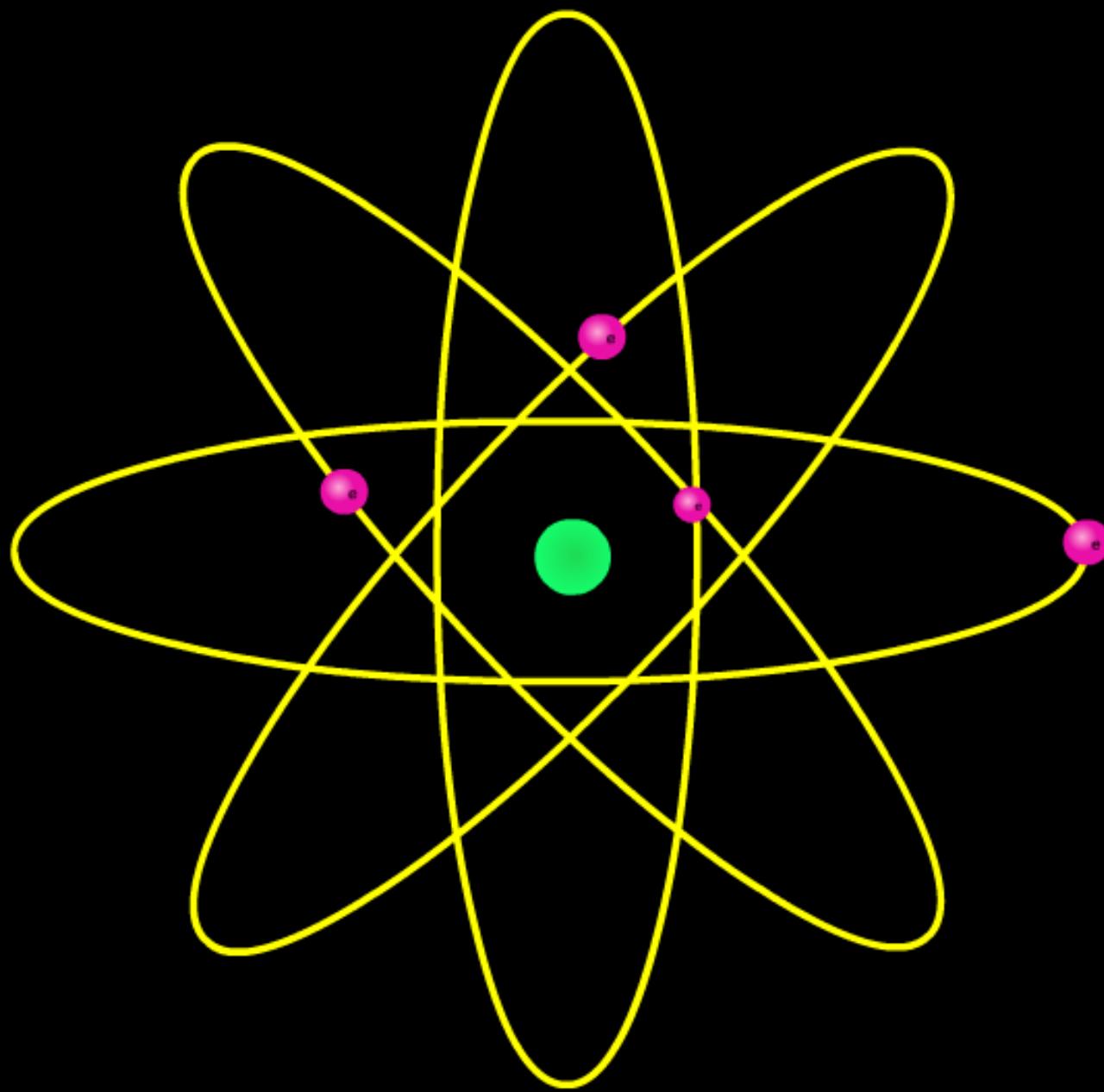


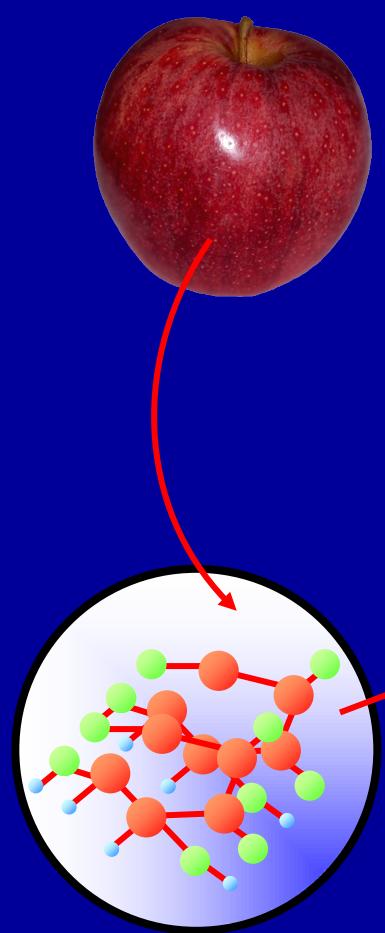
$$\lambda \sim h/p$$



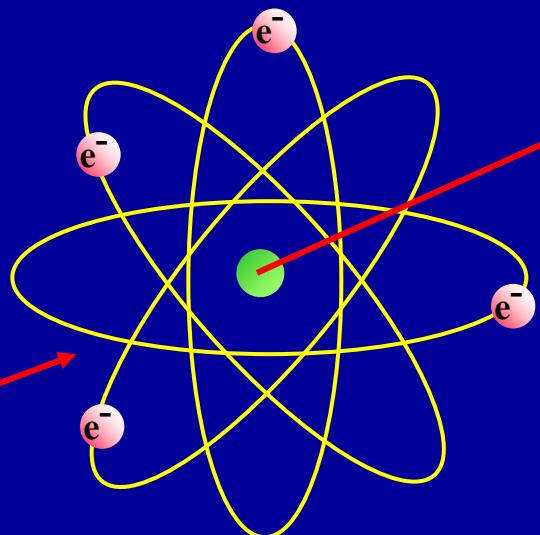
Período	Grupo																	
	1																	18
1	1 H Hidrógeno	2																2 He Helio
2	3 Li Litio	4 Be Berilio																10 Ne Neón
3	11 Na Sodio	12 Mg Magnesio	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 Al Aluminio	14 Si Silicio	15 P Fósforo	16 S Azufre	17 Cl Cloro	18 Ar Argón
4	19 K Potasio	20 Ca Calcio	21 Sc Escandio	22 Ti Titanio	23 V Vanadio	24 Cr Cromo	25 Mn Manganeso	26 Fe Hierro	27 Co Cobalto	28 Ni Níquel	29 Cu Cobre	30 Zn Cinc	31 Ga Galio	32 Ge Germanio	33 As Arsénico	34 Se Selenio	35 Br Bromo	36 Kr Criptón
5	37 Rb Rubidio	38 Sr Estroncio	39 Y Itrio	40 Zr Circonio	41 Nb Niobio	42 Mo Molibdeno	43 Tc Tecnecio	44 Ru Rutenio	45 Rh Rodio	46 Pd Paladio	47 Ag Plata	48 Cd Cadmio	49 In Indio	50 Sn Estáño	51 Sb Antimonio	52 Te Teluro	53 I Yodo	54 Xe Xenón
6	55 Cs Cesio	56 Ba Bario	57 La Lantano	72 Hf Hafnio	73 Ta Tántalo	74 W Volframio	75 Re Renio	76 Os Osmio	77 Ir Iridio	78 Pt Platino	79 Au Oro	80 Hg Mercurio	81 Tl Talio	82 Pb Plomo	83 Bi Bismuto	84 Po Polonio	85 At Astatato	86 Rn Radón
7	87 Fr Francio	88 Ra Radio	89 Ac Actinio	104 Rf Rutherfordio	105 Db Dubnio	106 Sg Seaborgio	107 Bh Bohrio	108 Hs Hassio	109 Mt Meitnerio	110 Uun Ununnilio	111 Uuu Unununio	112 Uub Ununbio		114 Uuq Ununcuadio		116 Uuh Ununhexio		118 Uuo Ununactio

Lantánidos		6	58 Ce Cerio	59 Pr Praseodimio	60 Nd Neodimio	61 Pm Promecio	62 Sm Samario	63 Eu Europio	64 Gd Gadolinio	65 Tb Terbio	66 Dy Disprosio	67 Ho Holmio	68 Er Erbio	69 Tm Tulio	70 Yb Iterbio	71 Lu Lutecio
Actínidos		7	90 Th Torio	91 Pa Protactinio	92 U Urano	93 Np Neptunio	94 Pu Plutonio	95 Am Americio	96 Cm Curio	97 Bk Berkelio	98 Cf Californio	99 Es Einstenio	100 Fm Fermio	101 Md Mendelevio	102 No Nobelio	103 Lr Laurencio

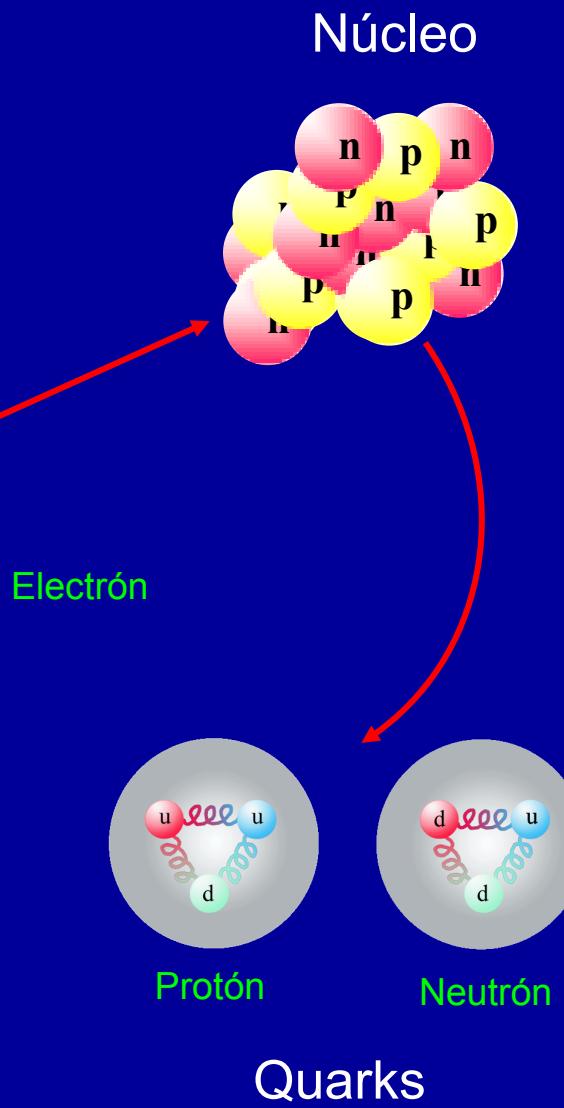




Materia



Átomo



Moléculas

Electrón

Protón

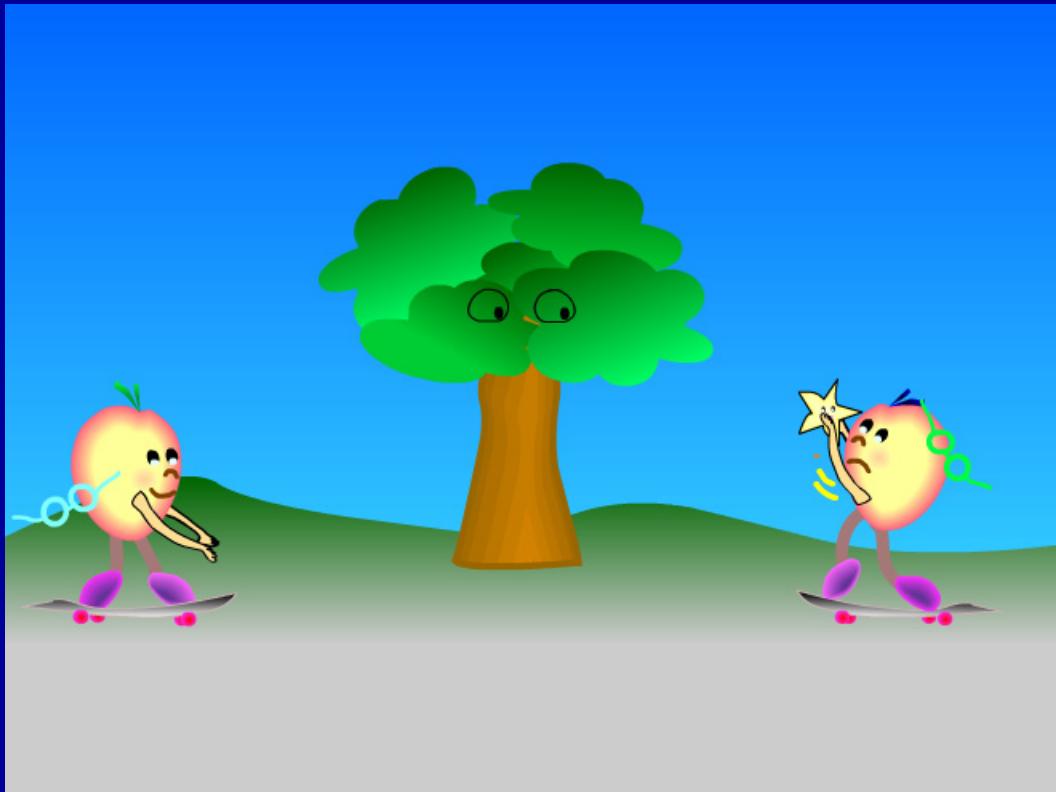
Neutrón

Quarks

Las Fuerzas de la Naturaleza

Tipo	Intensidad	Partícula Intermediaria	Sistema Físico
Fuerte	≈ 1	Gluones ($m = 0$)	Núcleo Atómico
Electromagnética	$\approx 10^{-3}$	Fotón ($m = 0$)	Átomo
Débil	$\approx 10^{-5}$	W^\pm, Z ($M \neq 0$)	Radioactividad β
Gravitación	$\approx 10^{-38}$	Gravitón ?	Cuerpos Masivos

El intercambio
de partículas
genera la
interacción



RADIOACTIVIDAD

(Desintegración β)



$$Q_{\nu_e} = Q_{\bar{\nu}_e} = 0$$

$$m_{\nu_e} = m_{\bar{\nu}_e} \approx 0$$

$\nu_e \equiv$ Neutrino ; $\bar{\nu}_e \equiv$ Anti-Neutrino

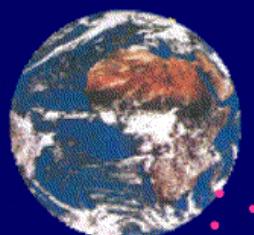


Interacción Débil

$$W^\pm, Z^0$$

$$M_W \sim M_Z \approx 100 m_p$$

ν_e



NEUTRINOS



- Interaccionan muy débilmente
- Muy abundantes en el Universo
- Cada segundo atraviesan tu cuerpo

$\sim 10^{14} \nu_e$ provenientes del Sol



$$p\ p \rightarrow d\ e^+ \nu_e , \dots$$

NEUTRINOS

Cada segundo atraviesan tu cuerpo

$\sim 10^{14} \nu_e$ provenientes del Sol

$p p \rightarrow d e^+ \nu_e , \dots$

También llegan por debajo!



ν_e



Materia (Fermiones , $J = \frac{1}{2}$)

Fuerzas

Quarks

$Q = 2/3$



arriba (u)

$Q = -1/3$



abajo (d)

Leptones

$Q = 0$



neutrino e (ν_e)

$Q = -1$



electrón (e)

Bosones

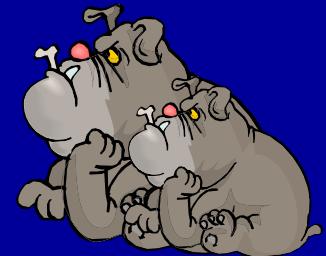
$J = 1$



fotón



gluones



Z^0 W^\pm

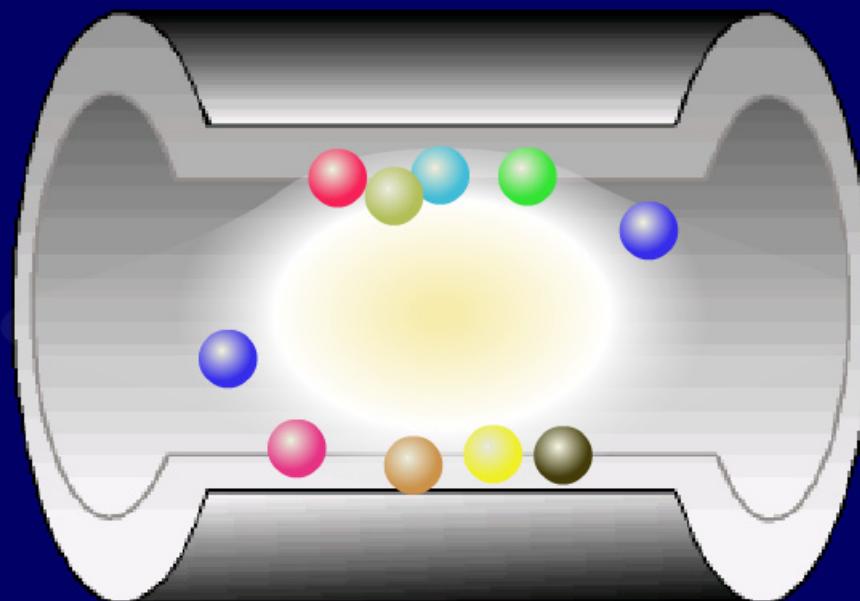
Mecánica Cuántica + Relatividad



Anti-partículas

(Dirac)

ANTIMATERIA

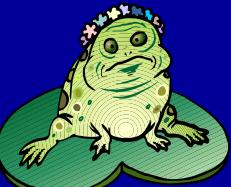
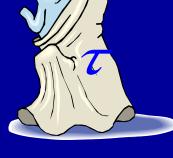


u	d	ν_e	e^-
\bar{u}	\bar{d}	$\bar{\nu}_e$	e^+

$$E = m c^2$$

Materia (Fermiones , $J = \frac{1}{2}$)

Fuerzas

Quarks		Leptones		Bosones
$Q = 2/3$	$Q = -1/3$	$Q = 0$	$Q = -1$	
0.003 	0.005 	< 0.000002 	0.0005 	0  J = 1 fotón
1.3 	0.1 	< 0.000002 	0.105 	0  gluones
173 	4.2 	< 0.000002 	1.777 	91  80 Z^0 W^\pm
verdad (t) 	belleza (b) 	neutrino τ (ν_τ) 	tau (τ) 	125  J = 0 Higgs neutrino

TEORÍA ESTÁNDAR

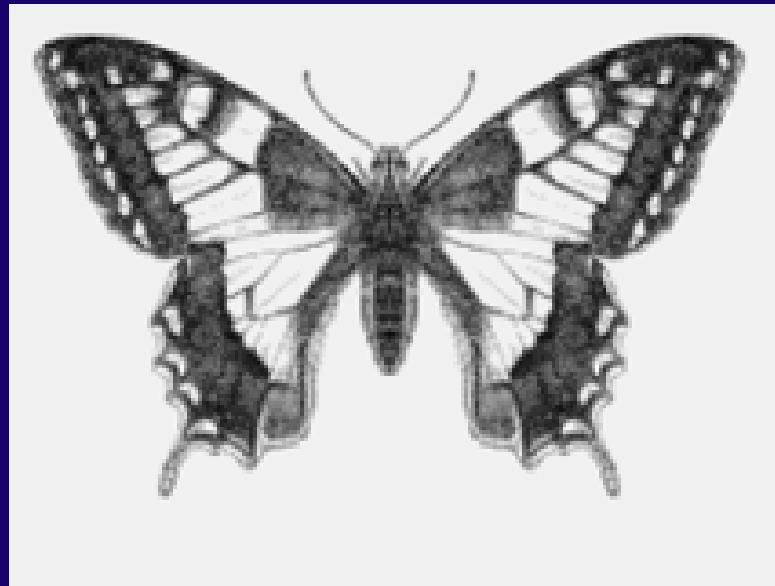
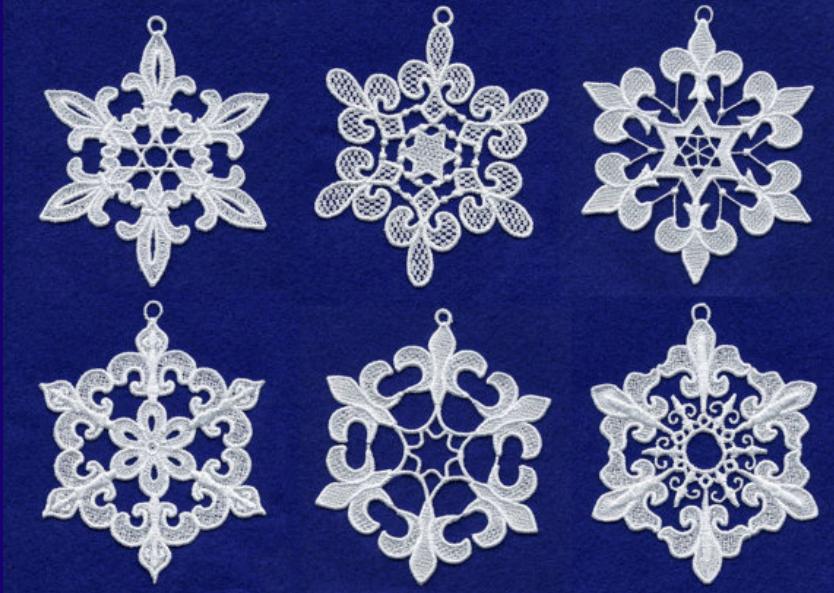
Mecánica Cuántica (\hbar) + Relatividad Especial (c)



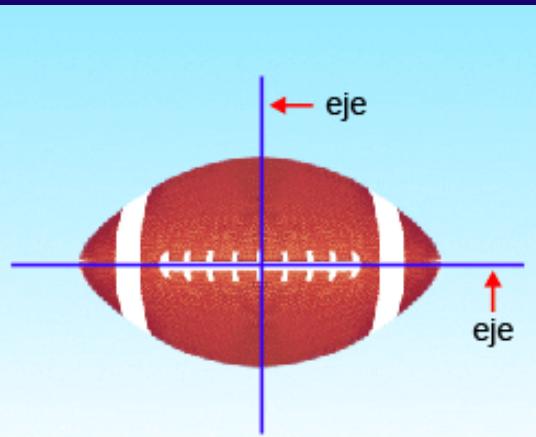
Teoría Cuántica de Campos



- Electrodinámica Cuántica (QED)
Electricidad + Magnetismo + Luz: γ
- Cromodinámica Cuántica (QCD)
Interacción Fuerte: 8 Gluones
- Teoría Electrodébil $SU(2)_L \otimes U(1)_Y$
QED + Interacción Débil: γ, Z, W^\pm



SIMETRÍAS





TEORÍAS GAUGE

Las simetrías determinan las interacciones

(localmente en cada punto del espacio-tiempo)

- **Electrodinámica:** 1 parámetro α (= Intensidad Interacción)

Simetría de fase \rightarrow QED \rightarrow Ec. Maxwell

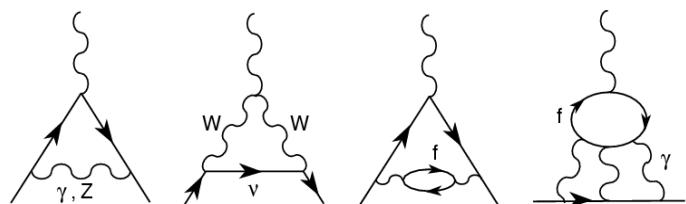
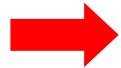


Momento Magnético Anómalo

$$\mu_l \equiv g_l \frac{e}{2m_l}$$

$$a_l \equiv \frac{1}{2} (g_l - 2)$$

$$\alpha_{\text{Rb2010}}^{-1} = 137.035\ 999\ 049\ (90)$$



$$a_e^{\text{th}} = 0.001\ 159\ 652\ 181\ 78\ (77)$$
$$a_e^{\text{exp}} = 0.001\ 159\ 652\ 180\ 73\ (28)$$

- **Teoría Electrodébil:** 2 parámetros α, θ_W
- **Cromodinámica Cuántica:** 1 parámetro α_s

PROBLEMA CON LAS MASAS

La misma simetría que determina las interacciones predice que todas las partículas elementales tienen masa nula



$$m_\gamma = m_G = 0$$

$$M_W = 80.40 \text{ GeV}$$

$$M_Z = 91.19 \text{ GeV}$$

$$m_t = 173 \text{ GeV}$$

?

La masa distingue las 3 familias de quarks y leptones

PROBLEMA CON LAS MASAS

- Si $M_W = M_Z = 0$ la fuerza débil no estaría suprimida.

Cambiaría el funcionamiento de las estrellas (Sol).

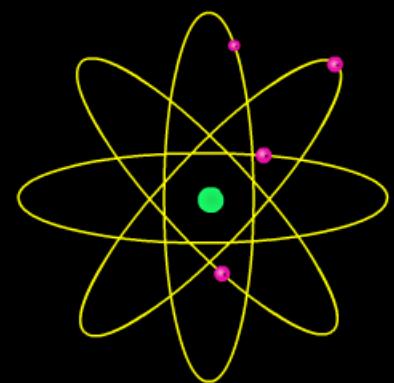
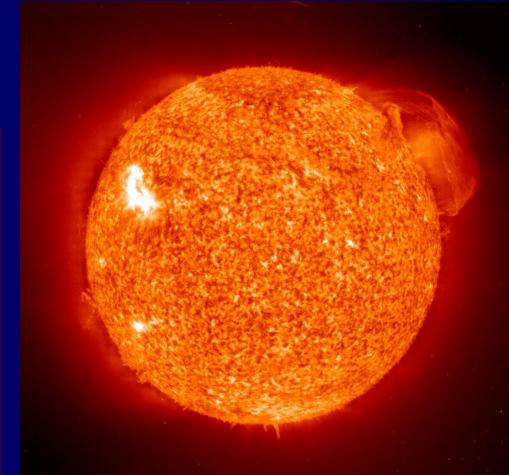
El Universo sería distinto

- Un electrón sin masa viajaría a la velocidad de la luz.

No existiría el átomo

- Si $m_u > m_d$ el protón se desintegraría.

El núcleo atómico no sería estable





nehr

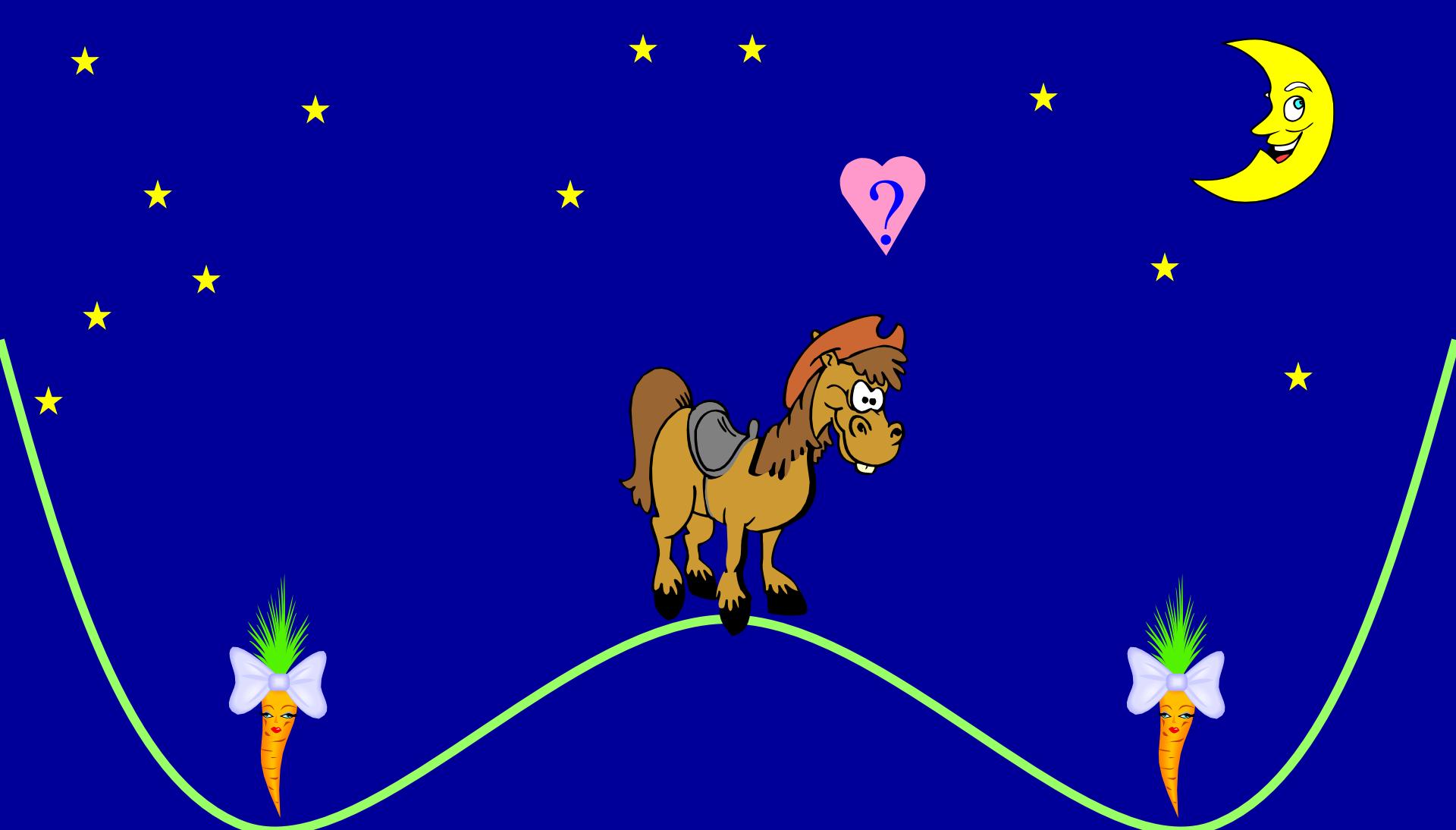
Rotura espontánea de simetría

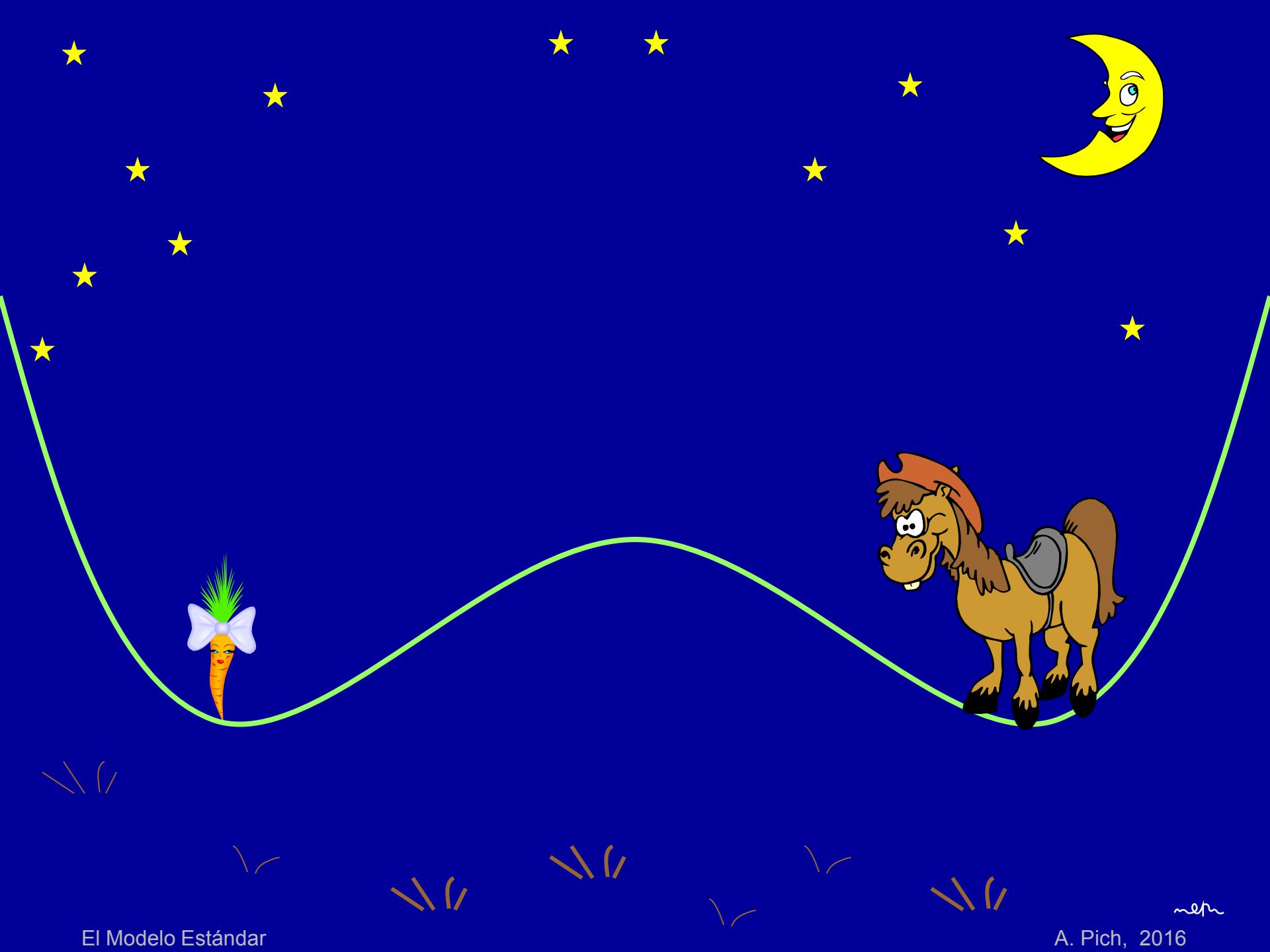


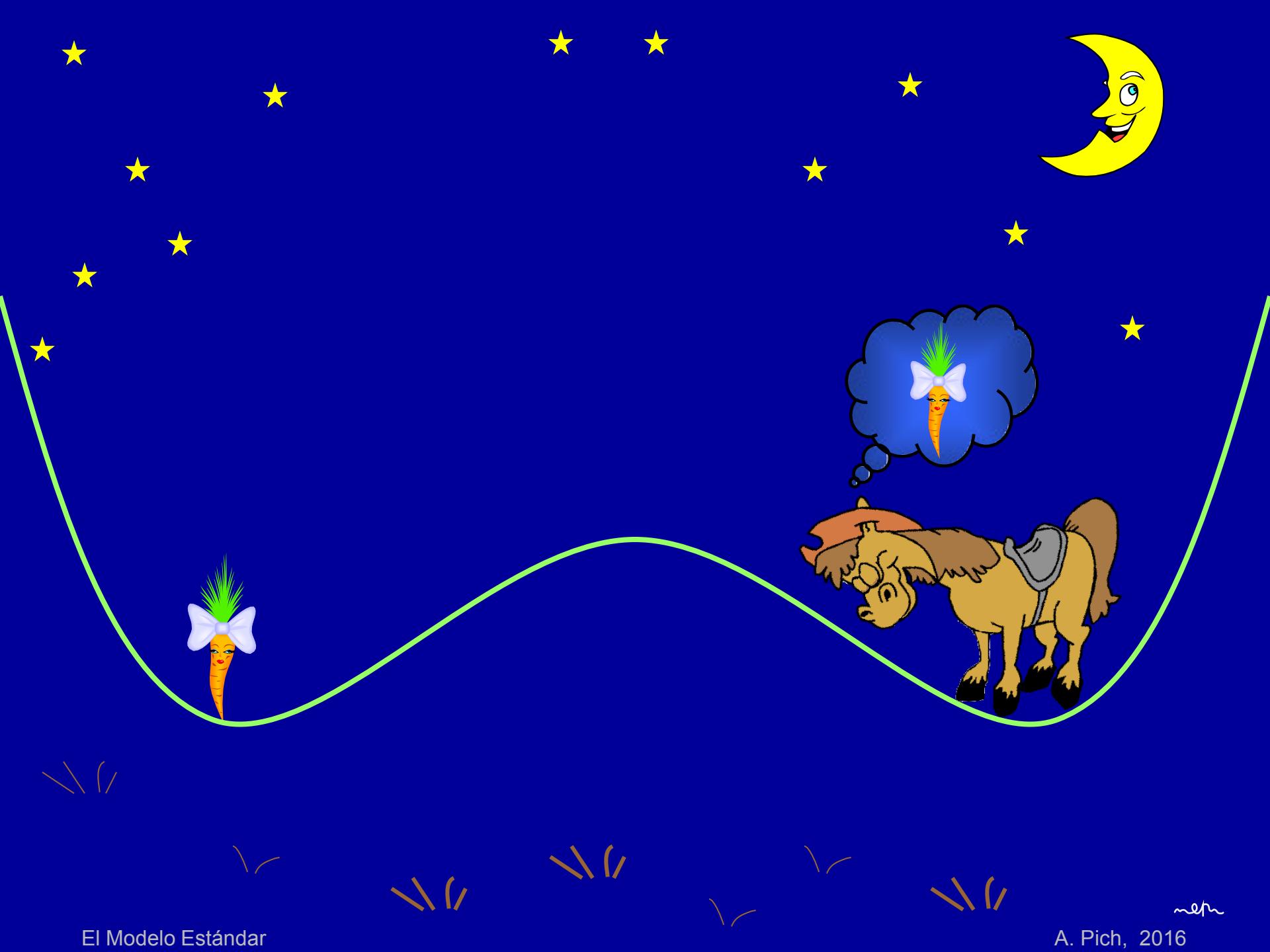
neph

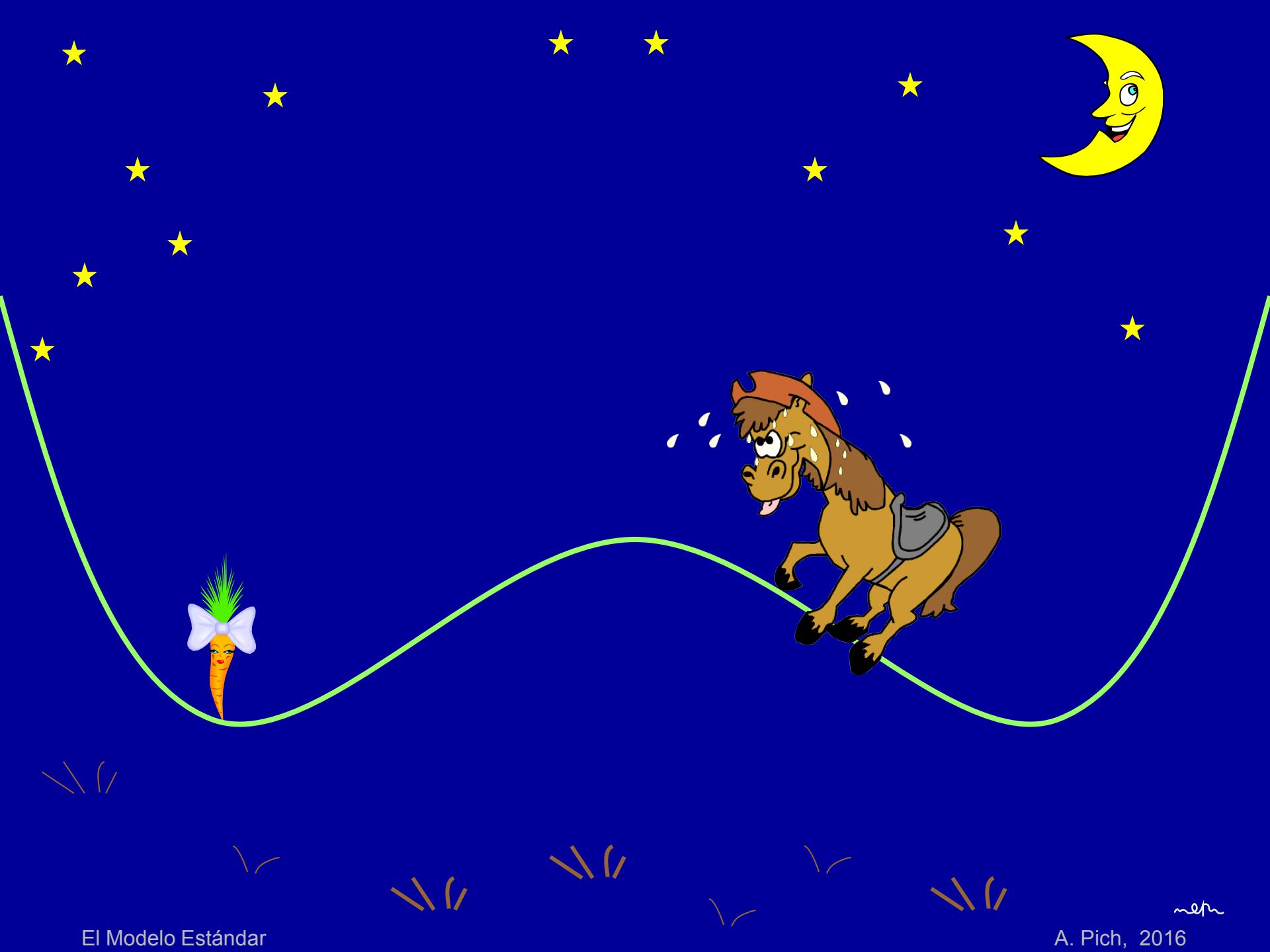
Rotura espontánea de simetría

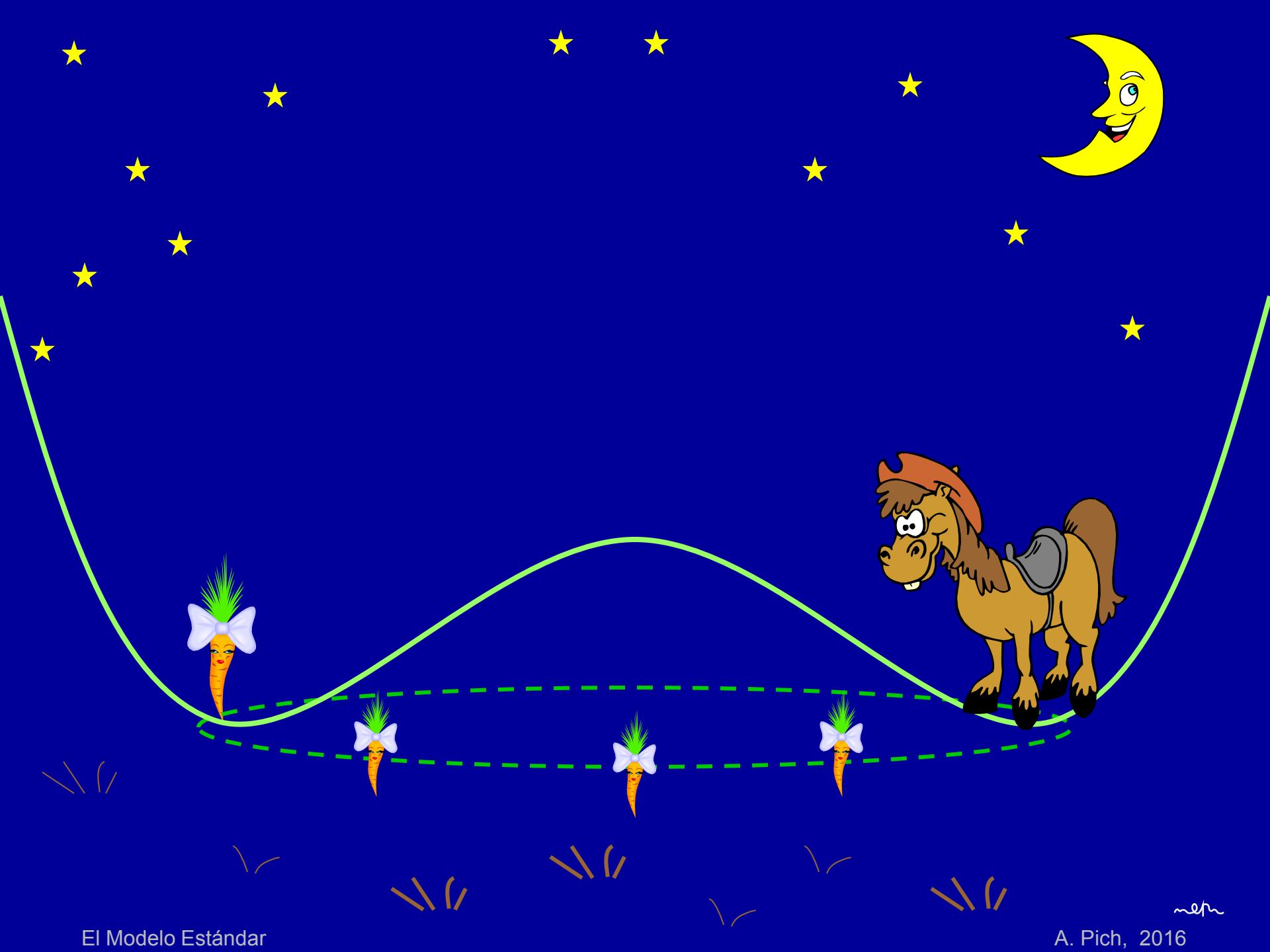




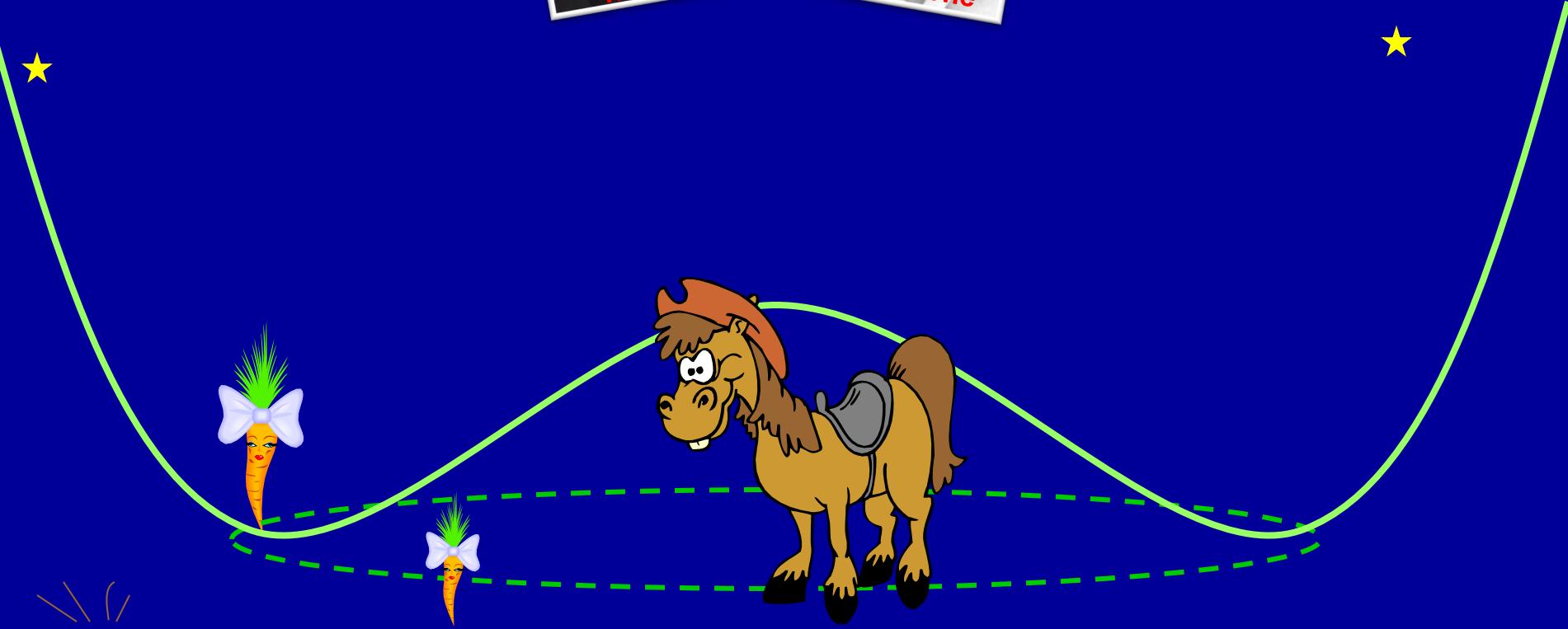




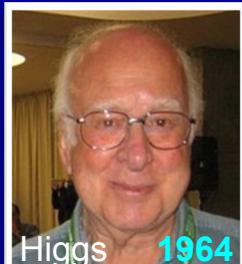




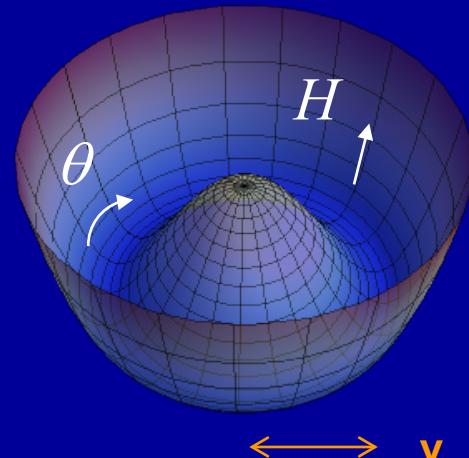
P. Nobel 2008



Mecanismo de Higgs



P. Nobel 2013



- Campo de fuerzas escalar (sin espín) acoplado con el campo gauge
- $\theta(x)$ + Campo Gauge = Campo Gauge con Masa
- $H(x)$ = Campo de Higgs

Teoría Estándar $SU(2)_L \otimes U(1)_Y$:

$$M_Z \cos \theta_W = M_W = \frac{1}{2} v g$$

$$v = 246 \text{ GeV}$$

El Modelo Estándar



S.L. Glashow

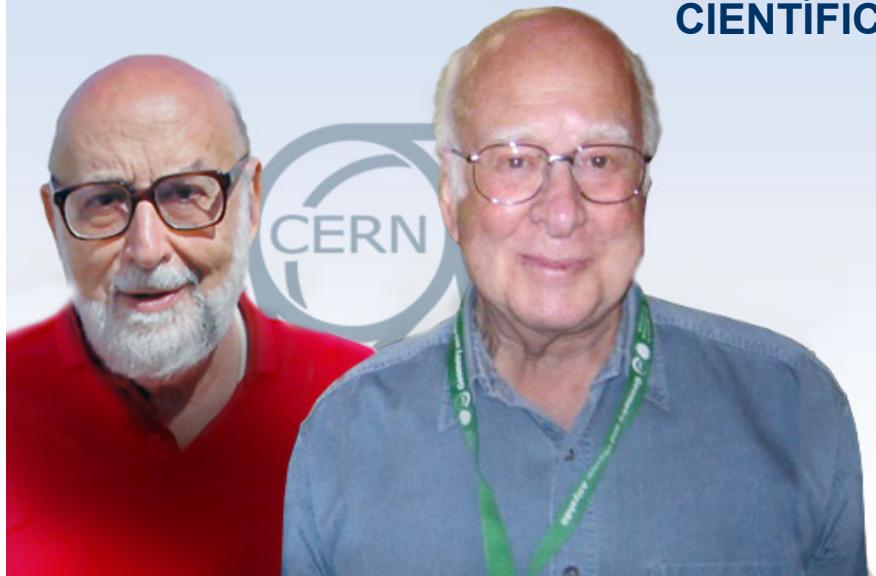
S. Weinberg

P. Nobel 1979

Descubrimiento del Boson de Higgs



PREMIO PRÍNCIPE DE ASTURIAS DE INVESTIGACIÓN
CIENTÍFICA Y TÉCNICA 2013



Fundación
Príncipe de Asturias

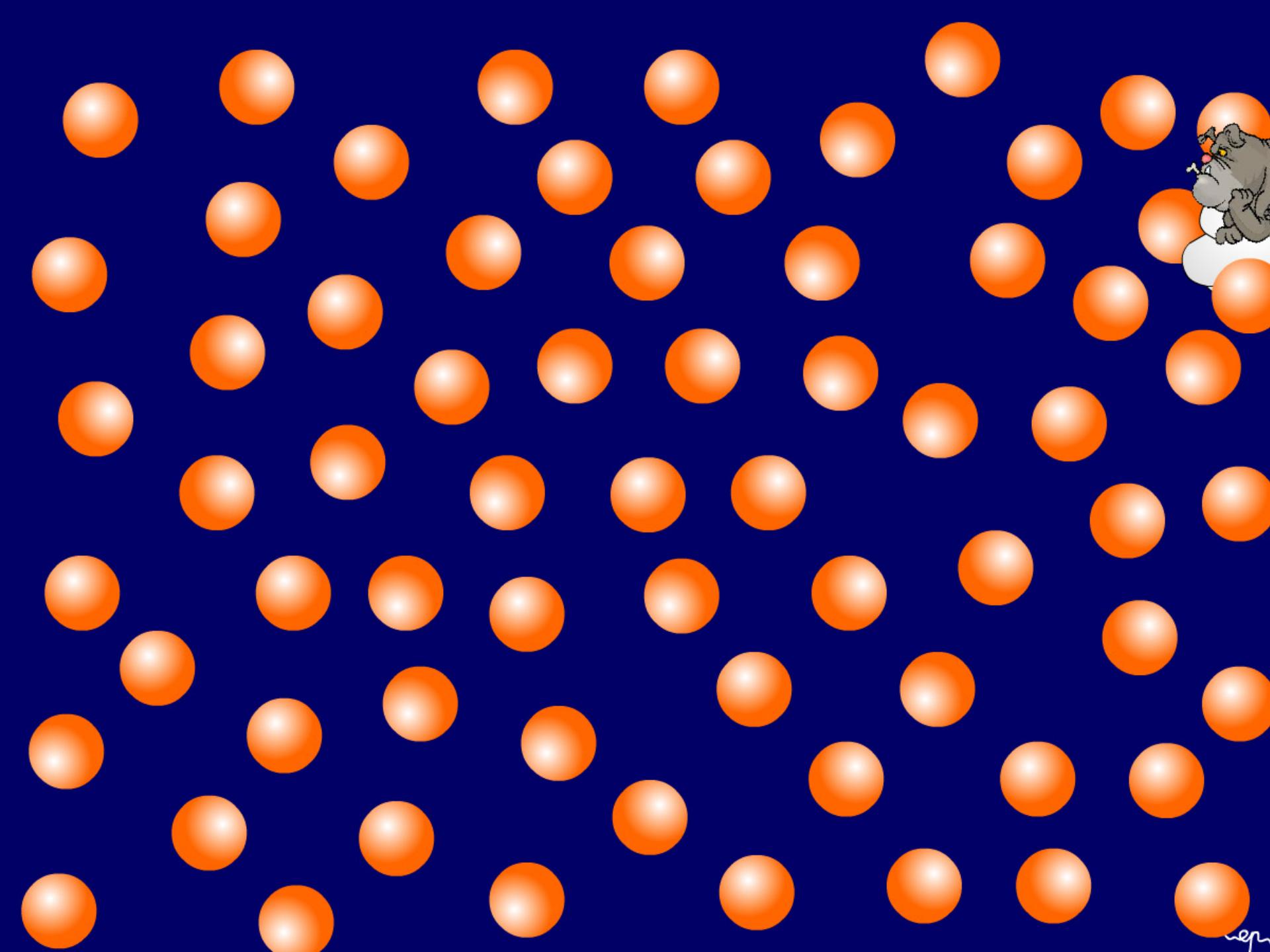


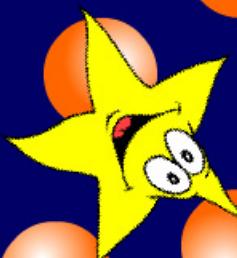
"El descubrimiento del bosón de Higgs constituye un ejemplo emblemático de cómo Europa ha liderado un esfuerzo colectivo para resolver uno de los enigmas más profundos de la Física"



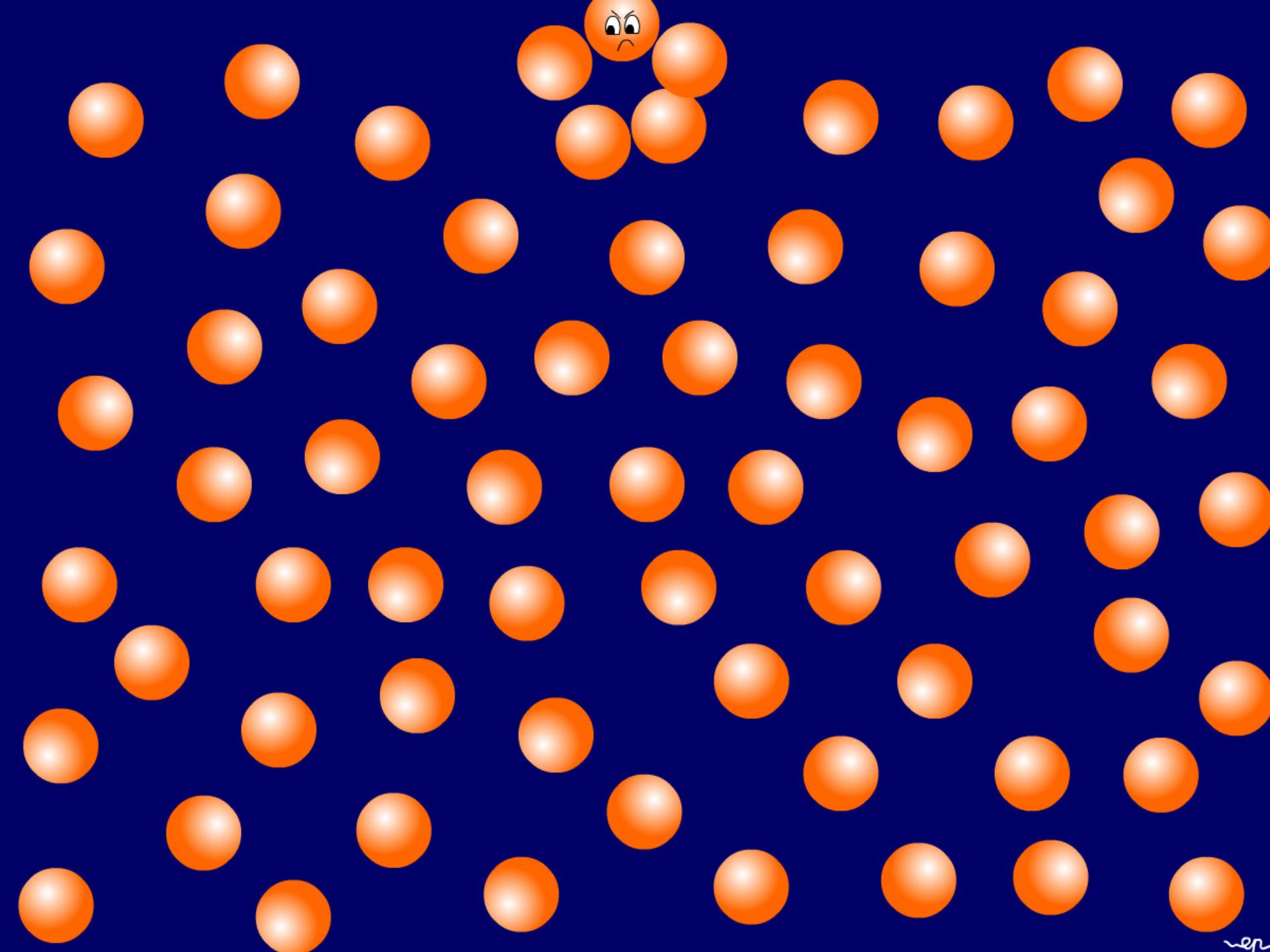
The Nobel Prize in Physics 2013: François Englert, Peter Higgs

"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"





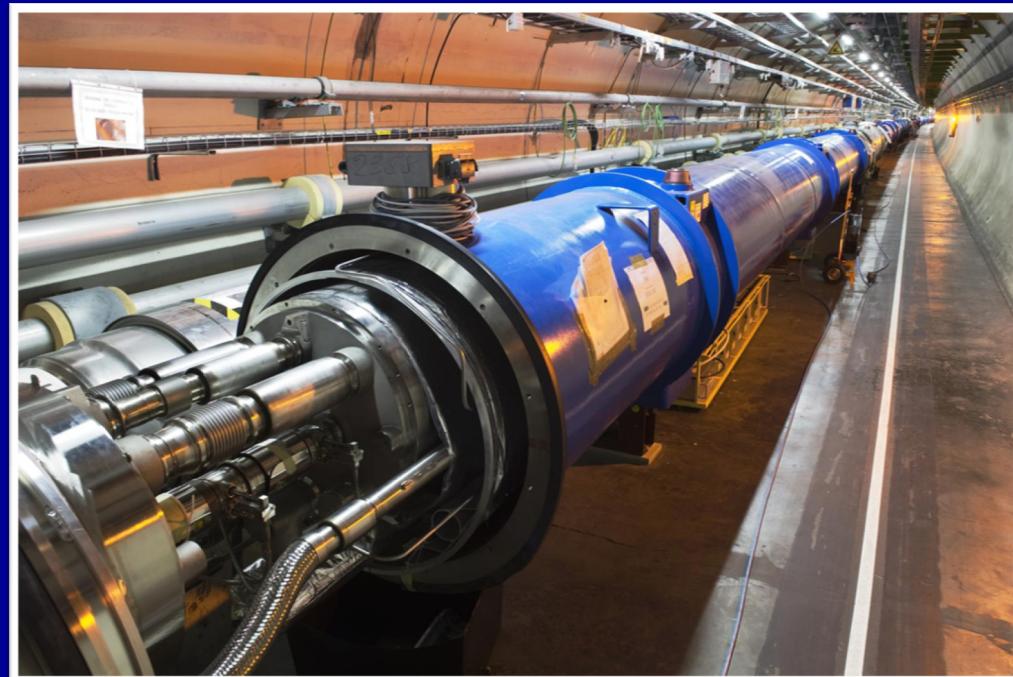
ven



ver

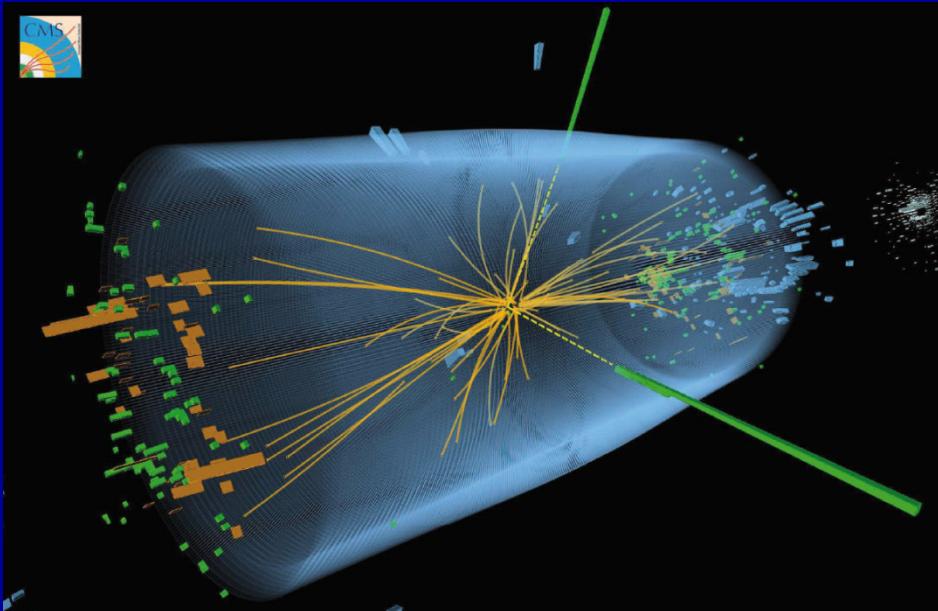
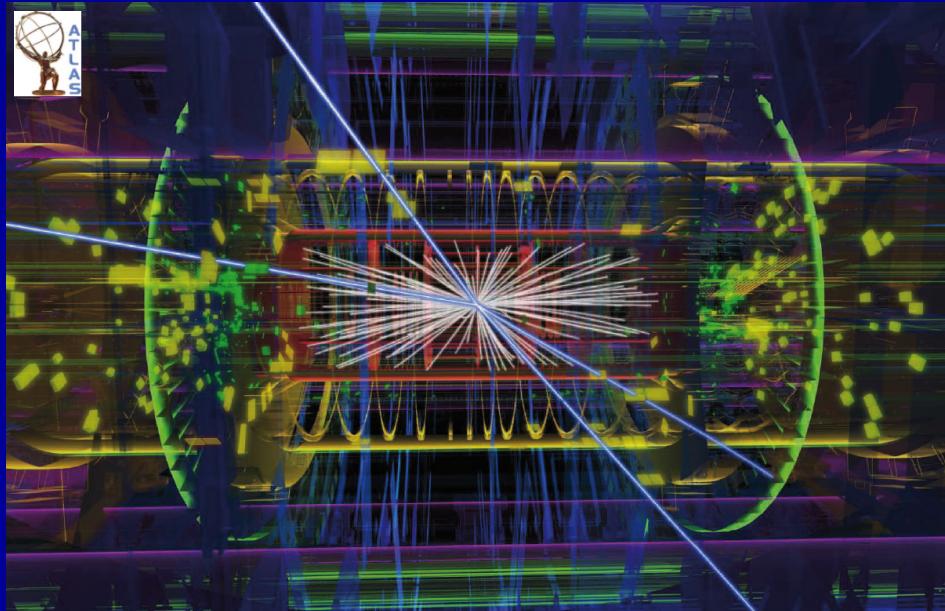
La Busqueda del Bosón de Higgs

Gran Proyecto Internacional
20 años (diseño y construcción)

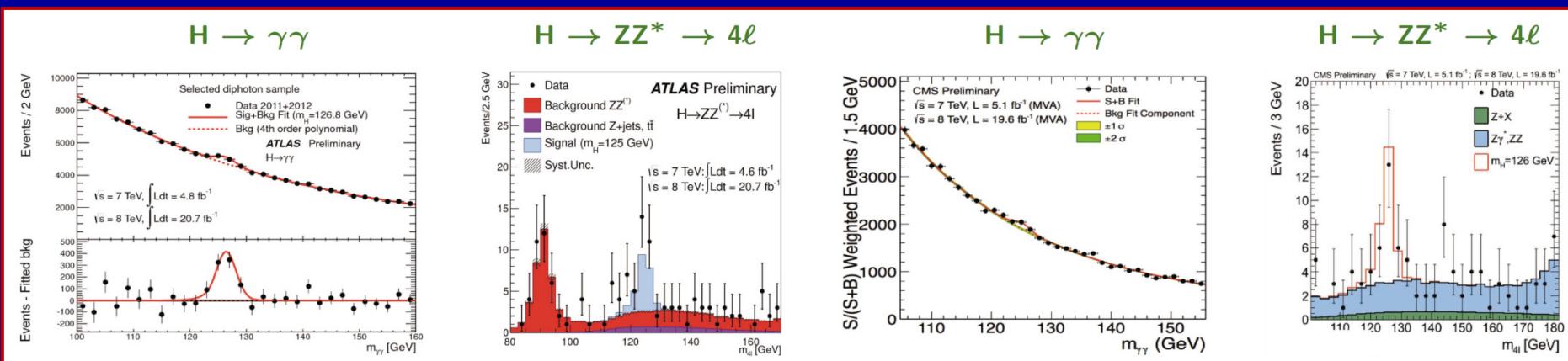


- 40.000 Tm a **-271 °C** (1,9 K) enfriadas con helio líquido
- Energía del haz \approx **60 Kg de TNT**
Un AVE a 200 Km/h
- Dos haces de protones (\varnothing 3 mm) acelerados a **6'5+6'5 TeV**
- Ultravacío: **10^{-16} atmósferas**

UN NUEVO CAMPO DE FUERZAS



Un bosón con $M = 125 \text{ GeV}$ and $J = 0$



CAMPO DE FUERZAS SIN ESPÍN

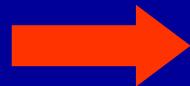
$$J = 0$$

El campo de Higgs no es polarizable

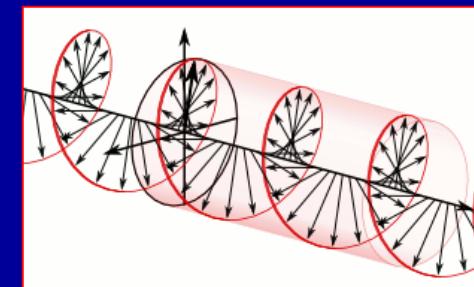
Números cuánticos del vacío



Los campos gauge tienen espín $J = 1$
(fuerzas electromagnética, débil y fuerte)

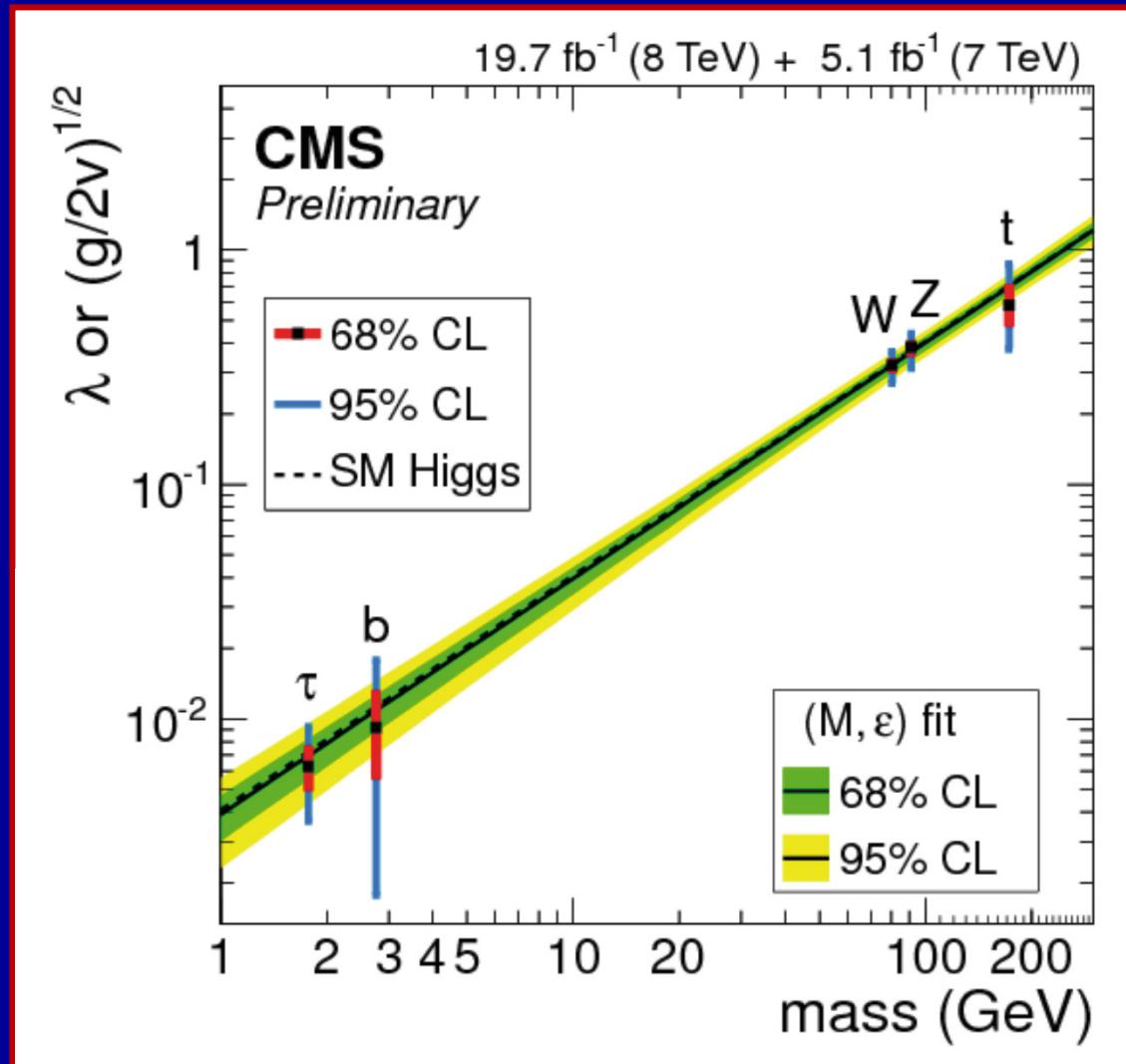
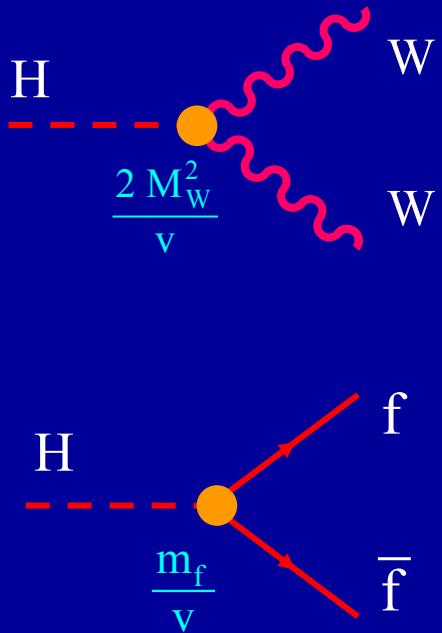


tienen polarización

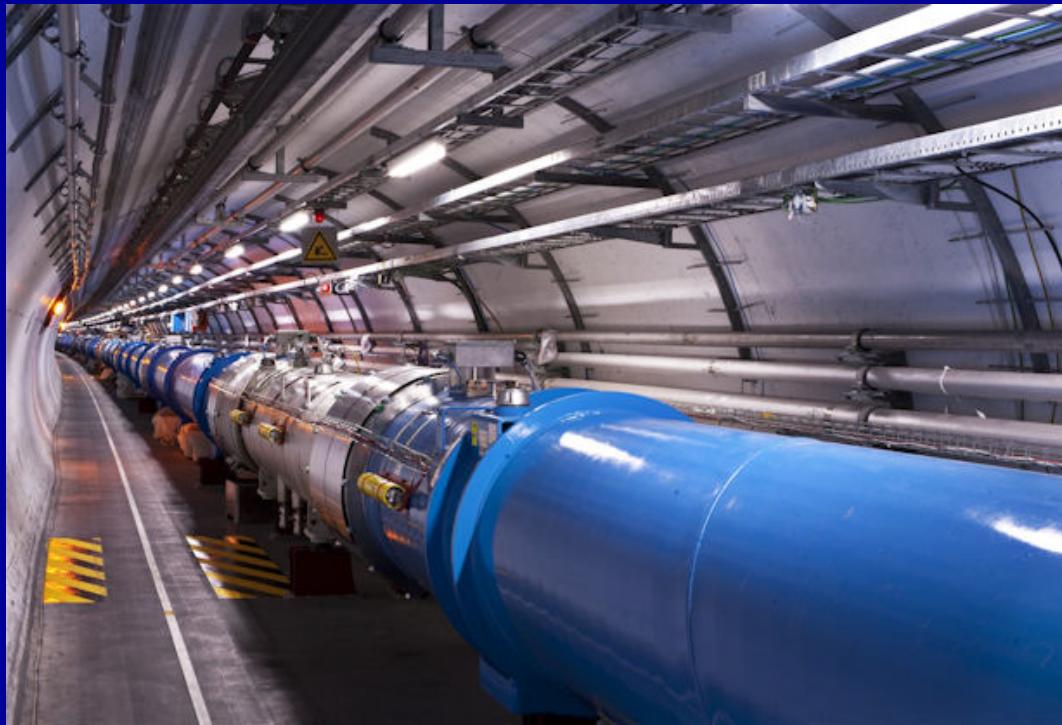


Es un campo de Higgs

Interacción
proporcional
a la masa

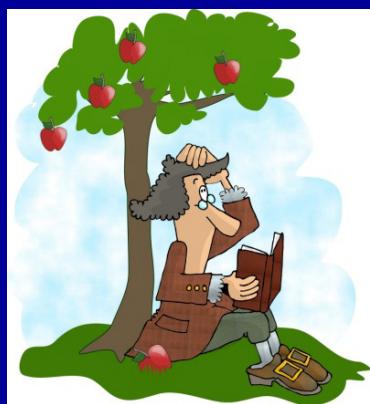


Y DESPUES DEL HIGGS ...



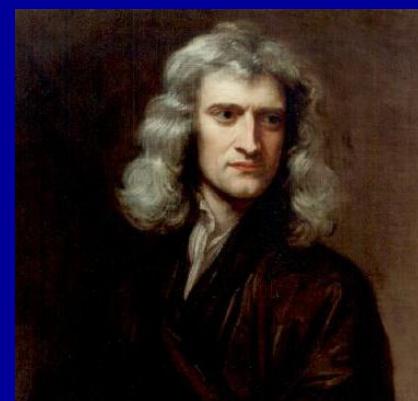
**El LHC está ahora funcionando con
más energía (6'5 + 6'5 TeV) e intensidad**

Campo Gravitatorio



Siglo XVII

Isaac Newton



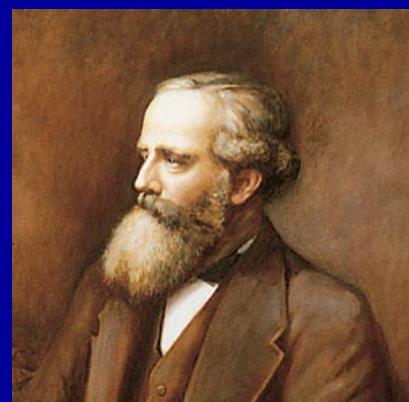
Michael Faraday

Electromagnetismo

Siglo XIX

“But, after all, what use is it?”

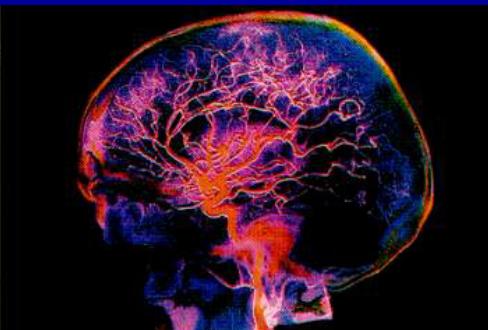
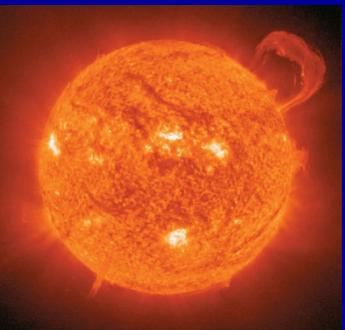
“Why, sir. There is every probability
that you will soon be able to tax it!”



James Clerk Maxwell

Siglo XX

Interacciones Fuerte y Débil



El Modelo Estándar

¿Existe un único campo escalar?

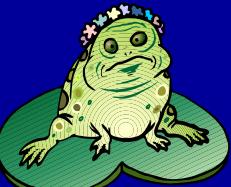
- El Higgs es la única partícula elemental sin espín
- ¿Es el primer miembro de una nueva clase de partículas?
- ¿Tiene las propiedades predichas en el Modelo Estándar?

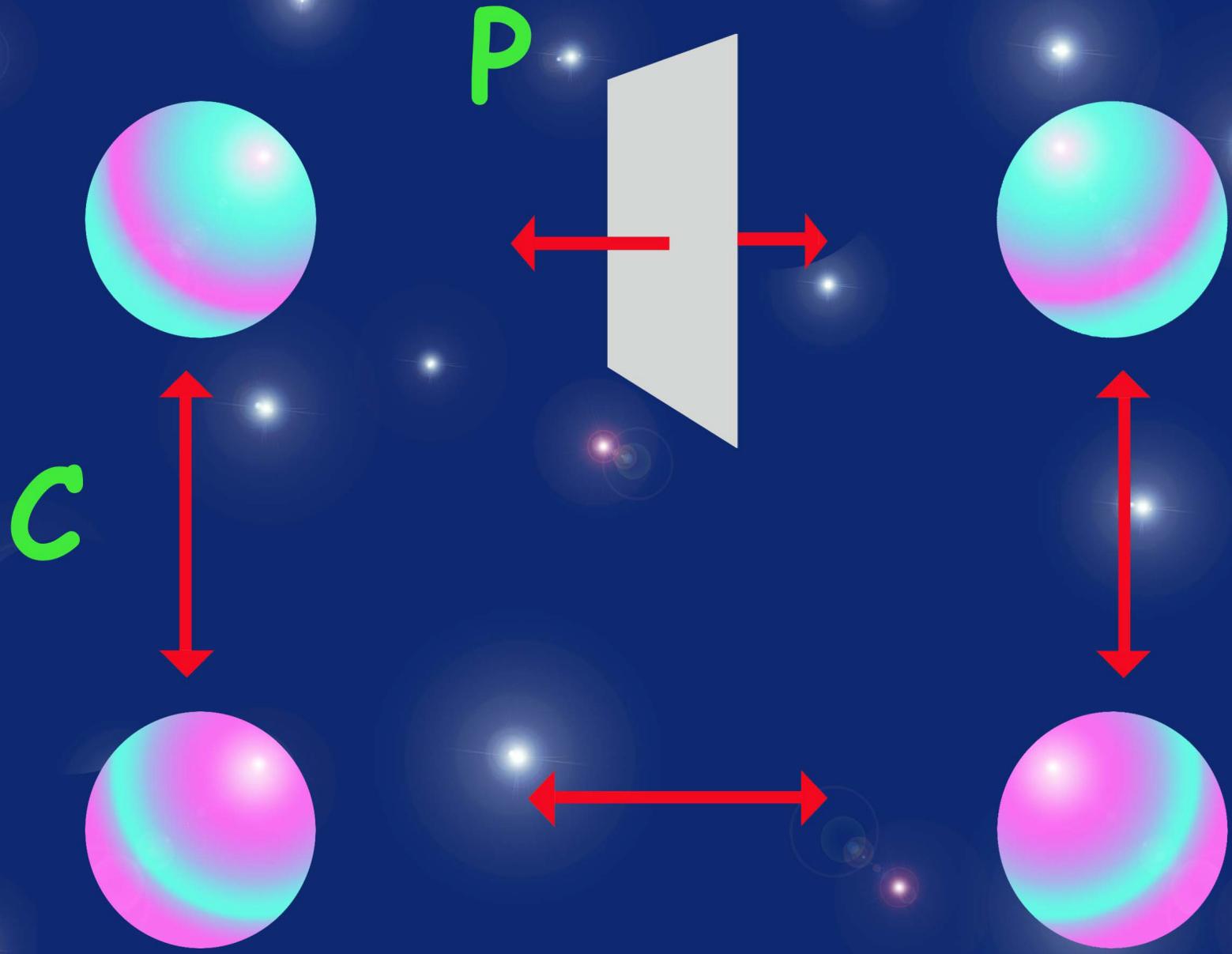
¿Nueva Física?  Campos Adicionales

- Modelos con varios campos de Higgs
- Supersimetría: todas las partículas tienen parejas supersimétricas con distinto espín, que no deberían ser mucho más pesadas
- Subestructura: el Higgs está compuesto por constituyentes todavía no descubiertos → Nuevas formas de materia
- Materia oscura

Materia (Fermiones , $J = \frac{1}{2}$)

Fuerzas

Quarks		Leptones		Bosones
$Q = 2/3$	$Q = -1/3$	$Q = 0$	$Q = -1$	
0.003  arriba (u)	0.005  abajo (d)	< 0.000002  neutrino e (ν_e)	0.0005  electrón (e)	0  J = 1 fotón
1.3  encanto (c)	0.1  extraño (s)	< 0.000002  neutrino μ (ν_μ)	0.105  muón (μ)	0  gluones
173  verdad (t)	4.2  belleza (b)	< 0.000002  neutrino τ (ν_τ)	1.777  tau (τ)	91  80 Z^0 W^\pm
				125  J = 0 Higgs neutrino

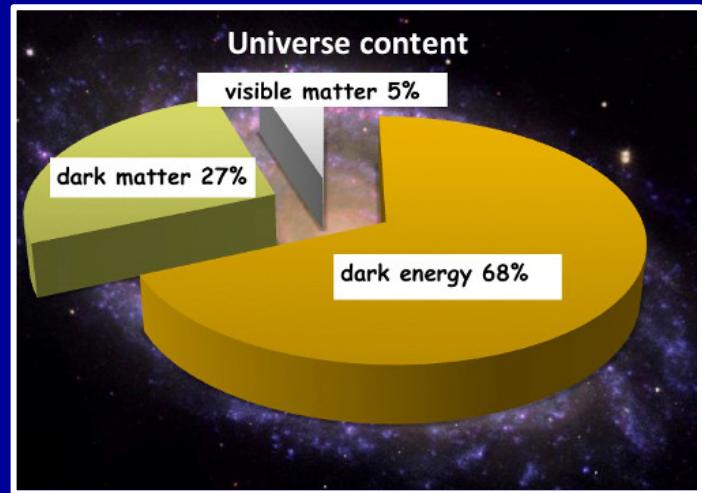


nehr



mehr

MATERIA OSCURA



Sólo conocemos
el 5% del Universo

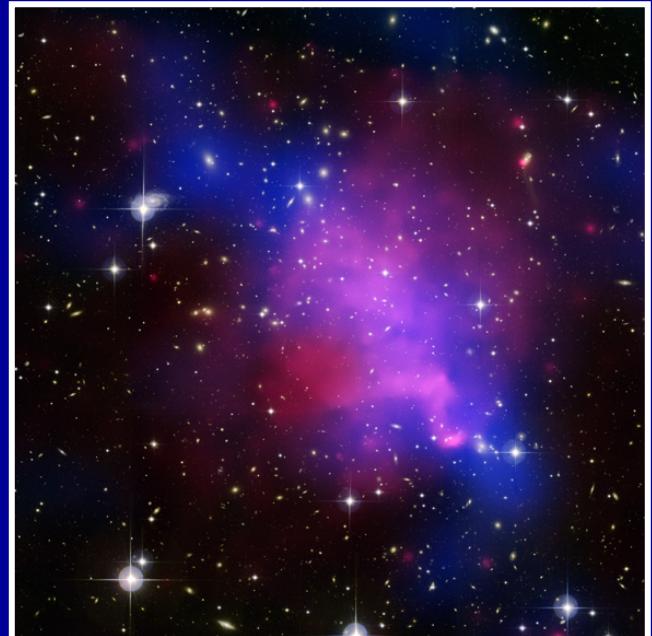
- Existe materia oscura

¿La podemos producir en el LHC?

- No emite luz, ¡pero tiene masa!

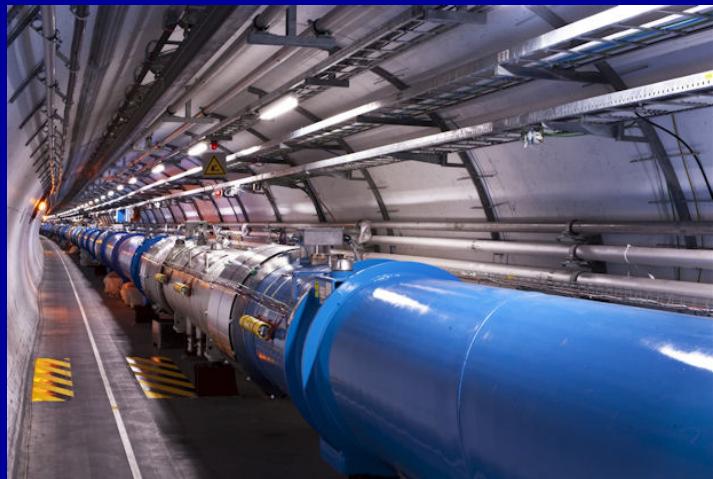
¿Interacciona con el Higgs?

El campo de Higgs podría ser
una puerta al mundo oscuro



Y después del Higgs...

Un nuevo campo de fuerzas
Muchas preguntas que responder



LHC: Maravilla Tecnológica

Inicia una etapa apasionante
de exploración científica

**¿Qué hay más allá de las
fronteras del conocimiento?**

**El bosón de Higgs podría
esconder nuevos fenómenos
de naturaleza insospechada.**



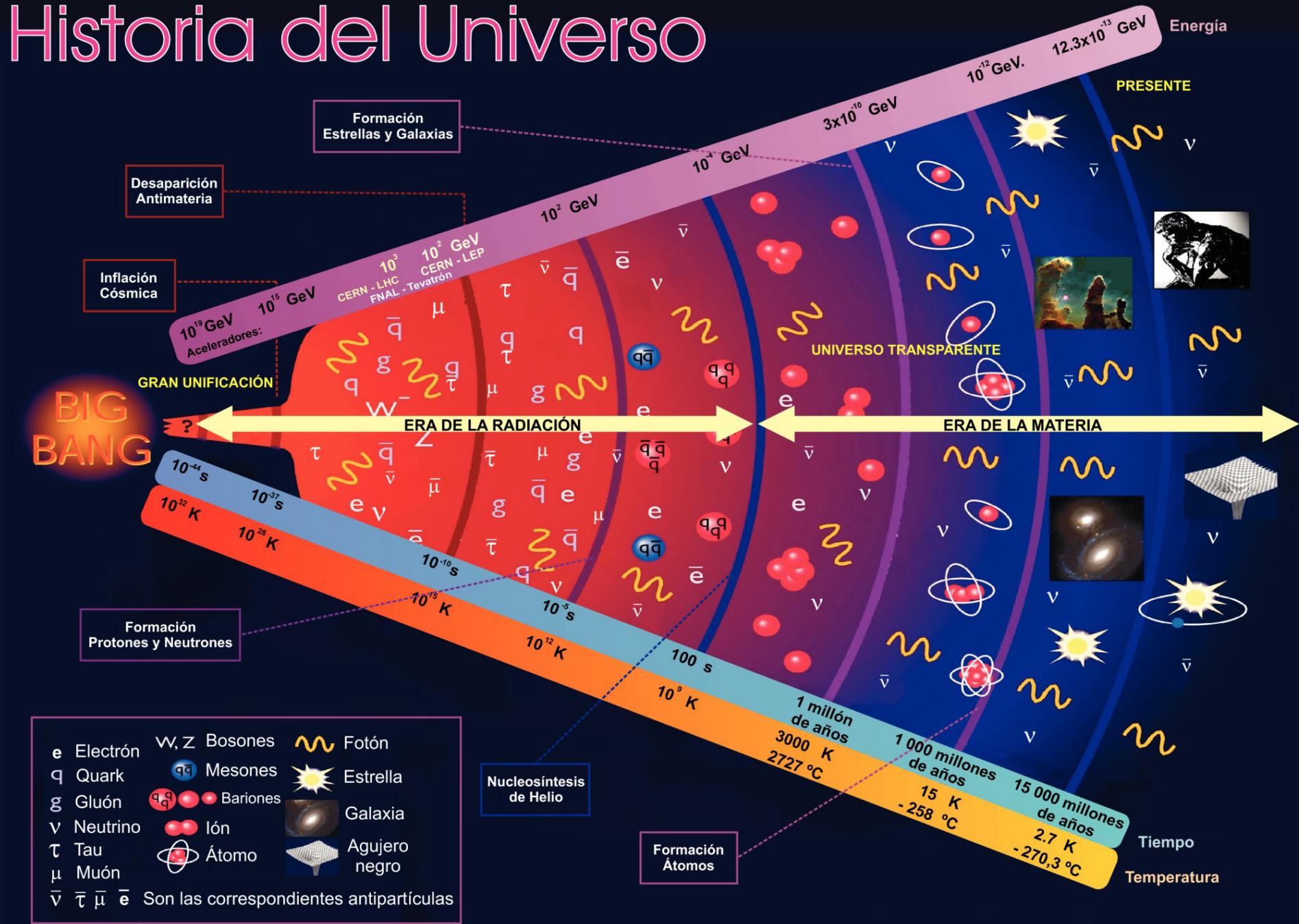


neph

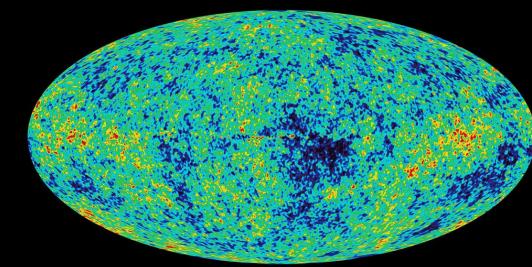
Datos Curiosos del LHC

- El mayor refrigerador del mundo (-273 °C = 1,9 K)
Más frio que el espacio exterior extra-galáctico (2,7 K)
- El mayor espacio vacío del Universo (10^{-16} atm)
Presión 10 veces más pequeña que en la Luna
- Cable de imanes = 6.300 filamentos de Nb-Ti (\varnothing 0,006 mm)
10 veces más delgado que el cabello humano
Longitud total mayor que 10 veces la distancia Tierra-Sol
- Los protones viajan casi a la velocidad de la luz (0.999999991 c)
11.000 vueltas al LHC por segundo
- Energía del haz equivalente a un AVE a 200 Km/h
- Imán superconductor de CMS = 10.000 Tm de hierro
Más hierro que la Torre Eiffel
- Datos recogidos por experimento = 100.000 DVDs por año

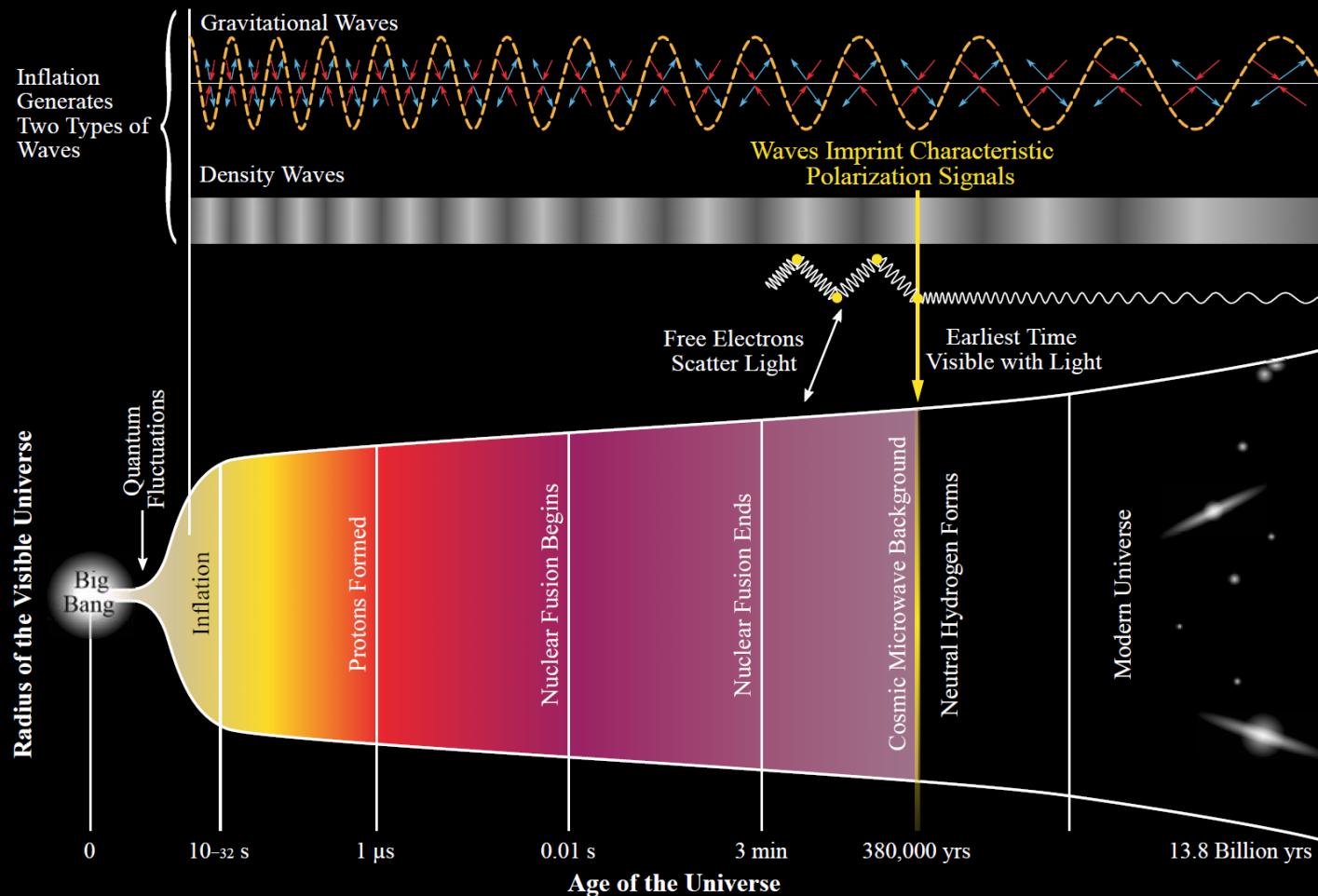
Historia del Universo



- Evidencia de polarización “B” en el fondo cósmico de microondas (BICEP2, 2014)



- ¿Polvo galáctico polarizado? (PLANCK, 2015)



Inflación Cómica



¿Inflatón?

(otro campo sin espín!)

PLASMA DE QUARKS Y GLUONES

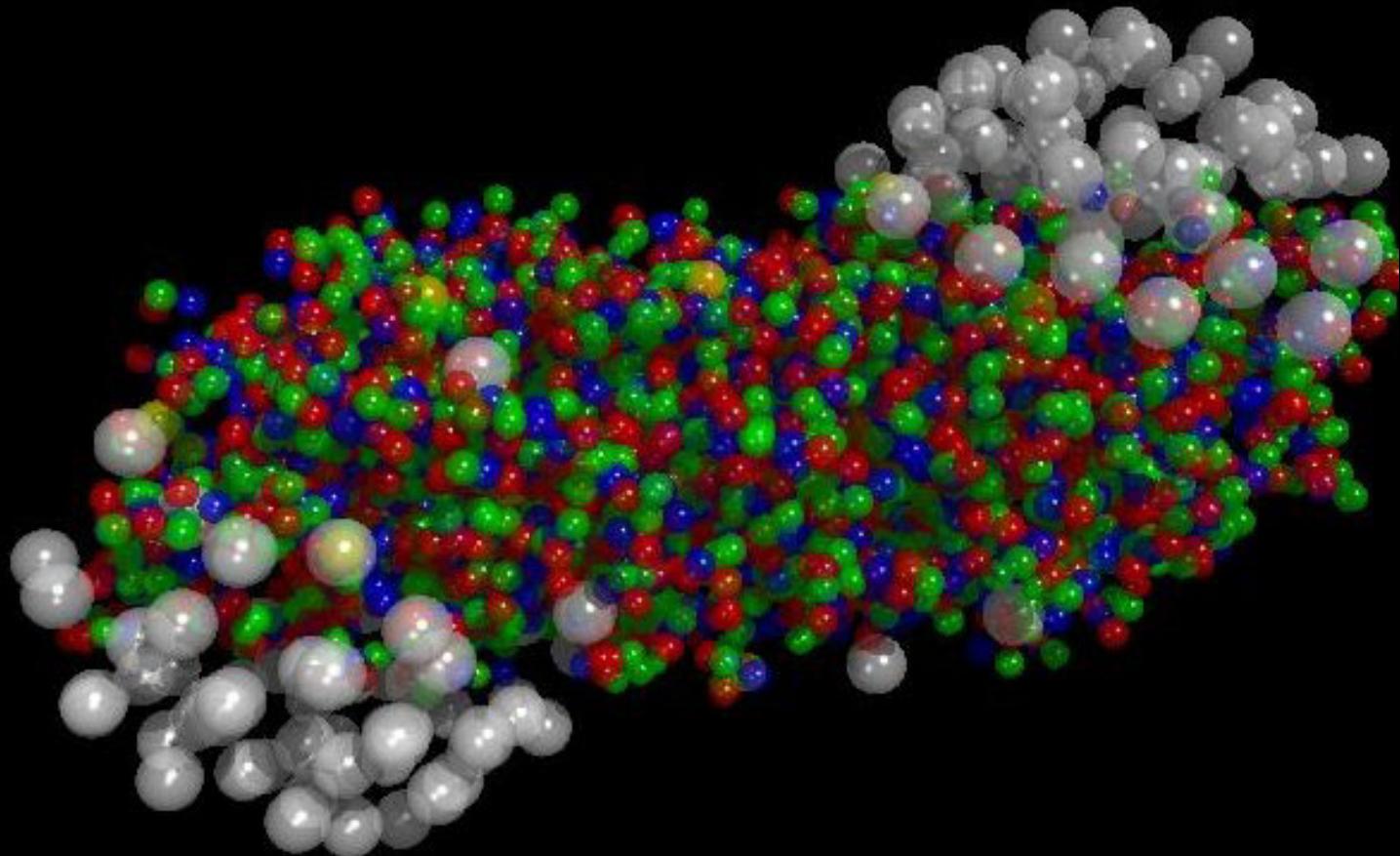
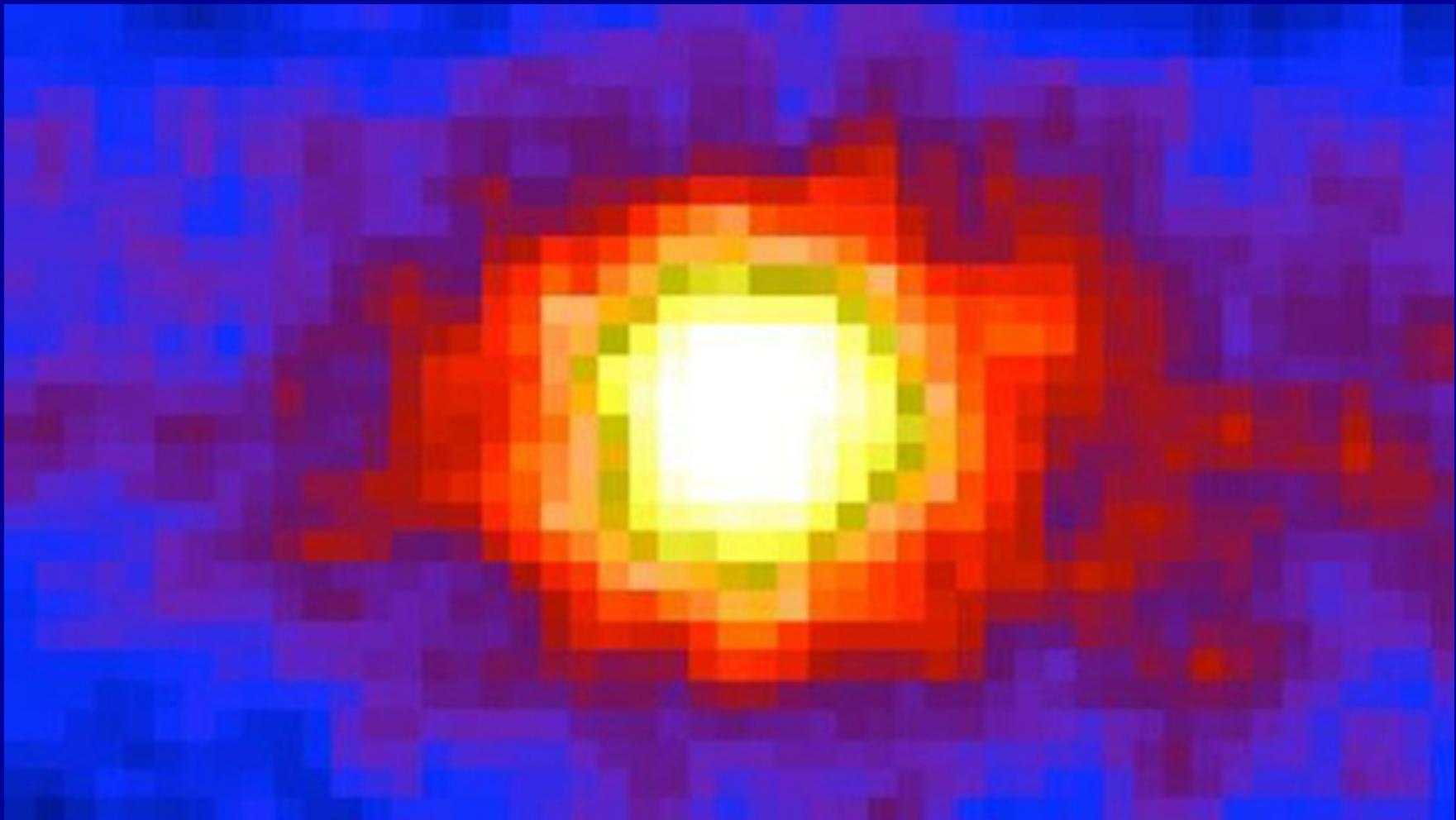
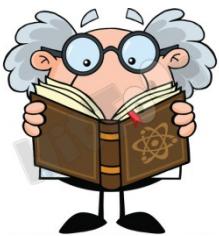
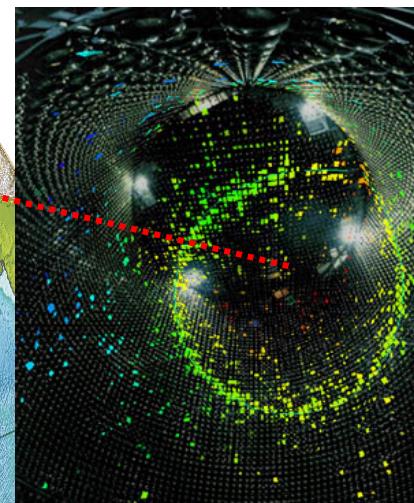
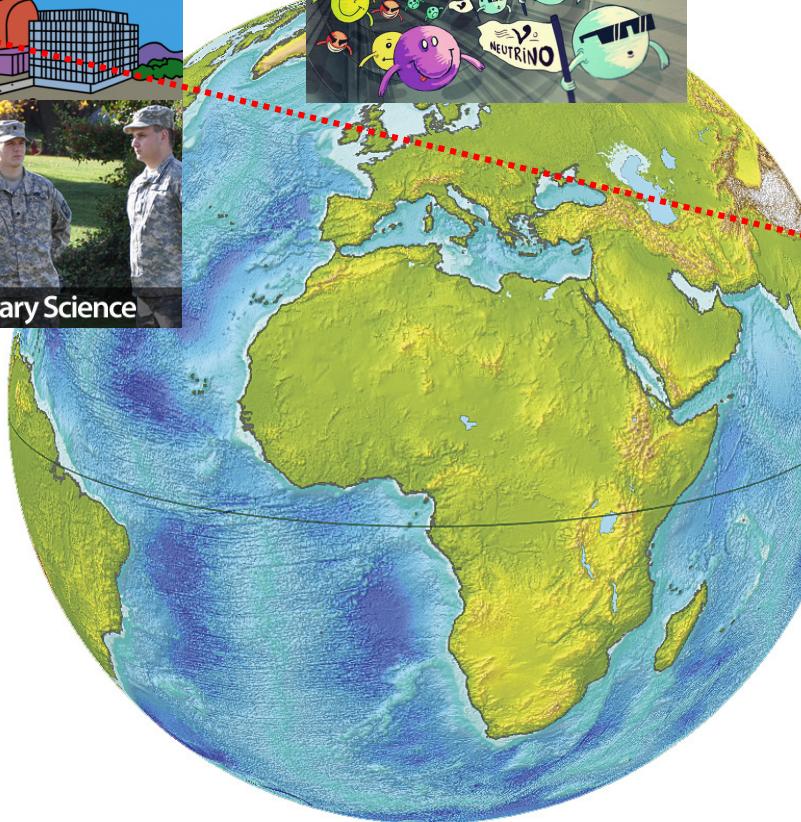
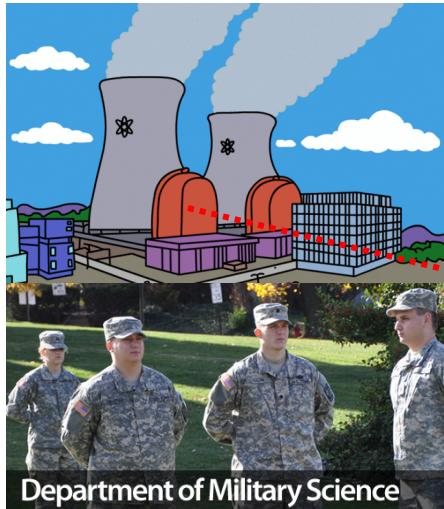


Imagen del Sol con neutrinos (Super-Kamiokande)





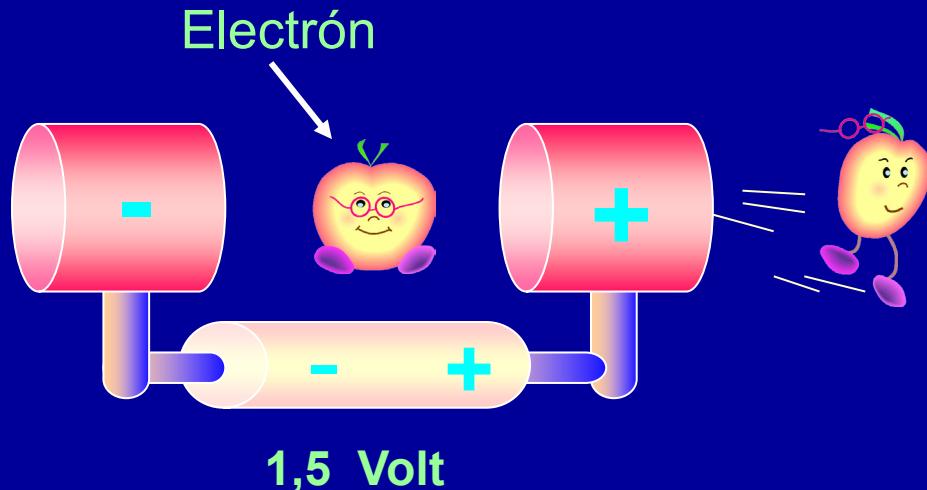
Proliferación Nuclear Control a distancia



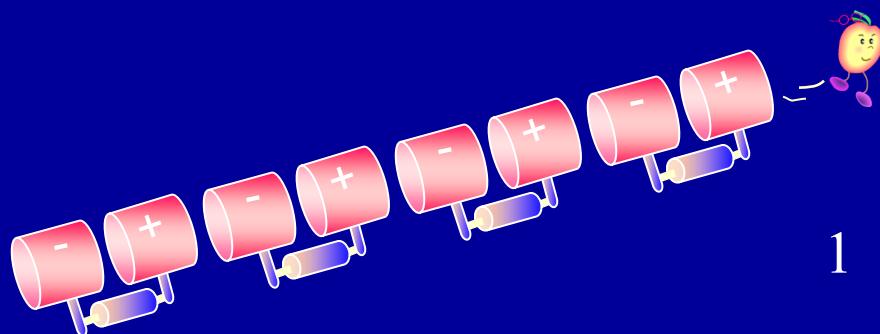
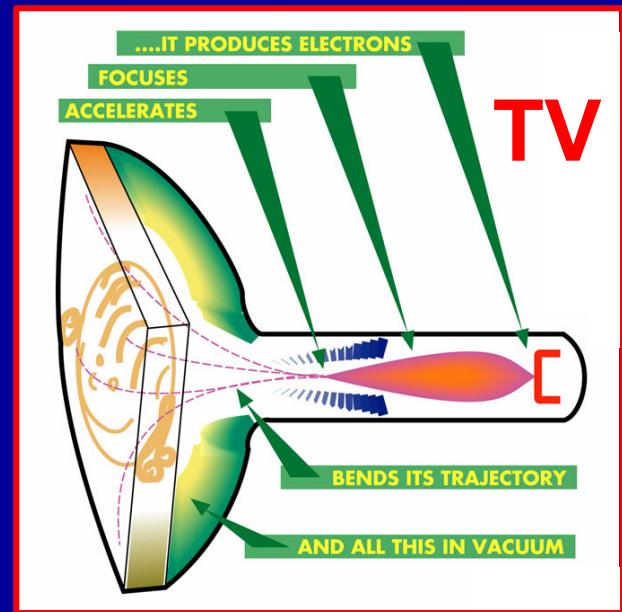
ν Detector



Aceleradores de Partículas



$E = 1.5 \text{ eV}$ (electrón-Voltio)

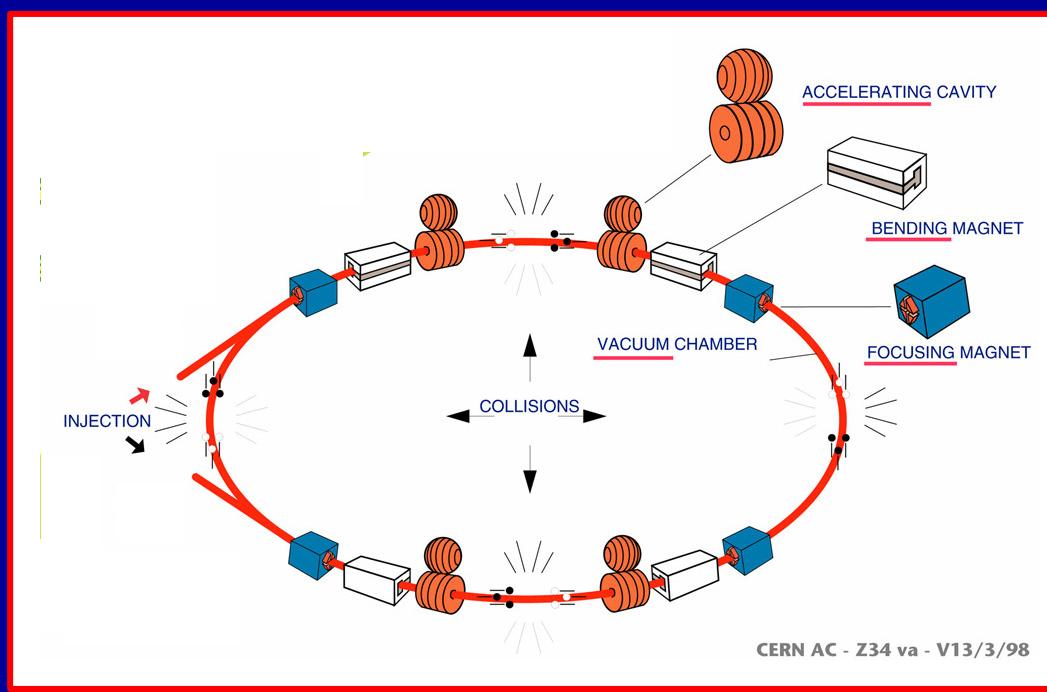
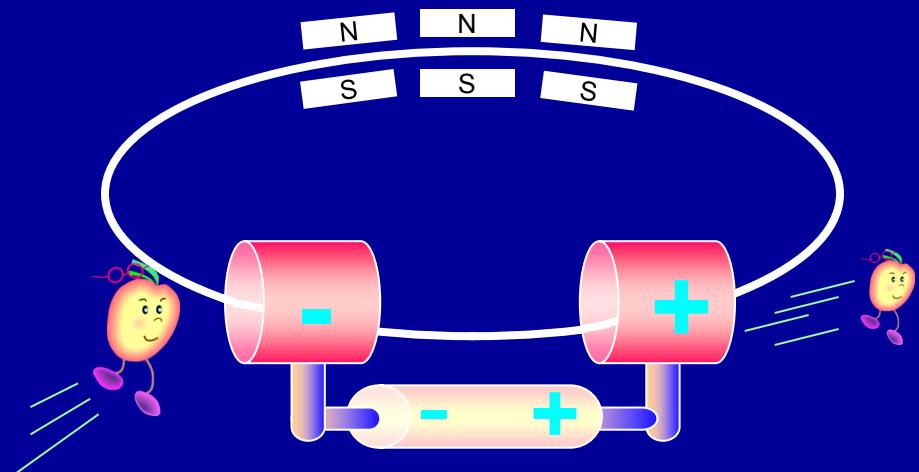
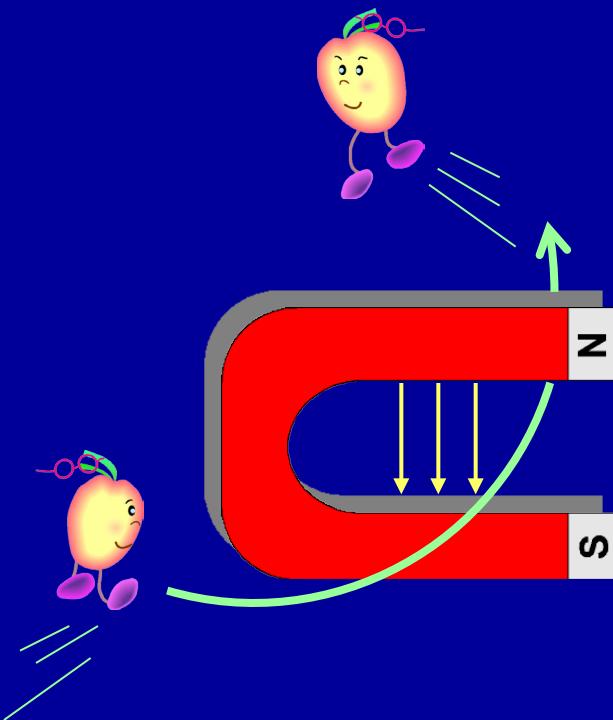


$\sim 5 \text{ MeV / m}$

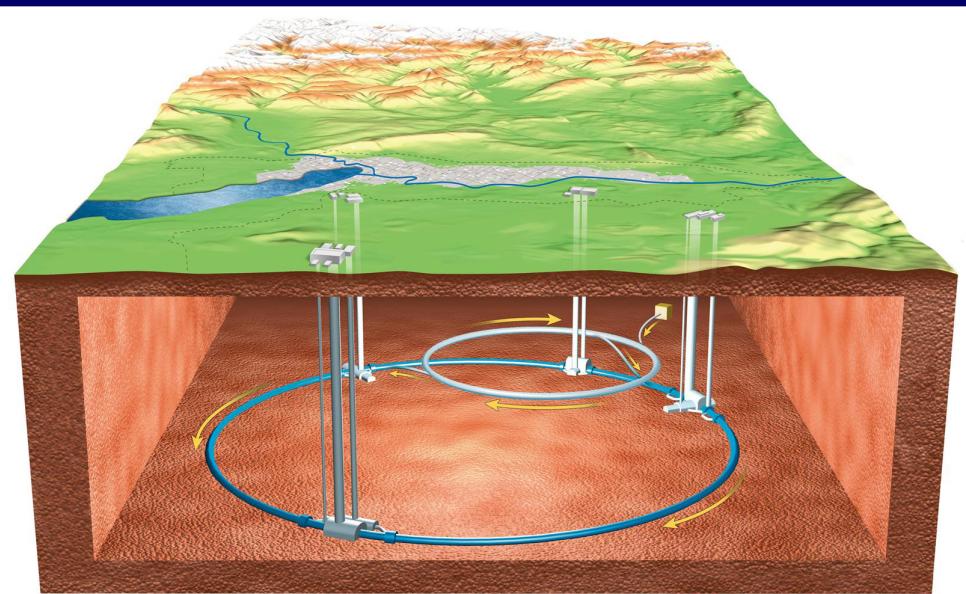
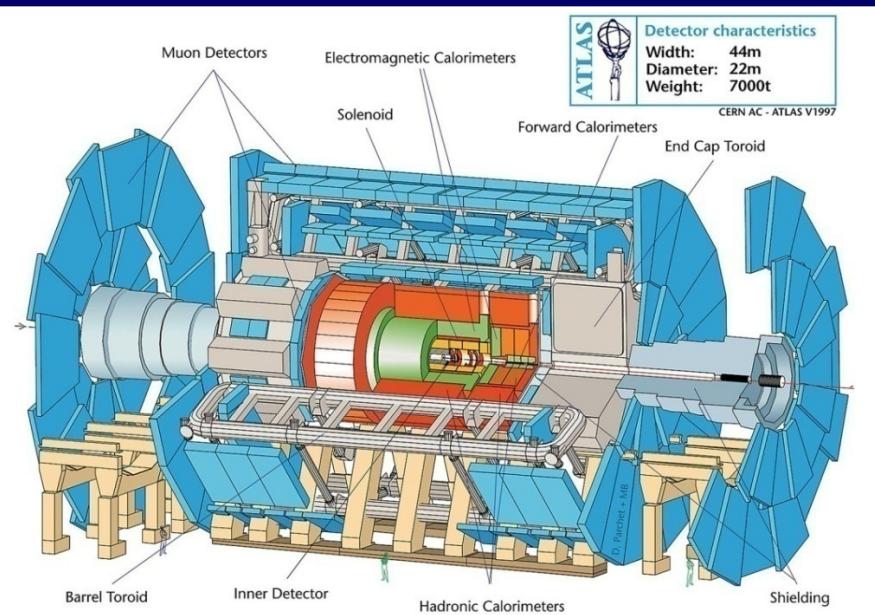
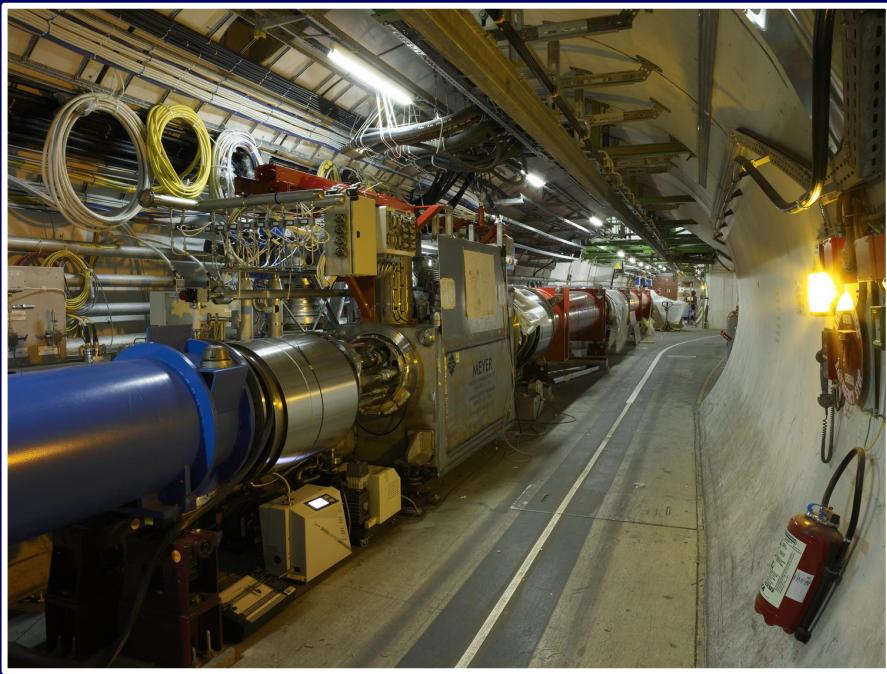
$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} = 1.000.000 \text{ eV}$$

LHC: $8 \text{ TeV} = 8 \times 10^{12} \text{ eV} = 8.000.000.000.000 \text{ eV}$

Acelerador Circular



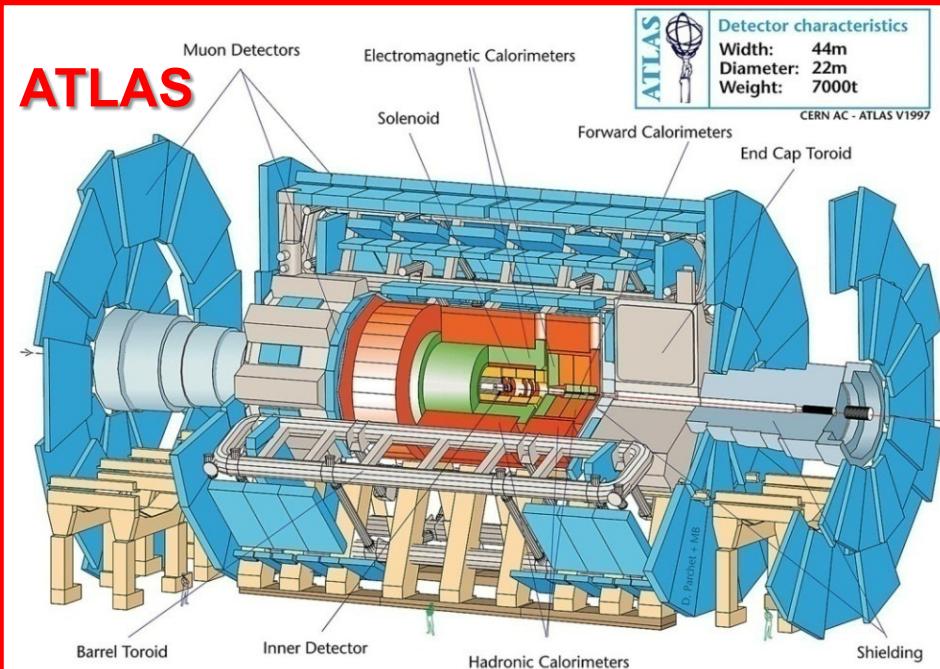
Colisionador



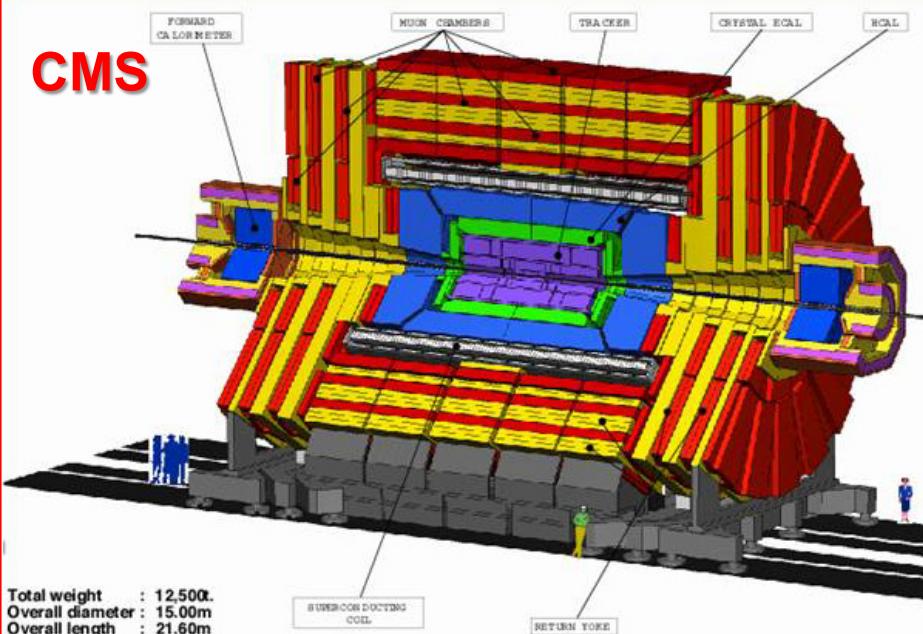
DETECTORES

800 millones de colisiones por segundo

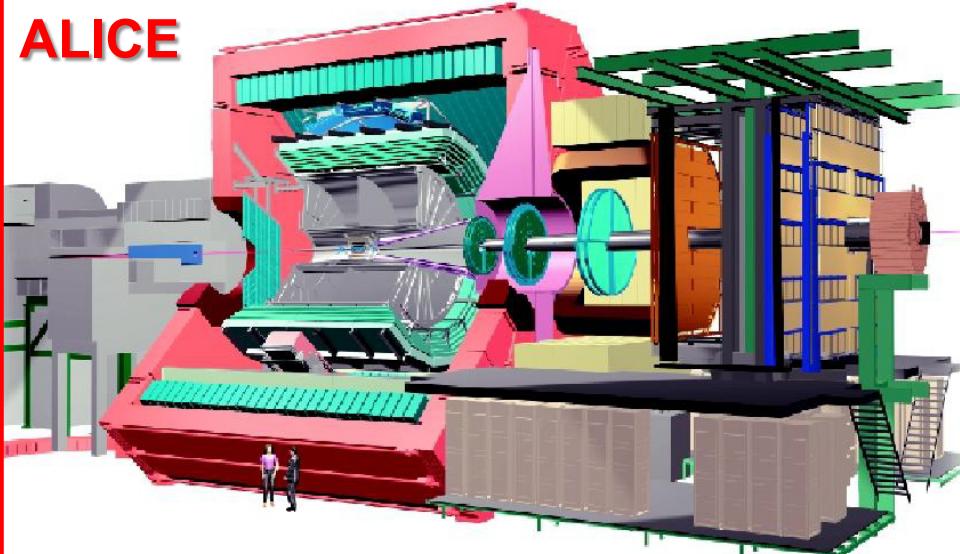
ATLAS



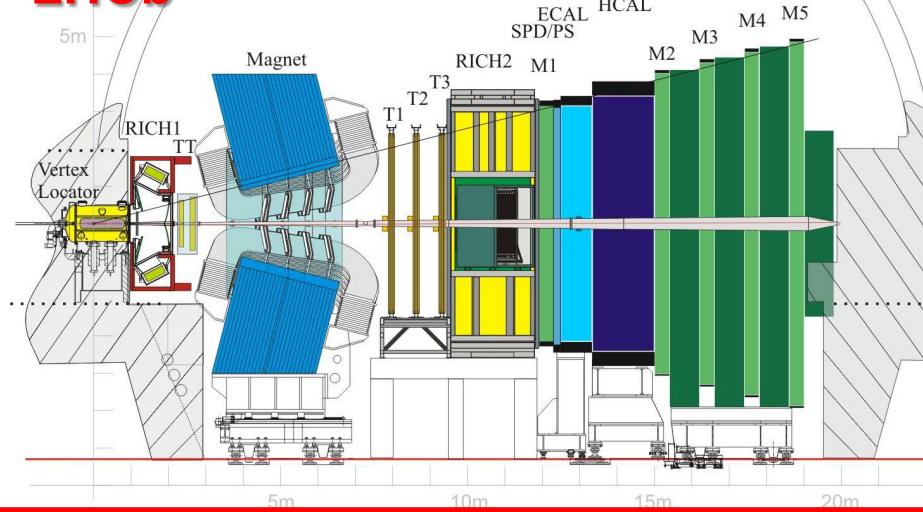
CMS



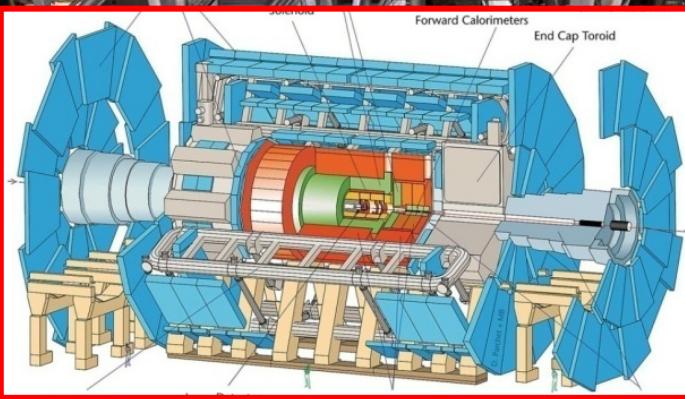
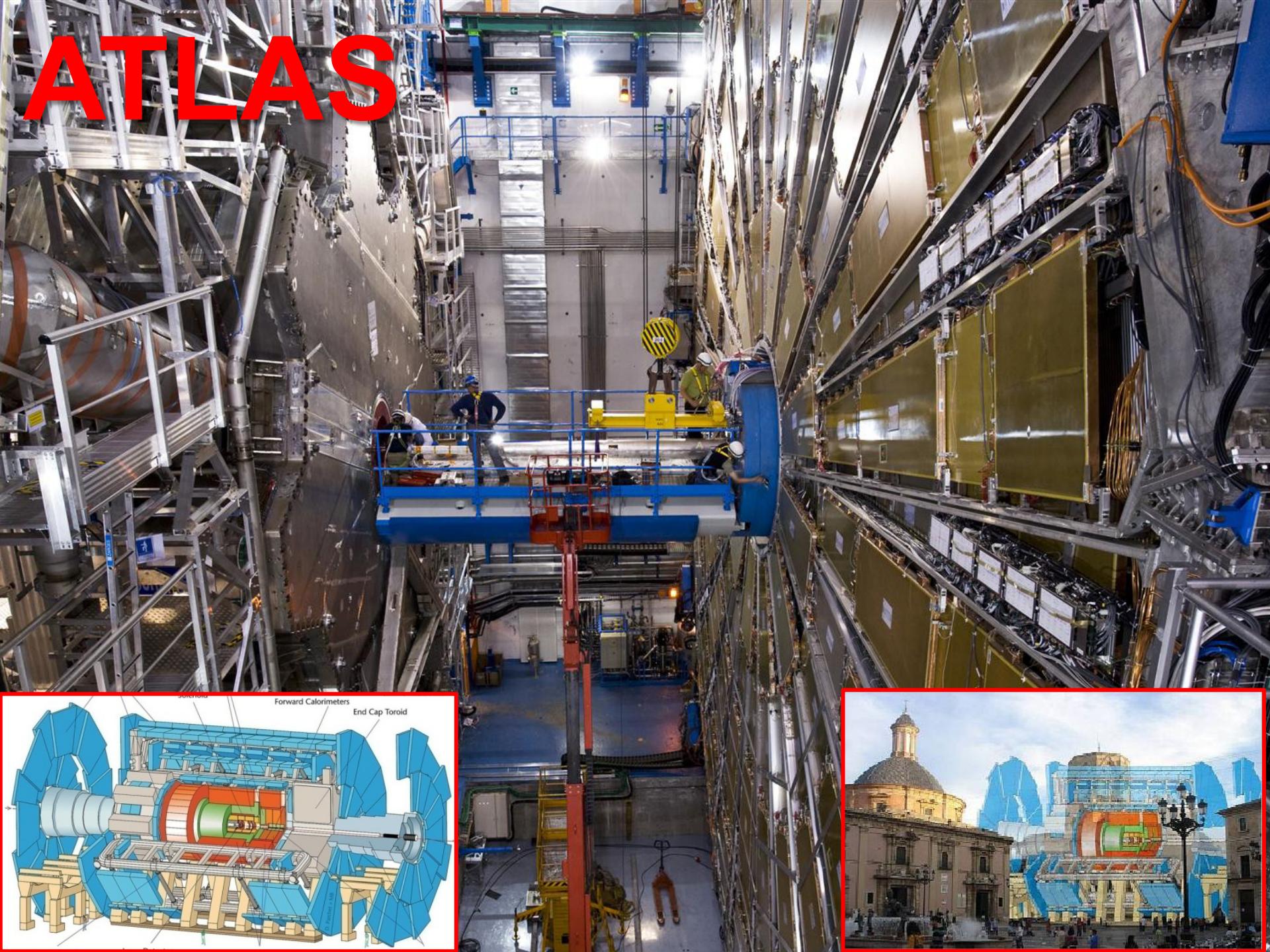
ALICE



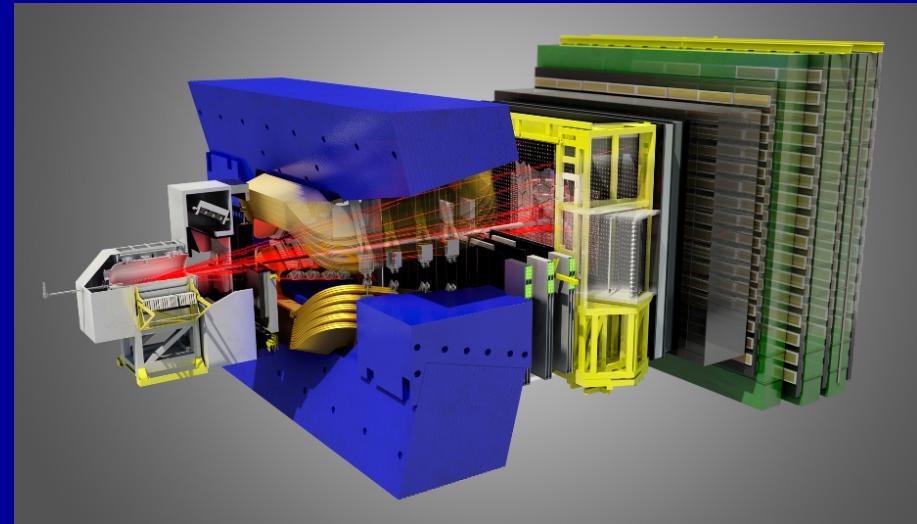
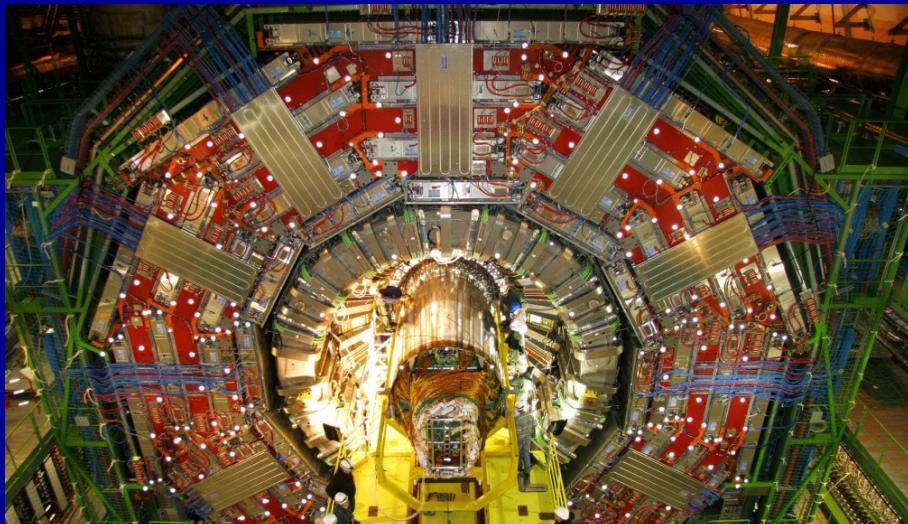
LHCb



ATLAS



Contribución Española al LHC

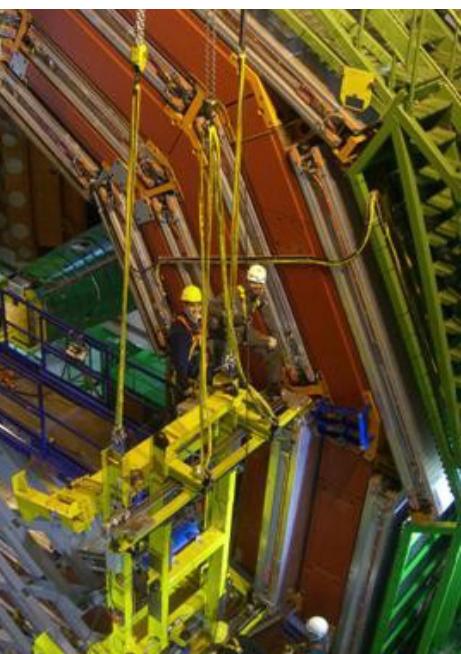
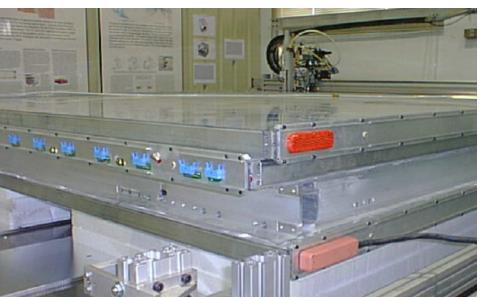
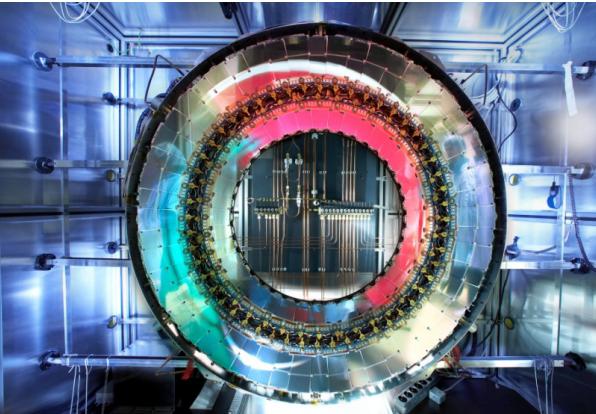
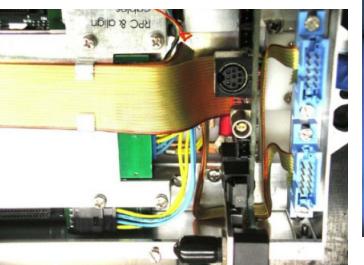
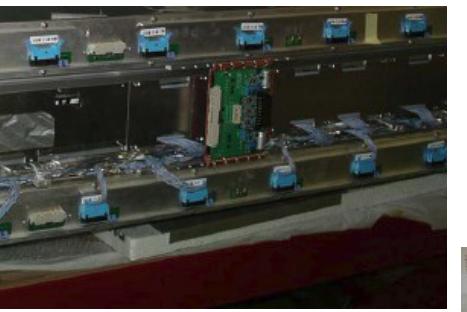


- ATLAS: IFAE, IMB (Barcelona), IFIC (Valencia), UAM (Madrid)
- CMS: CIEMAT, UAM (Madrid), IFCA (Santander), UO (Oviedo)
- LHCb: UB, URL (Barcelona), IGFAE (Santiago), IFIC (Valencia)
- ALICE: CIEMAT (Madrid), IGFAE (Santiago)
- Física Teórica: IFAE, IFIC, IFT, IGFAE, UAB, UB, UCM, UGr, UZ

Coordinación:
(IFIC, Valencia)

**Centro Nacional de
Física de Partículas,
Astropartículas y Nuclear**

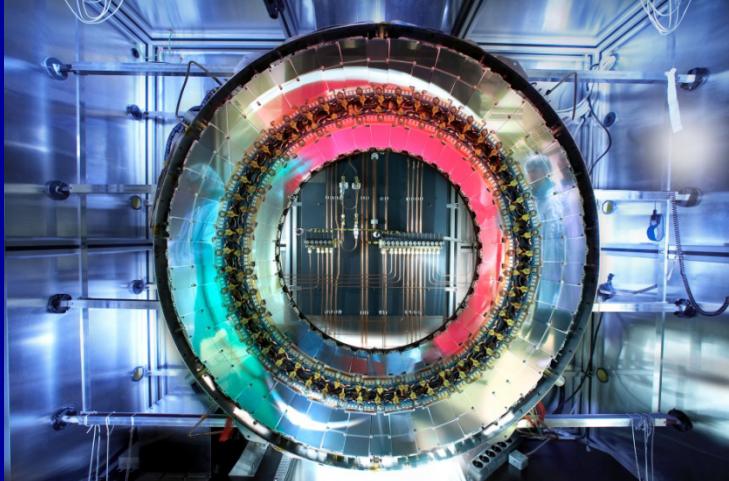




ATLAS @ IFIC



Tile Calorimeter



Silicon Tracker



GRID

