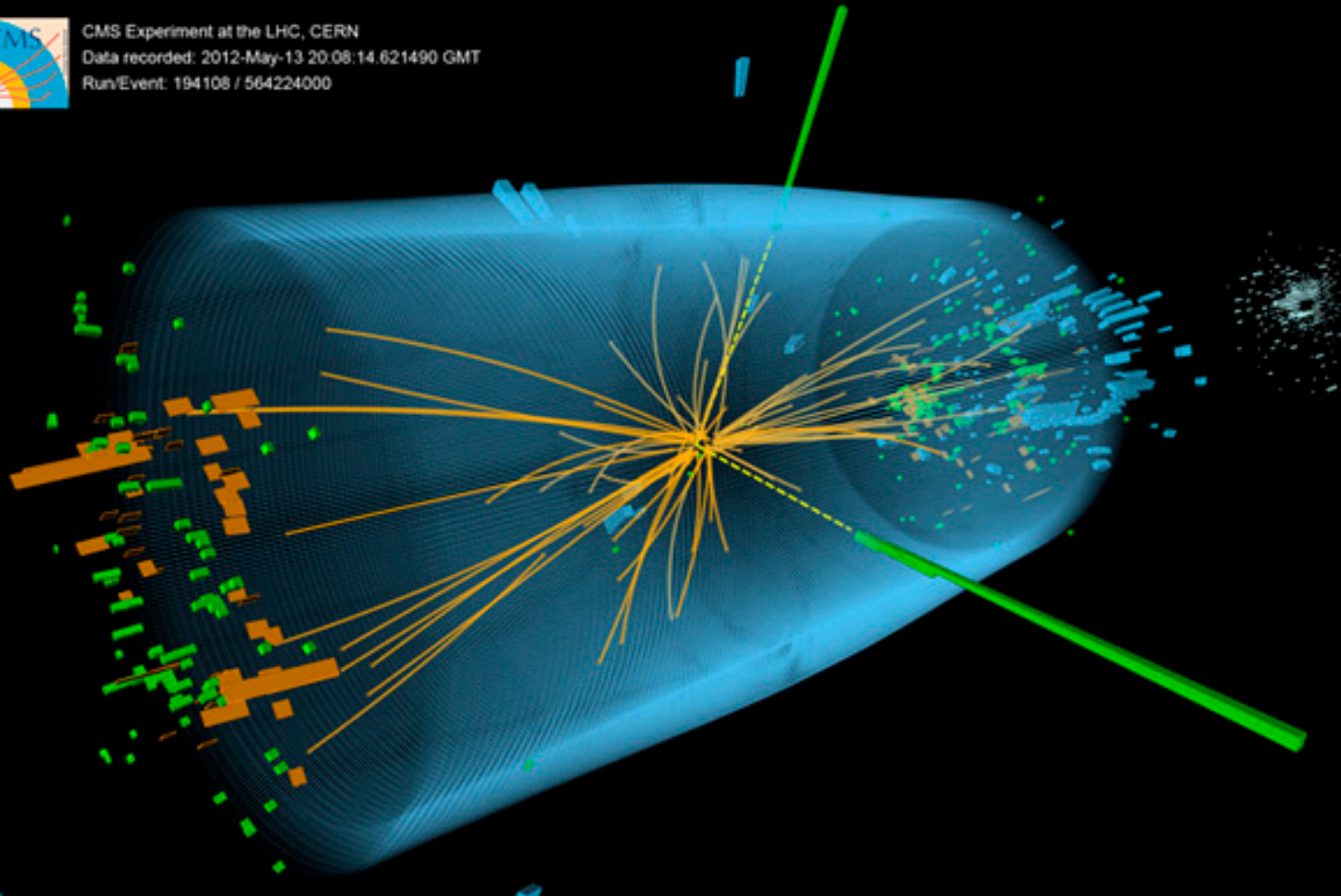




CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT
Run/Event: 194108 / 564224000



El Modelo Estándar

de las Interacciones Fundamentales

Antonio Pich



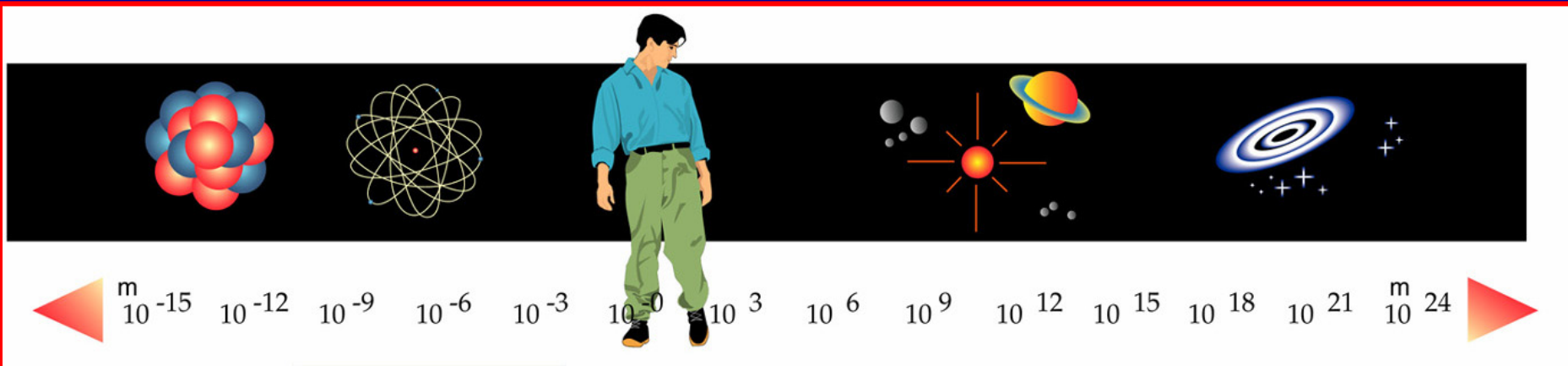
ESTRUCTURA DE LA MATERIA

Física de Partículas

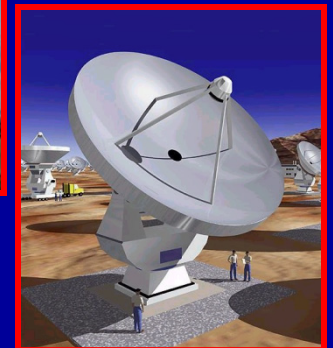
Astrofísica

Pequeñas Distancias

Grandes Distancias



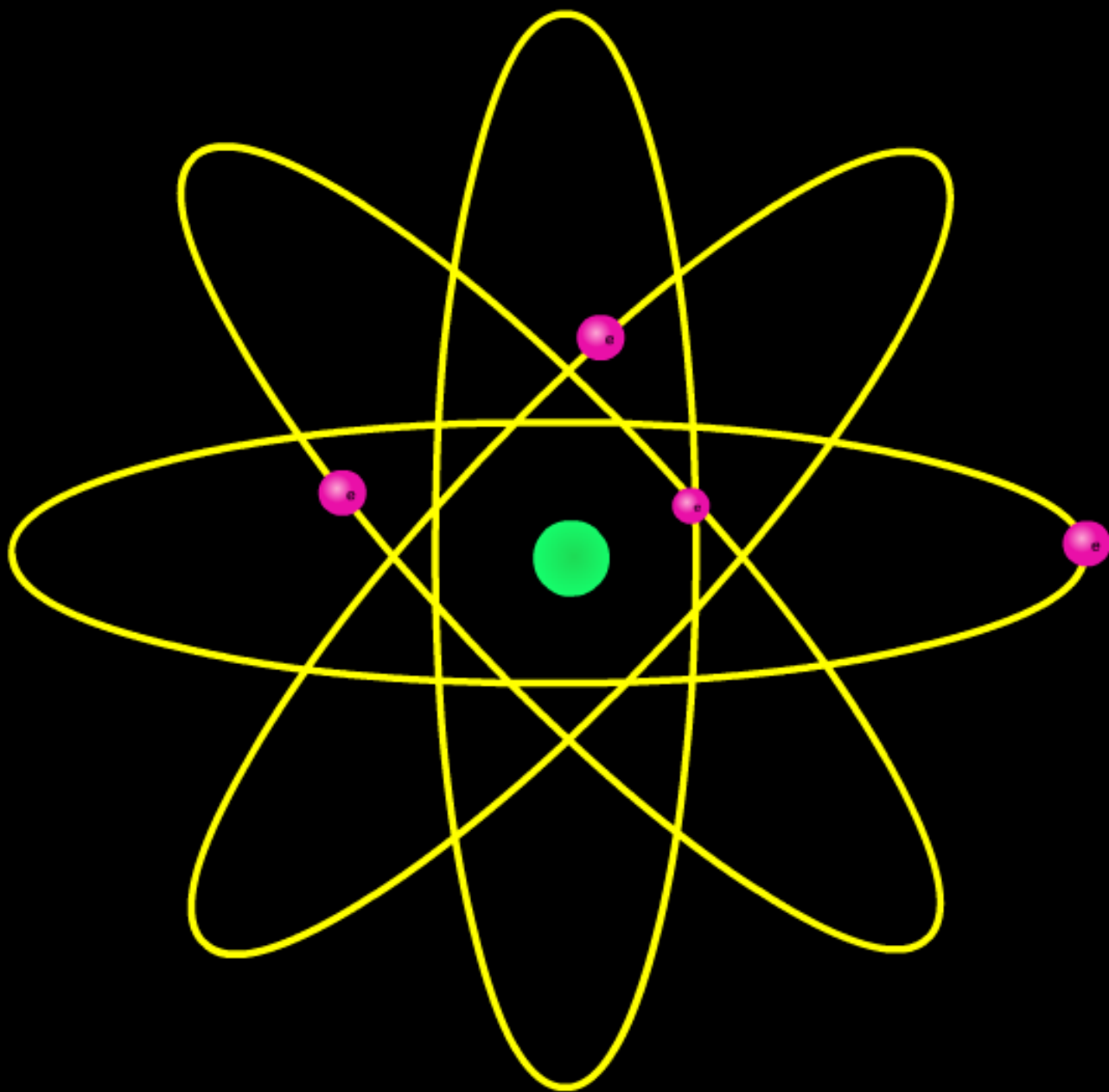
$$\lambda \sim h/p$$

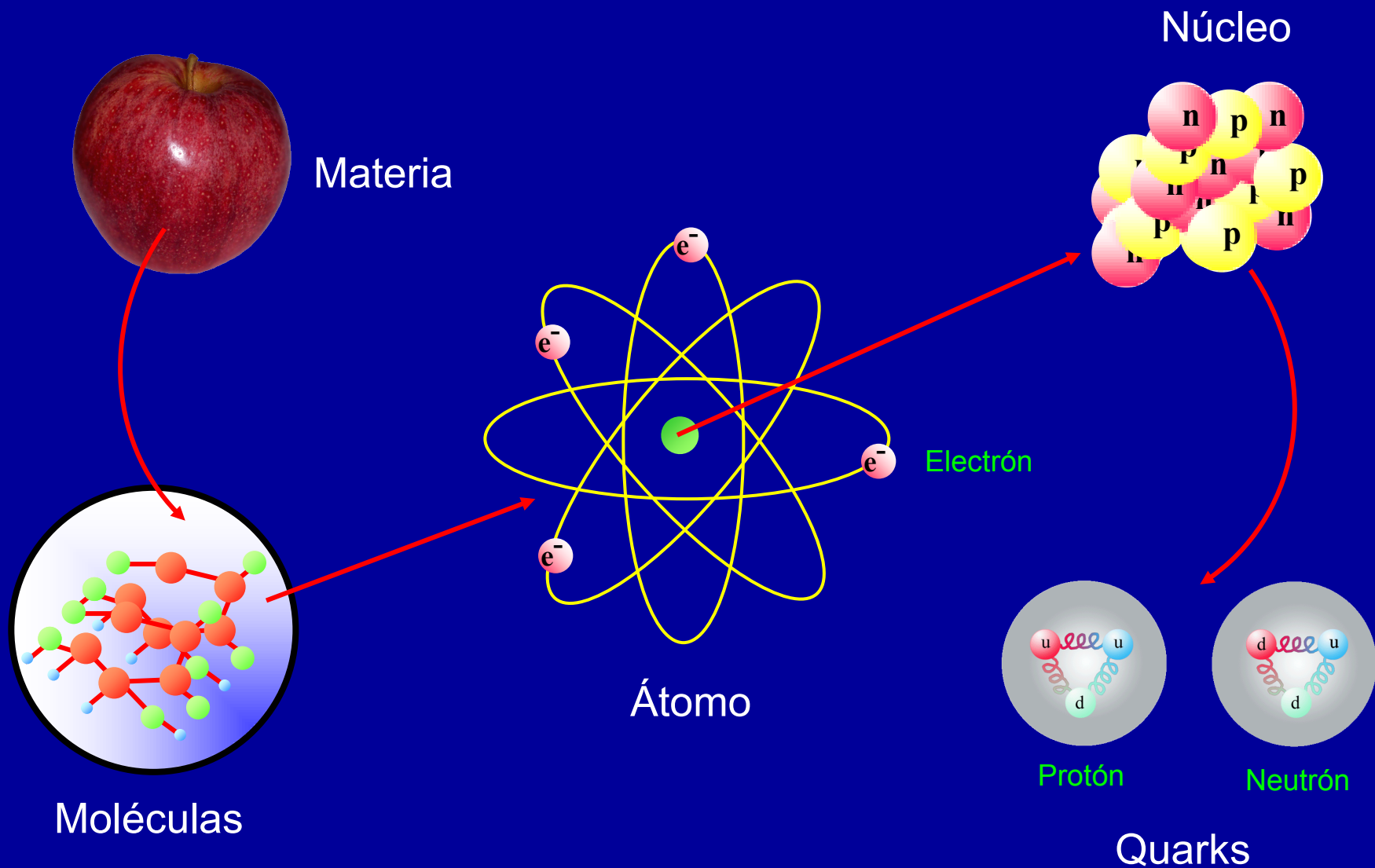


18

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
	90 Th Torio	91 Pa Protactinio	92 U Uranio	93 Np Neptunio	94 Pu Plutonio	95 Am Americio	96 Cm Curio	97 Bk Berkelio	98 Cf Californio	99 Es Einsteinio	100 Fm Fermio	101 Md Mendelevio	102 No Nobelio	103 Lr Laurencio

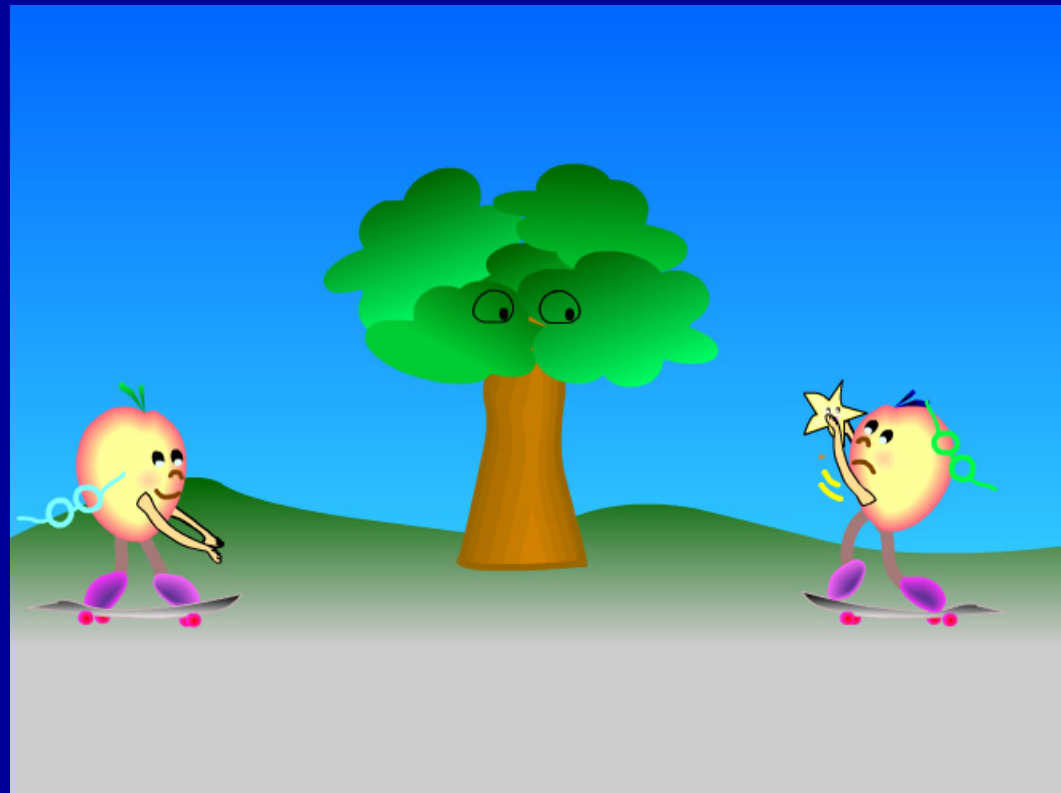




Las Fuerzas de la Naturaleza

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

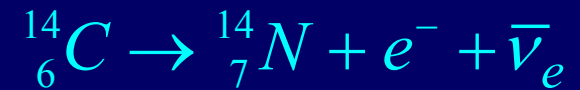


RADIOACTIVIDAD

(Desintegración β)

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

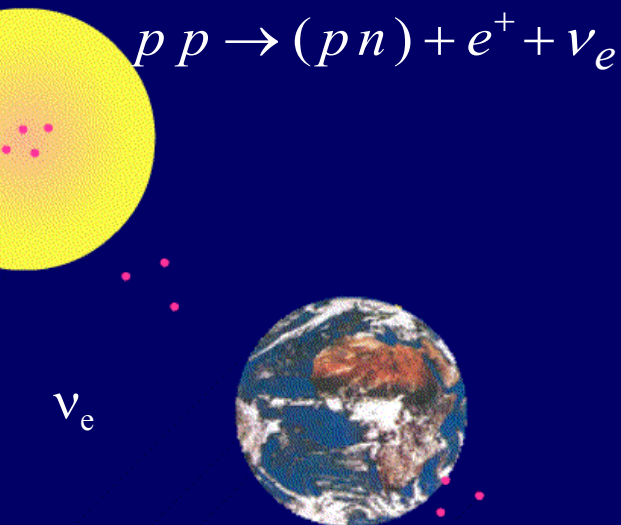
$$"p \rightarrow n + e^+ + \nu_e"$$



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

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

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



Interacción Débil

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

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

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 , $J = \frac{1}{2}$)

Quarks

$Q = 2/3$

$Q = -1/3$



arriba (u)



abajo (d)

Leptones

$Q = 0$

$Q = -1$



neutrino e (ν_e)



electrón (e)

Fuerzas

Bosones

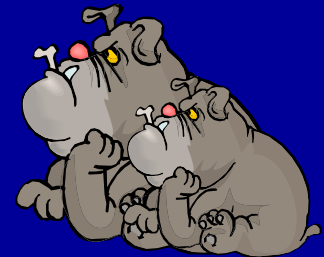
$J = 1$



fotón



gluones



Z^0 W^\pm

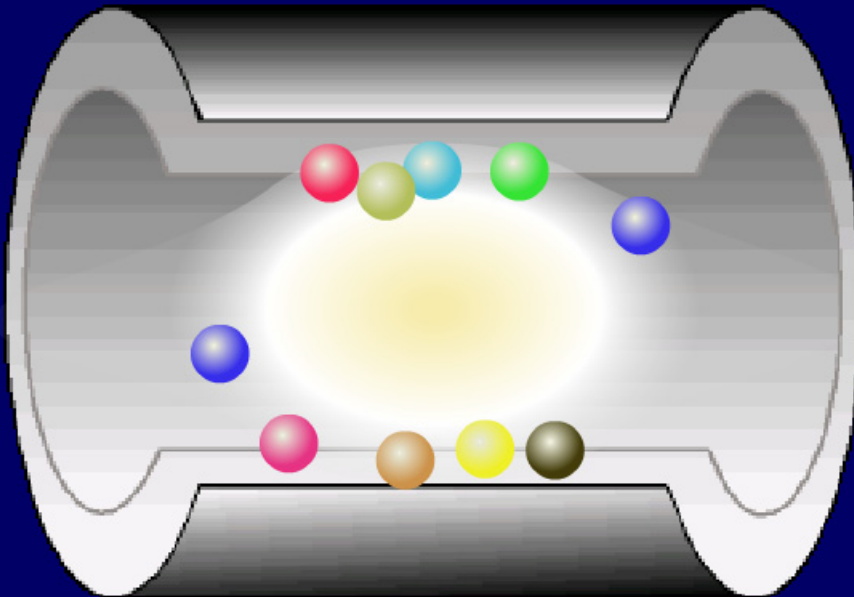


(Dirac)

Anti-partículas

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

$Q = 2/3$

$Q = -1/3$

0.003



arriba (u)

0.005



abajo (d)

1.3



encanto (c)

0.1



extraño (s)

173



verdad (t)

4.2



belleza (b)

Leptones

$Q = 0$

$Q = -1$

< 0.000002



neutrino e (ν_e)

0.0005



electrón (e)

< 0.000002



neutrino μ (ν_μ)

0.105



muón (μ)

< 0.000002



neutrino τ (ν_τ)

1.777



tau (τ)

Bosones

0



fotón

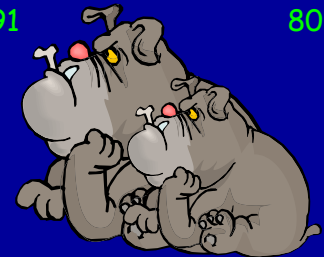
$J = 1$

0



gluones

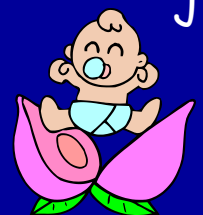
91



Z^0 W^\pm

80

125



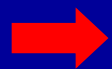
Higgs

$J = 0$

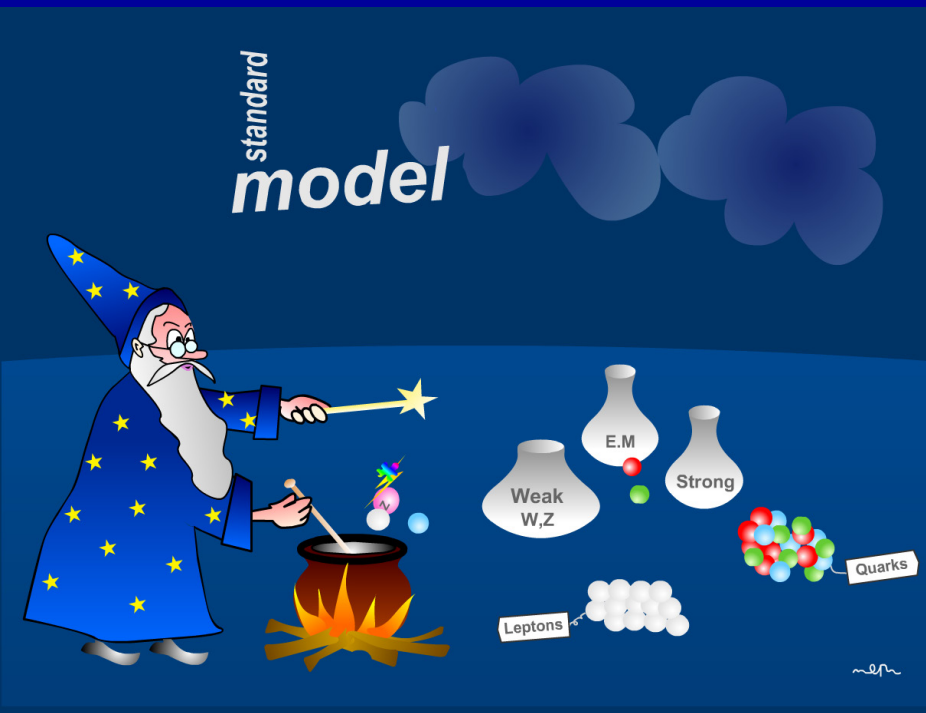
neq

TEORÍA ESTÁNDAR

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



Teoría Cuántica de Campos



- Electrodinámica Cuántica (QED)

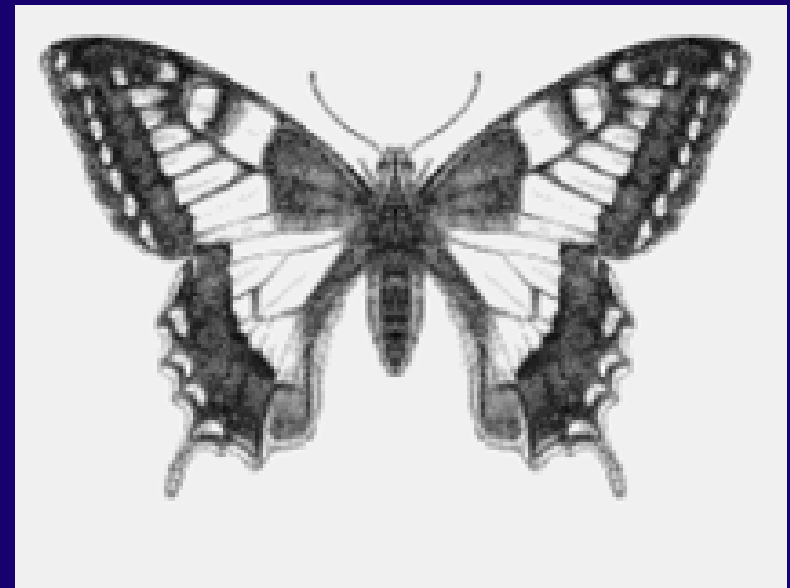
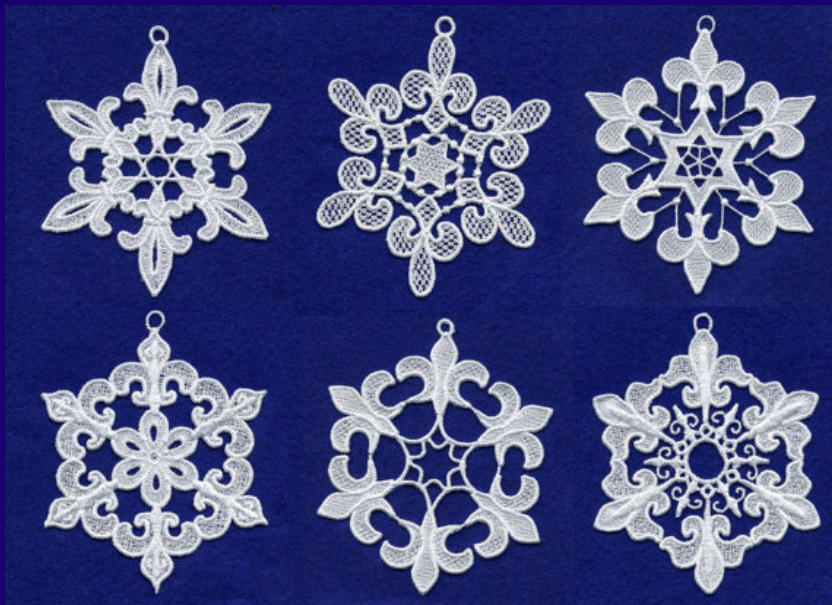
Electricidad + Magnetismo + Luz: γ

- Cromodinámica Cuántica (QCD)

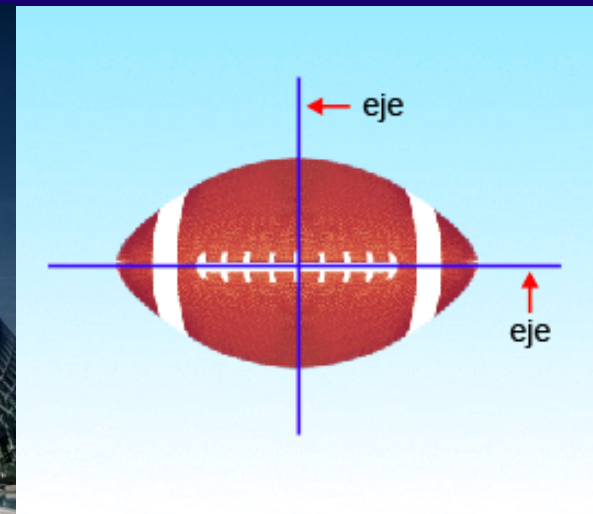
Interacción Fuerte: 8 Gluones

- 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

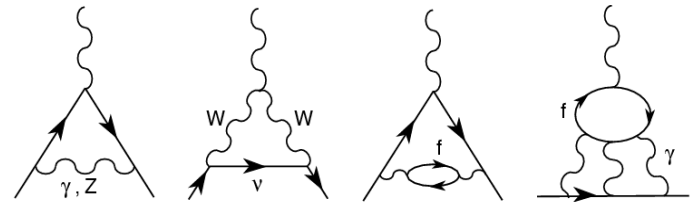


Momento Magnético Anómalo

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

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

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



$$a_e^{\text{th}} = 0.001\,159\,652\,181\,78\,(77)$$

$$a_e^{\text{exp}} = 0.001\,159\,652\,180\,73\,(28)$$

- **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).

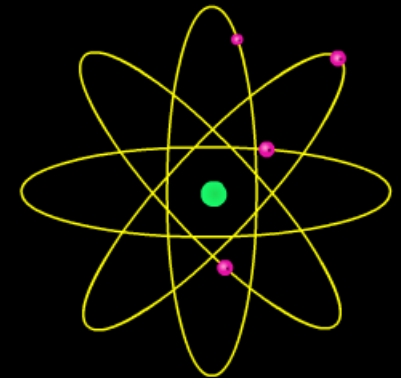
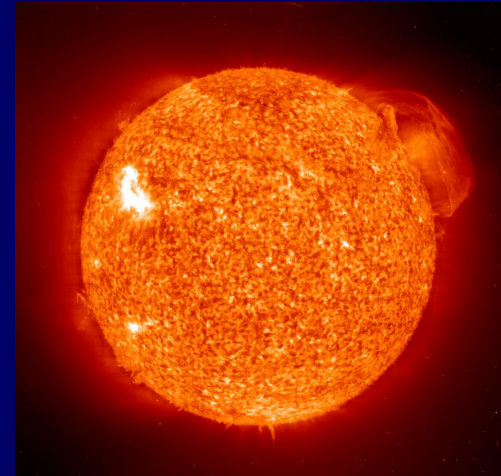
El Universo sería distinto

- 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





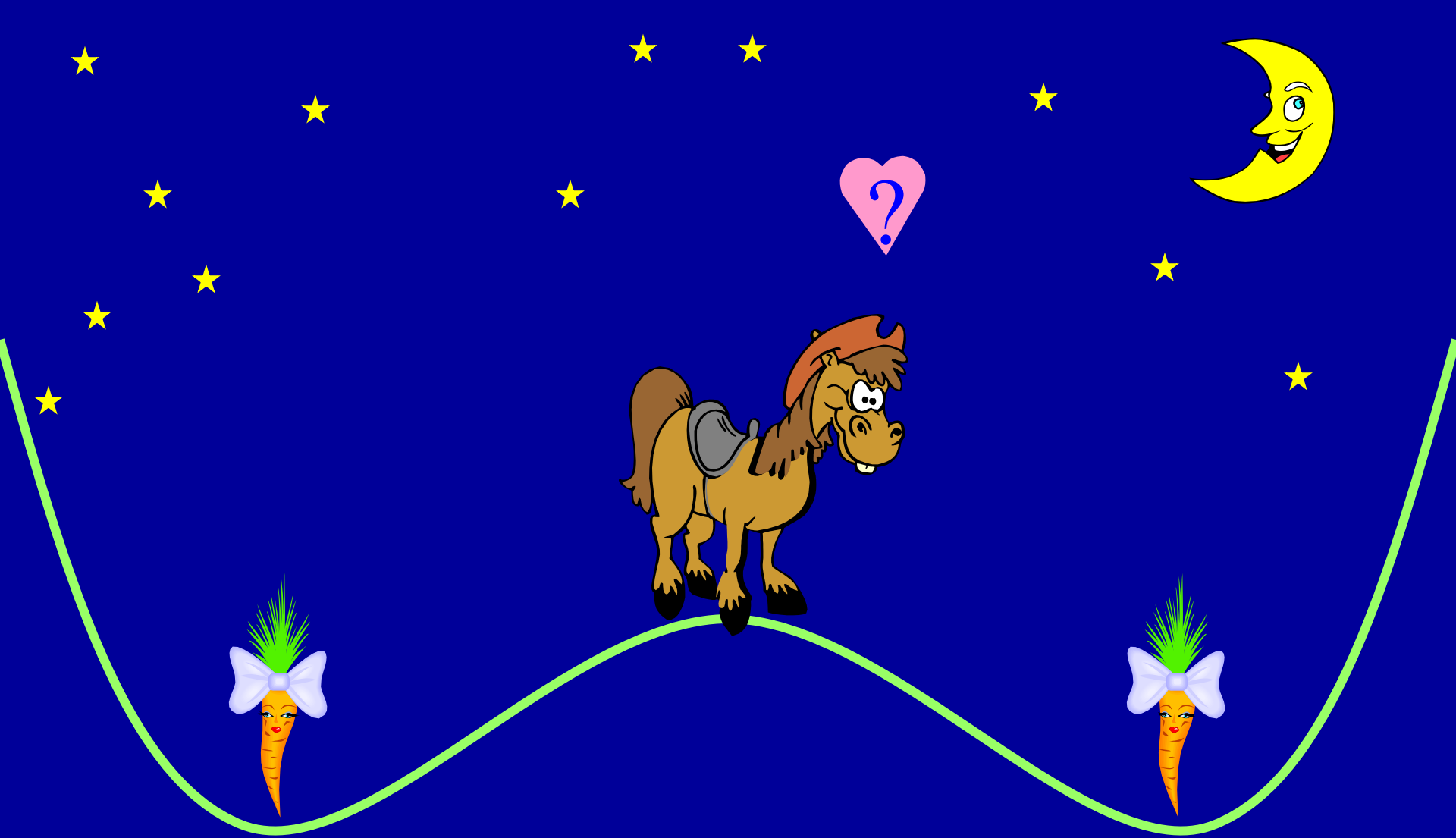
net

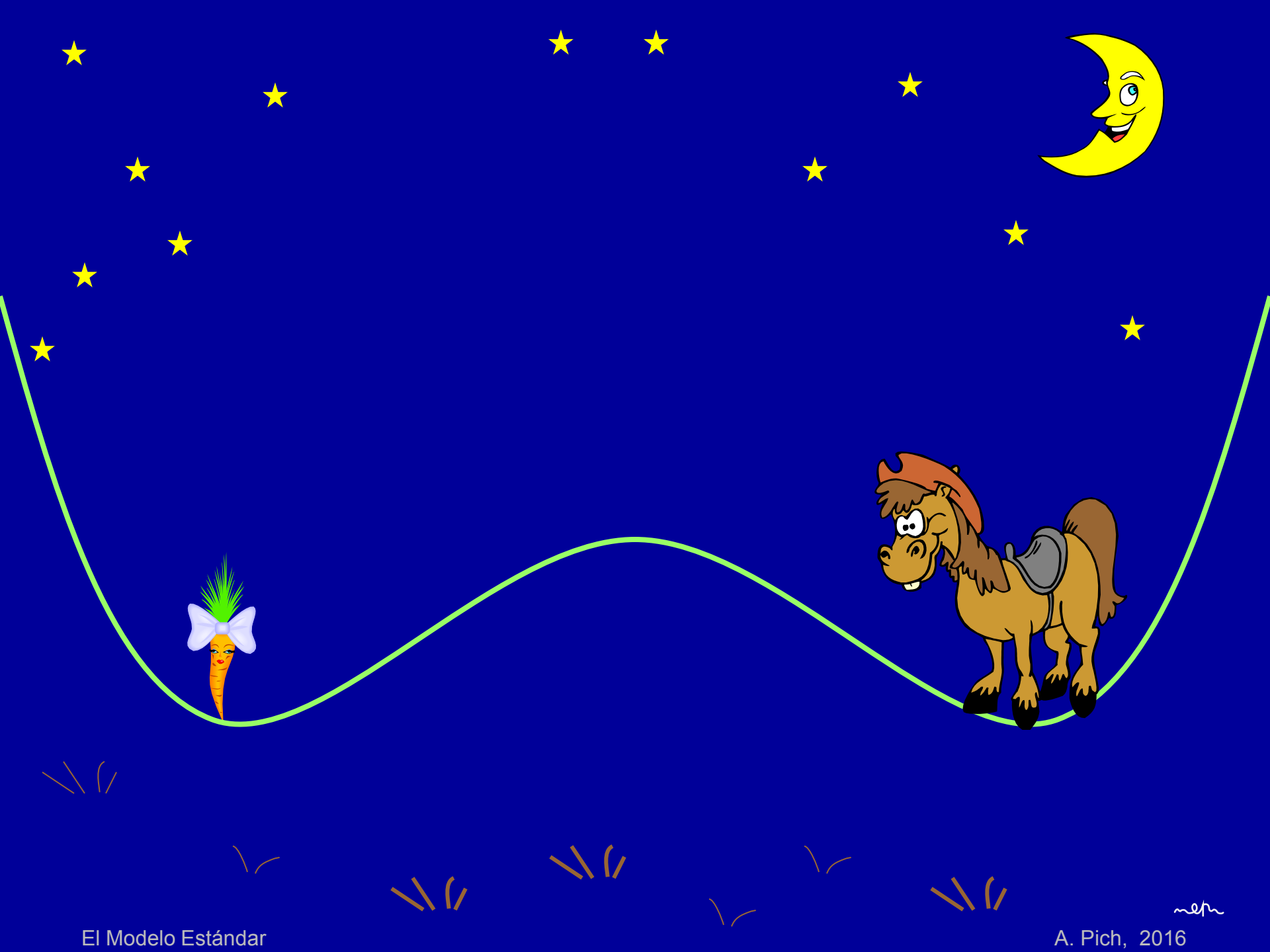
Rotura espontánea de simetría

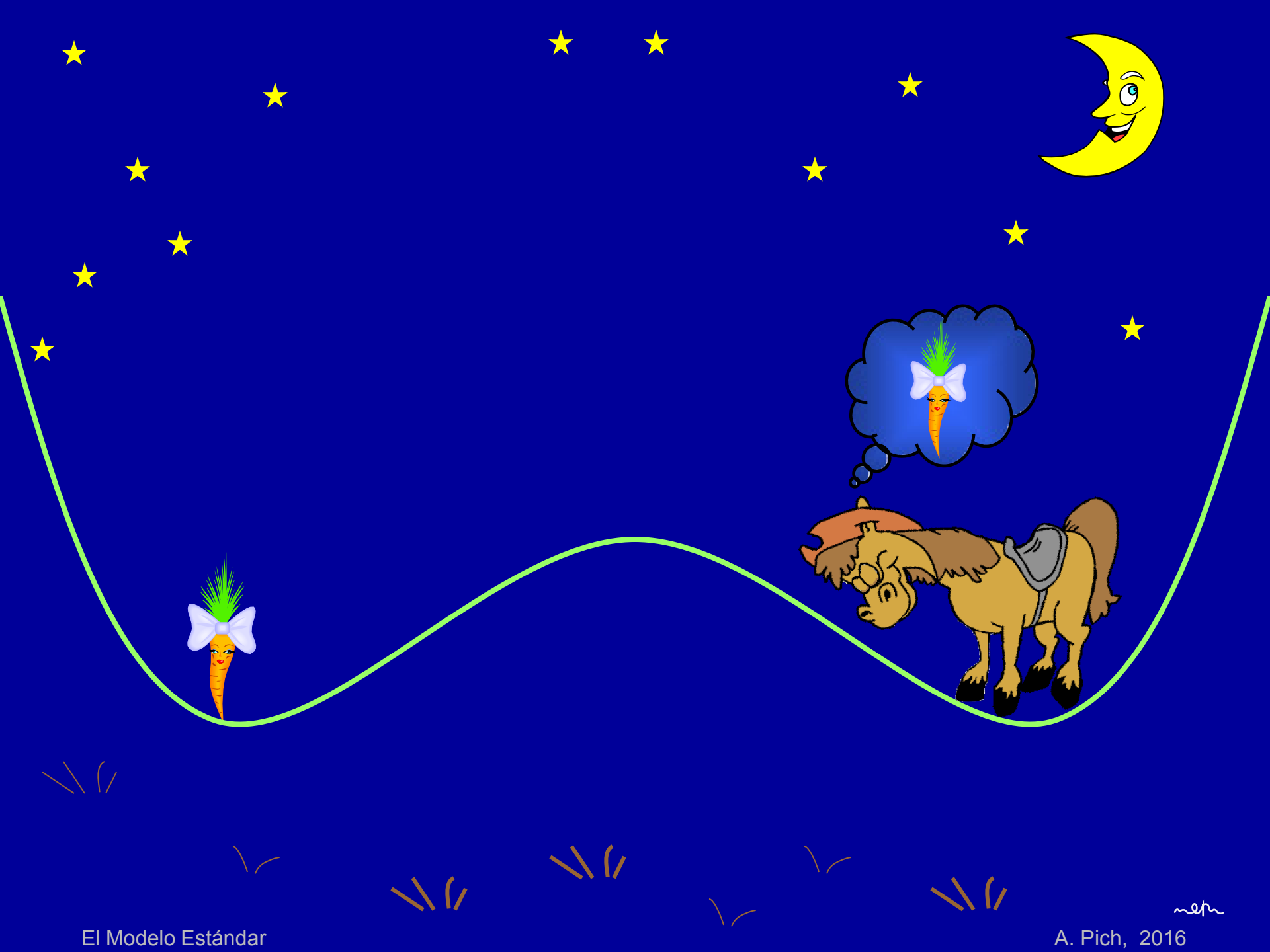


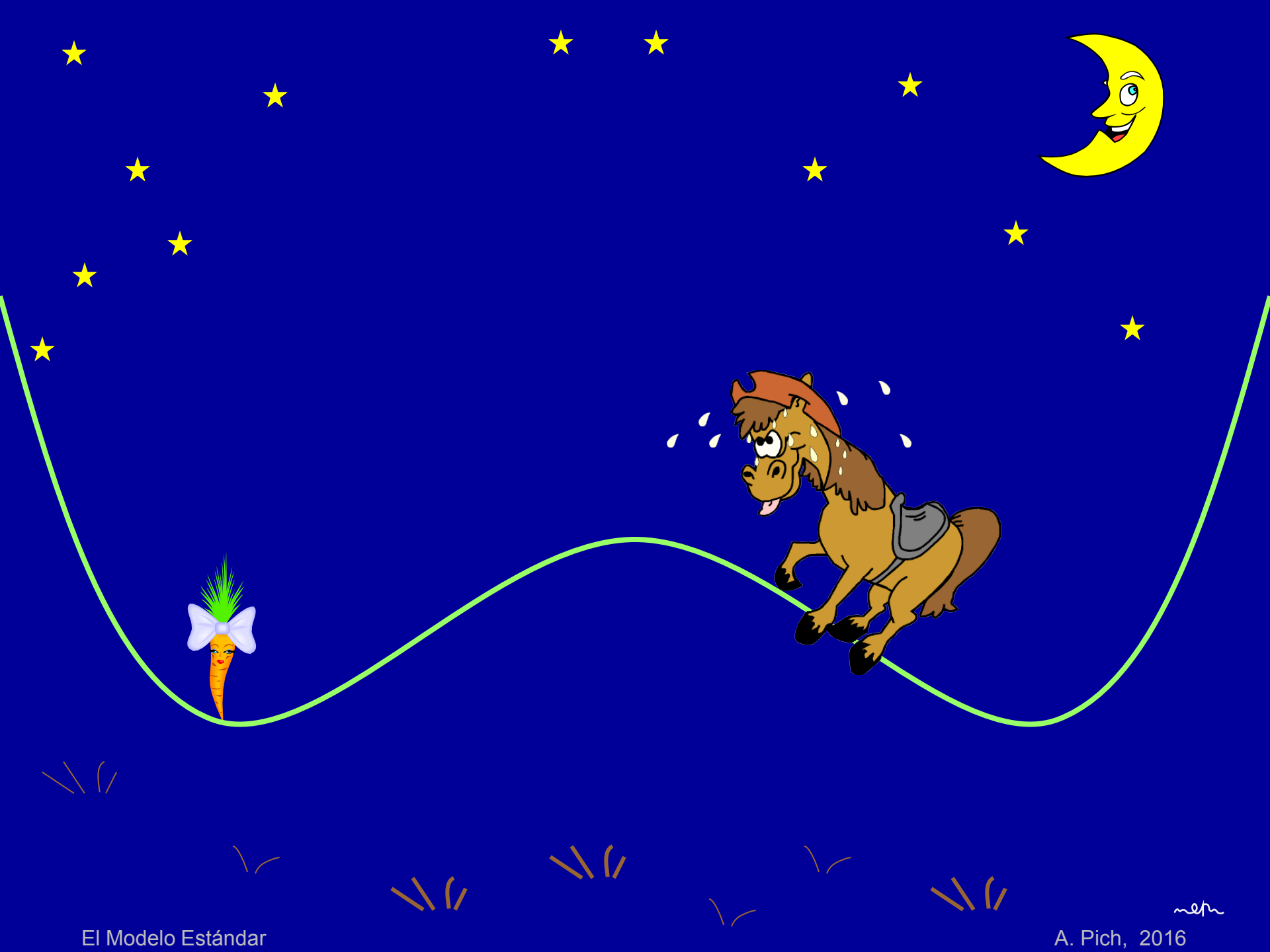
Rotura espontánea de simetría

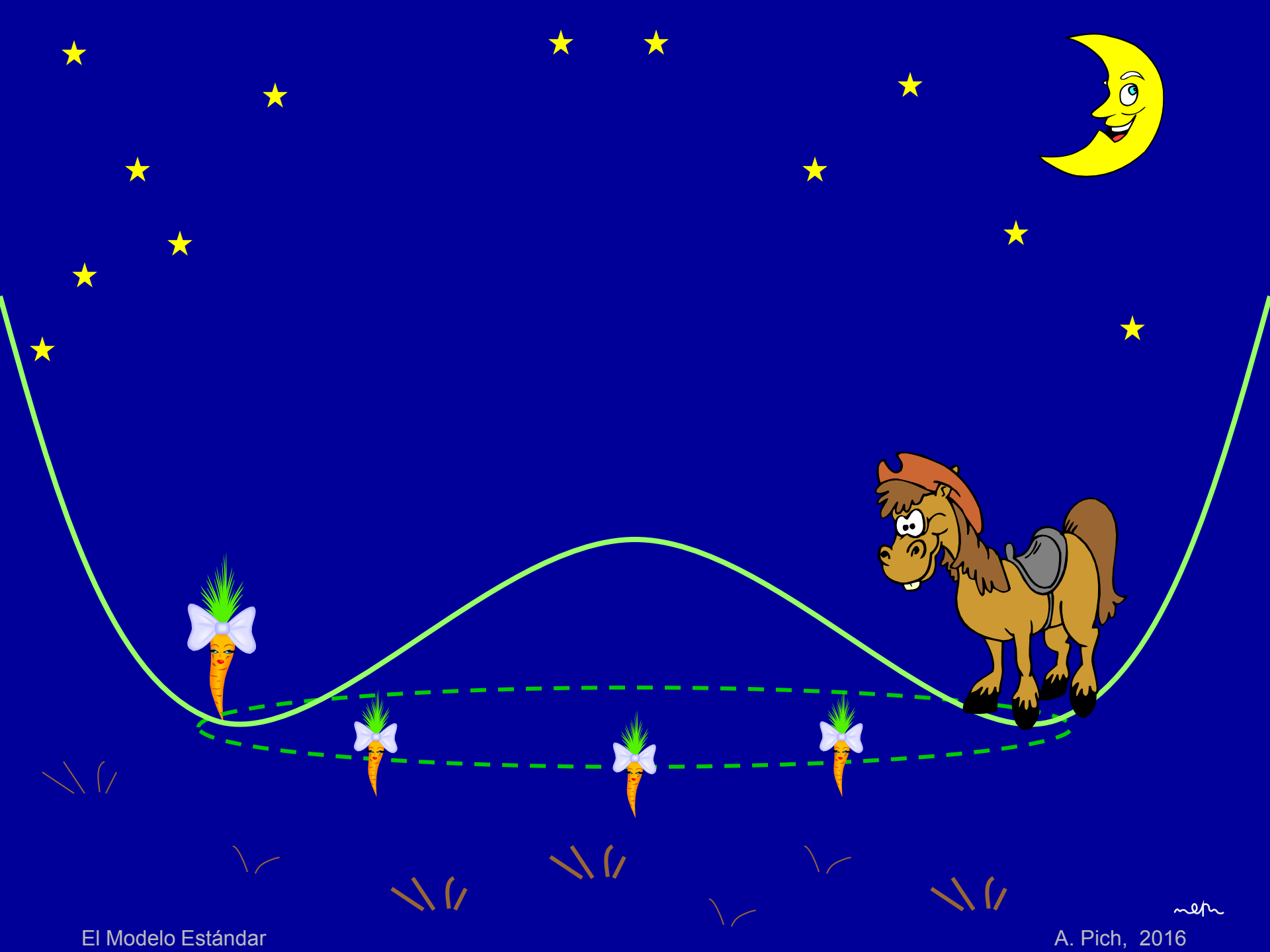




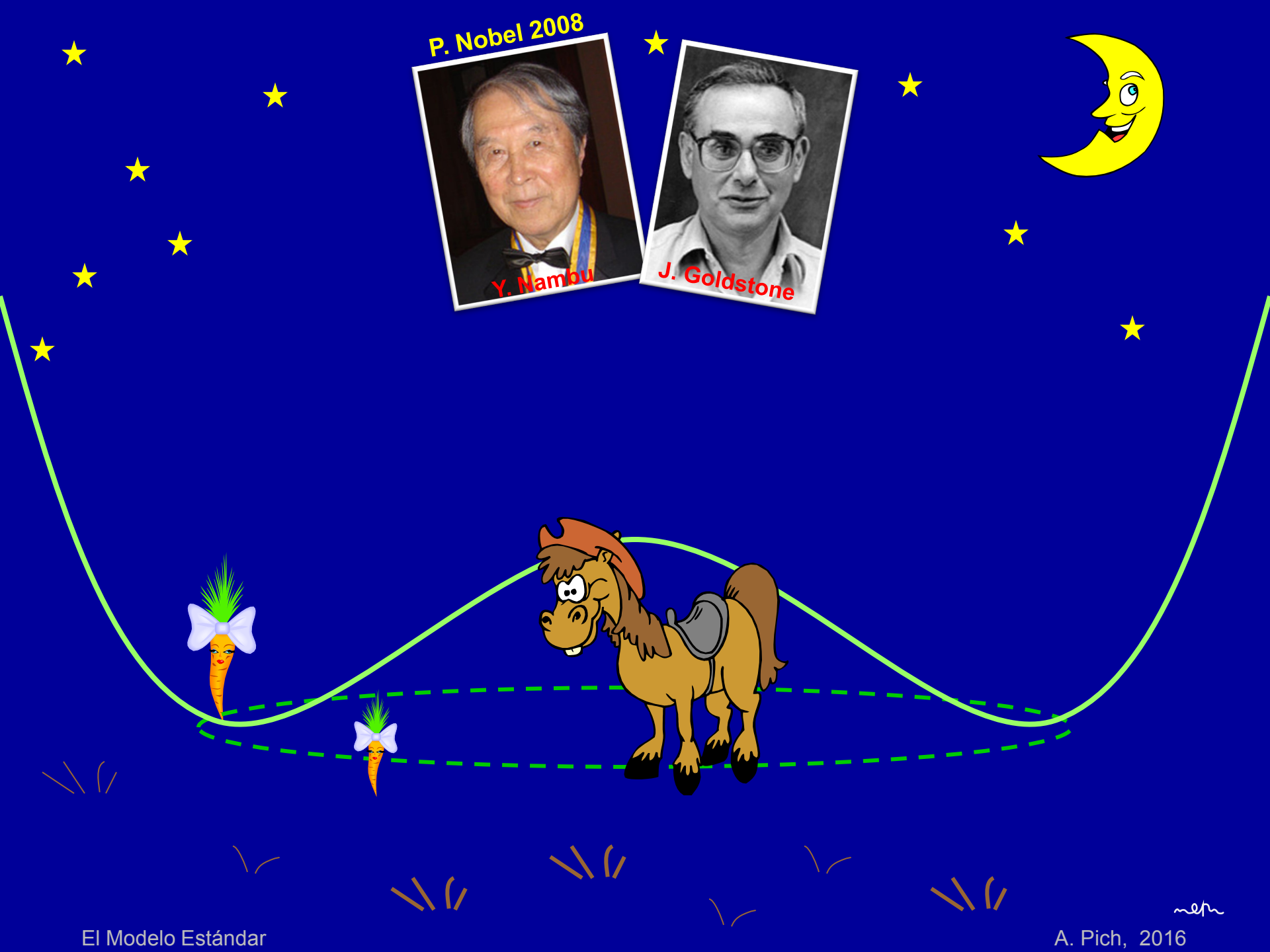
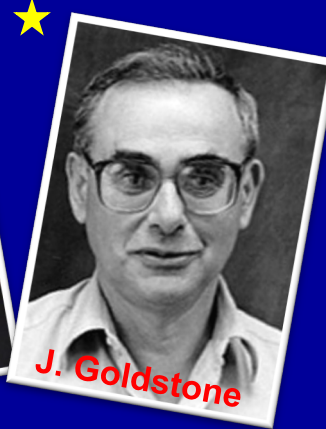








P. Nobel 2008



Mecanismo de Higgs

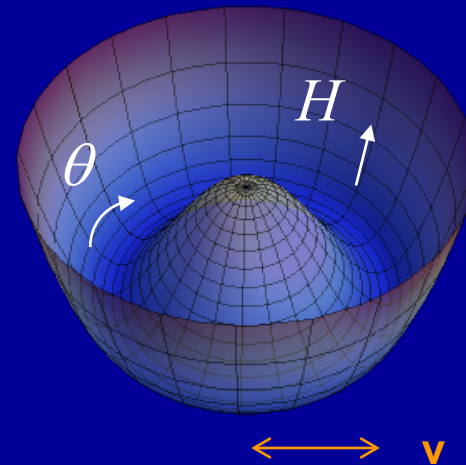


Kibble Guralnik Hagen Englert Brout



Higgs 1964

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



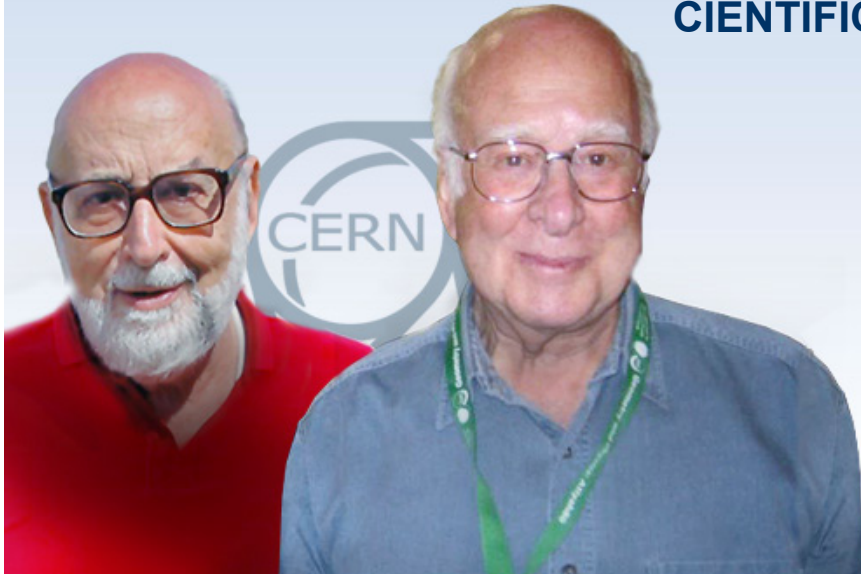
A. Salam

P. Nobel 1979

Descubrimiento del Boson de Higgs



PREMIO PRÍNCIPE DE ASTURIAS DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TÉCNICA 2013

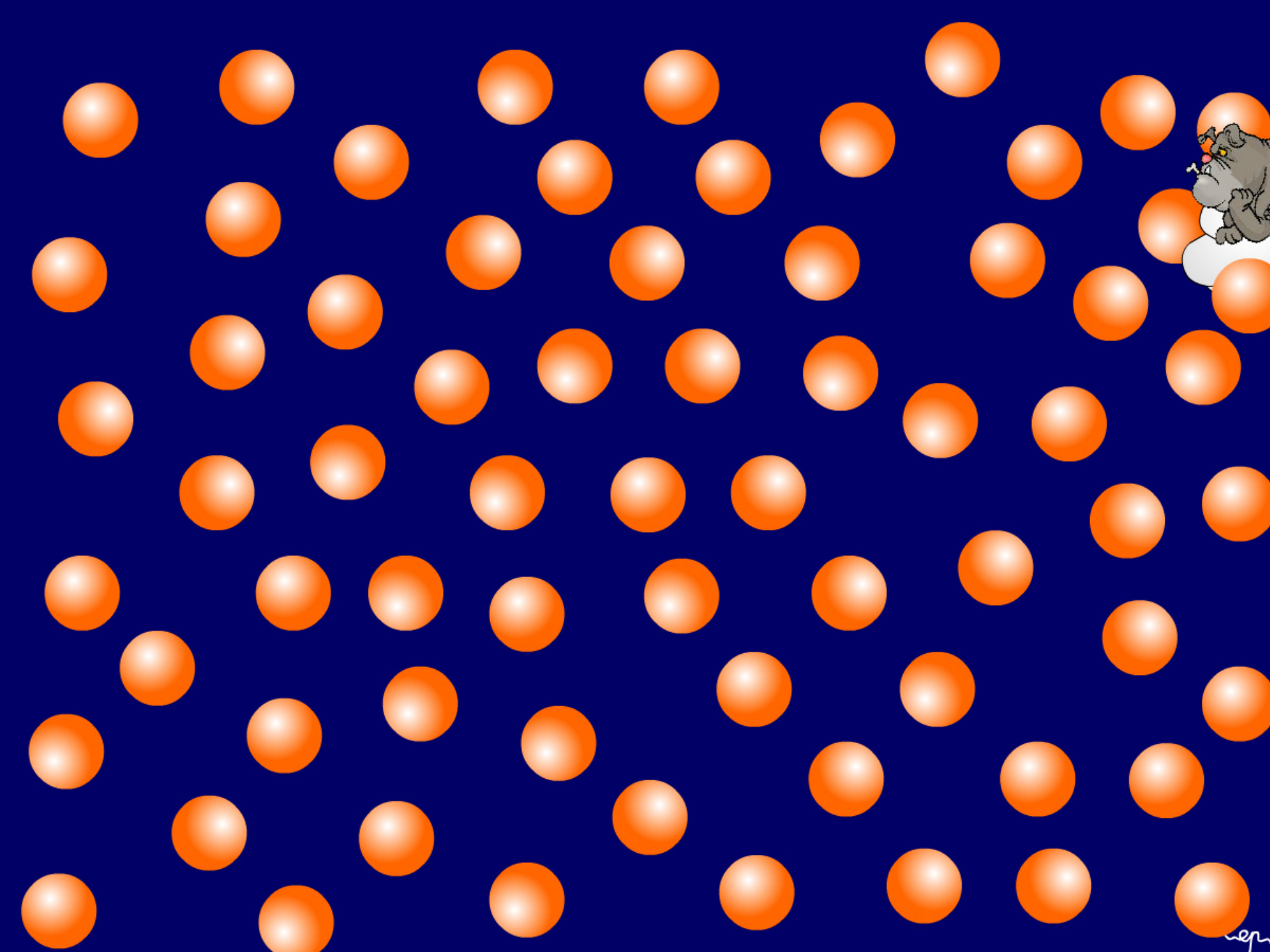


“El descubrimiento del bosón de Higgs constituye un ejemplo emblemático de cómo Europa ha liderado un esfuerzo colectivo para resolver uno de los enigmas más profundos de la Física”

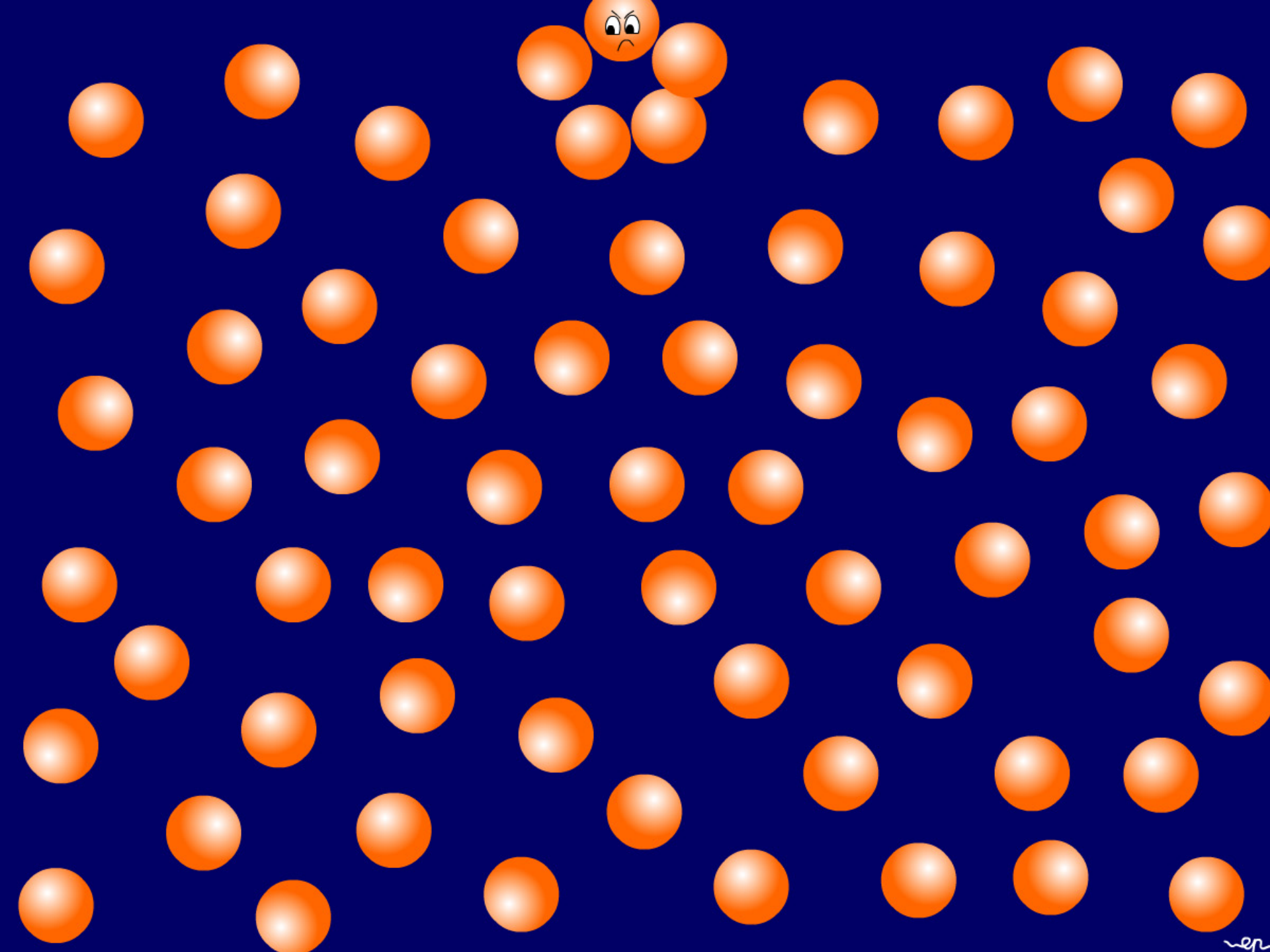


The Nobel Prize in Physics 2013: François Englert, Peter Higgs

“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”

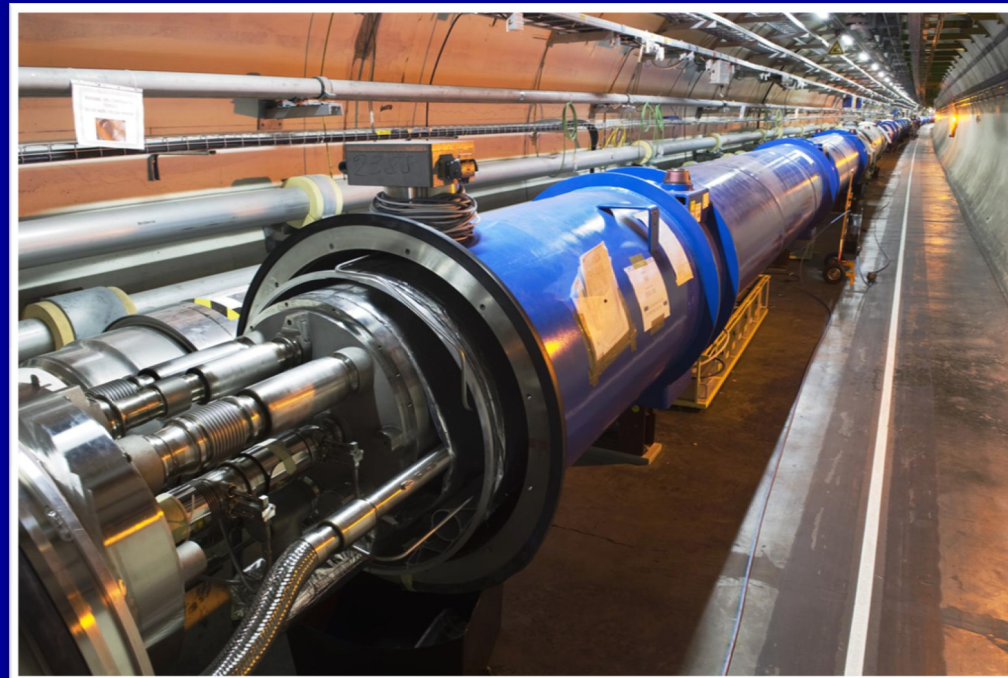






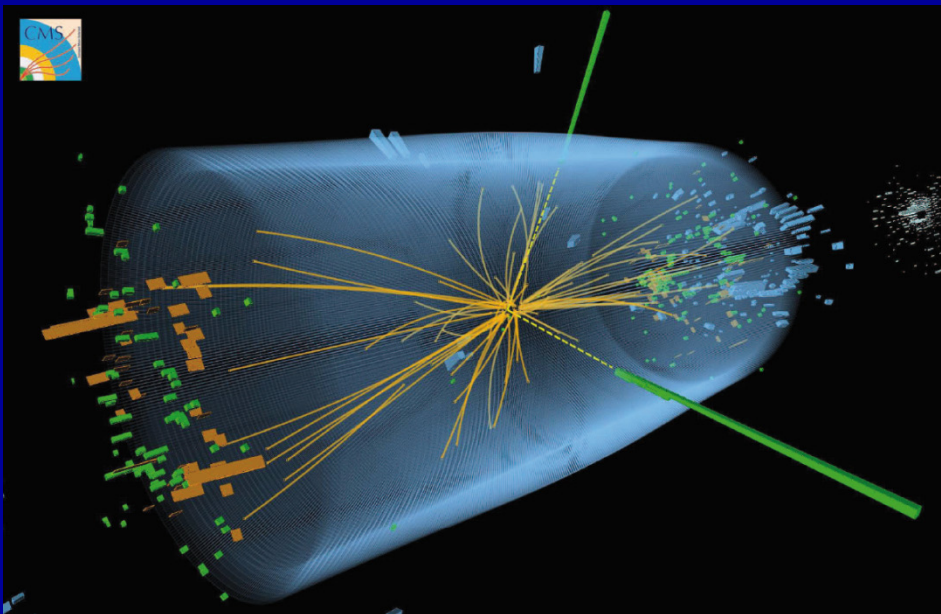
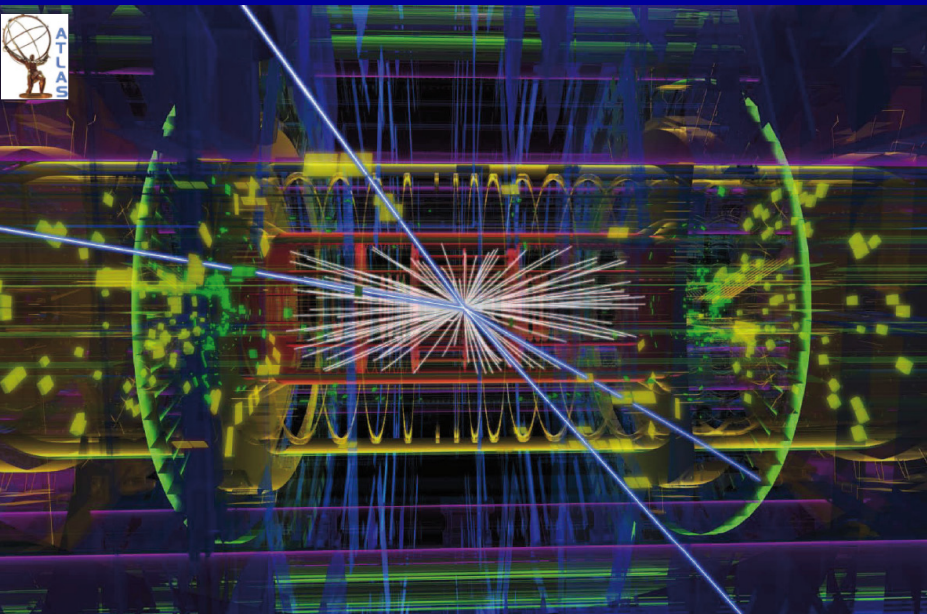
La Búsqueda del Bosón de Higgs

Gran Proyecto Internacional
20 años (diseño y construcción)



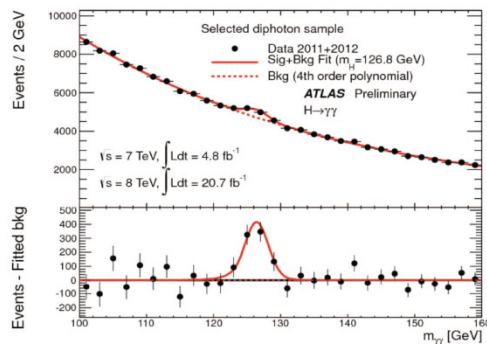
- 40.000 Tm a **-271 °C** (1,9 K) enfriadas con helio líquido
- Energía del haz \approx **60 Kg de TNT**
Un AVE a 200 Km/h
- Dos haces de protones (\varnothing 3 mm) acelerados a **6'5+6'5 TeV**
- Ultravacío: **10^{-16} atmósferas**

UN NUEVO CAMPO DE FUERZAS

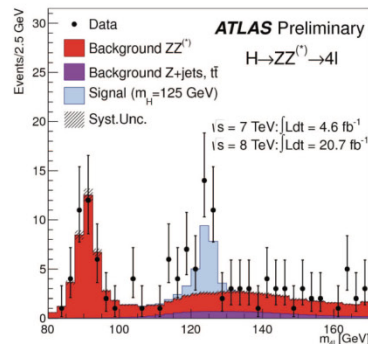


Un bosón con $M = 125$ GeV and $J = 0$

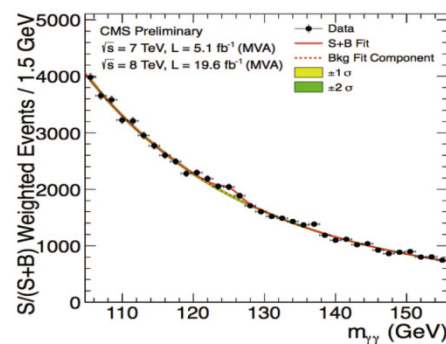
$H \rightarrow \gamma\gamma$



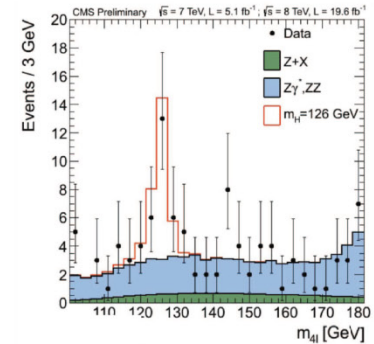
$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$



$H \rightarrow \gamma\gamma$



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



CAMPO DE FUERZAS SIN ESPÍN

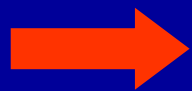
$$J = 0$$

El campo de Higgs no es polarizable

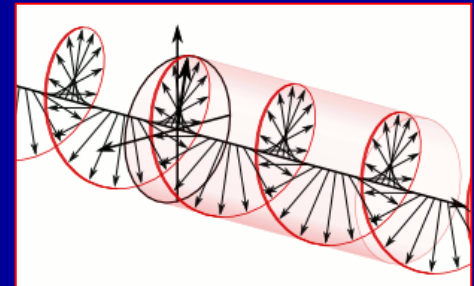
Números cuánticos del vacío



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

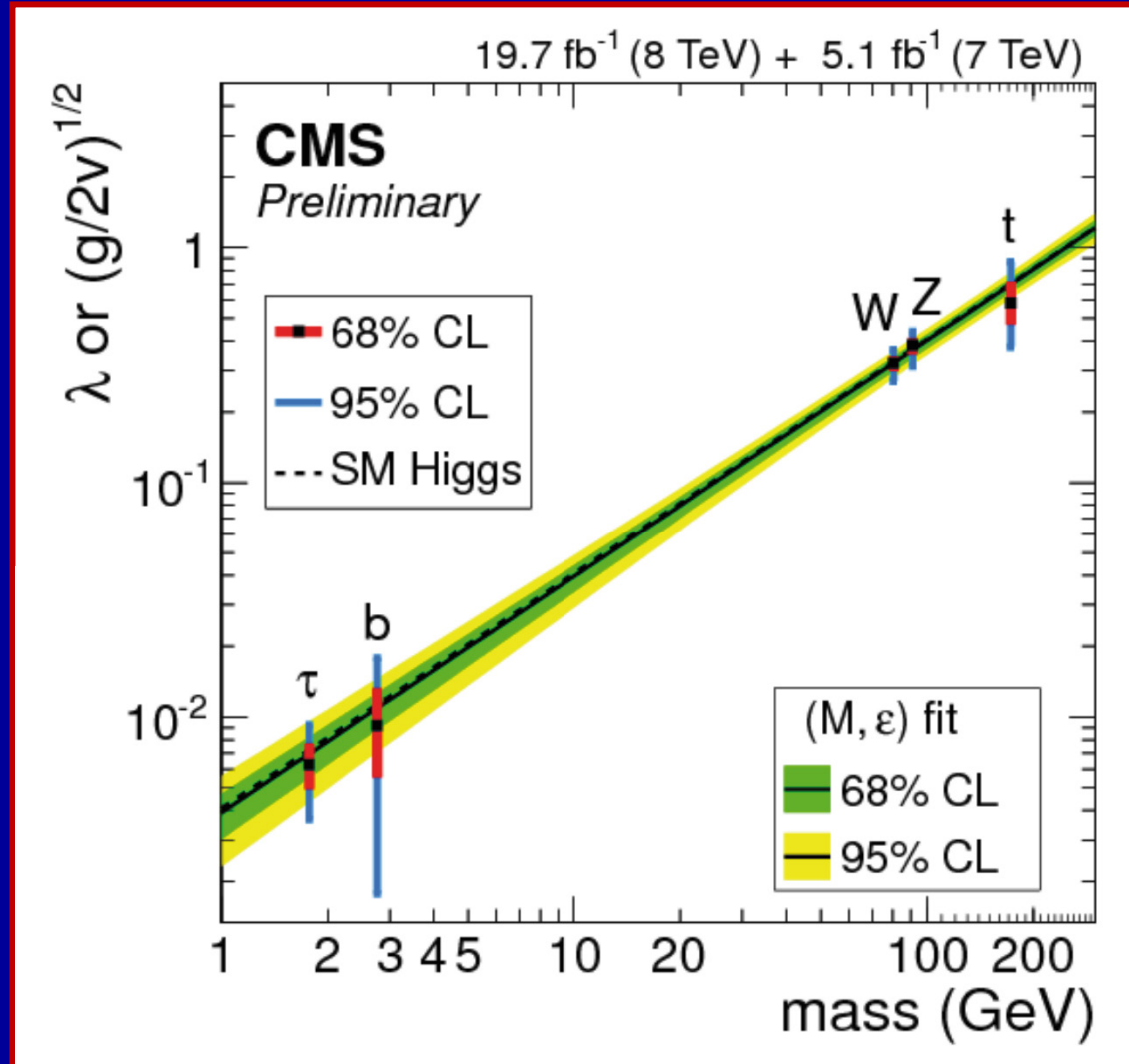
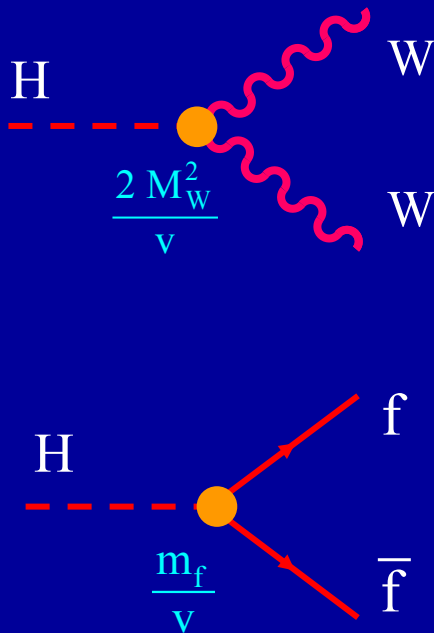


tienen polarización

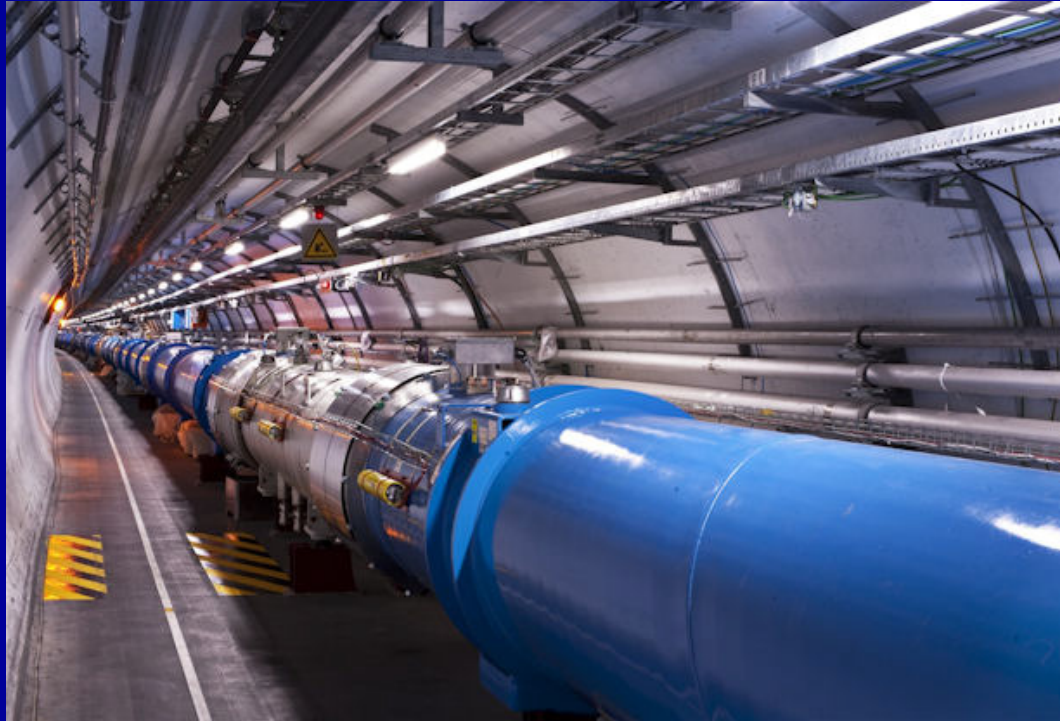


Es un campo de Higgs

Interacción
proporcional
a la masa



Y DESPUES DEL HIGGS ...

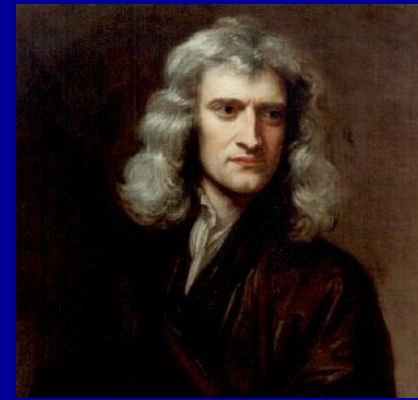


**El LHC está ahora funcionando con
más energía (6'5 + 6'5 TeV) e intensidad**

Campo Gravitatorio

Siglo XVII

Isaac Newton



Electromagnetismo

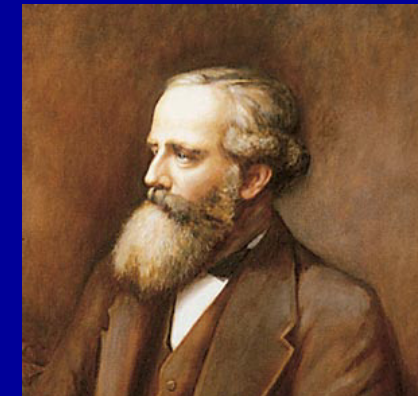
Siglo XIX

“But, after all, what use is it?”

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

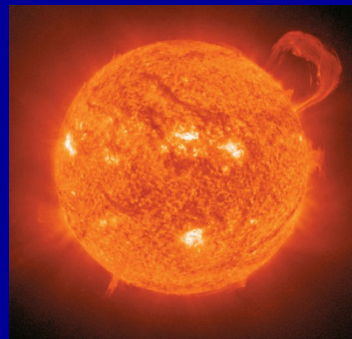
Michael Faraday

James Clerk Maxwell



Siglo XX

Interacciones Fuerte y Débil



El Modelo Estándar

A. Pich, 2016

¿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

$Q = 2/3$

$Q = -1/3$

0.003



arriba (u)

0.005



abajo (d)

1.3



encanto (c)

0.1



extraño (s)

173



verdad (t)

4.2



belleza (b)

Leptones

$Q = 0$

$Q = -1$

< 0.000002



neutrino e (ν_e)

0.0005



electrón (e)

< 0.000002



neutrino μ (ν_μ)

0.105



muón (μ)

< 0.000002



neutrino τ (ν_τ)

1.777



tau (τ)

Bosones

0



fotón

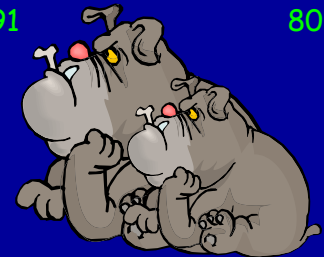
$J = 1$

0



gluones

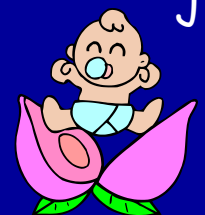
91



Z^0 W^\pm

80

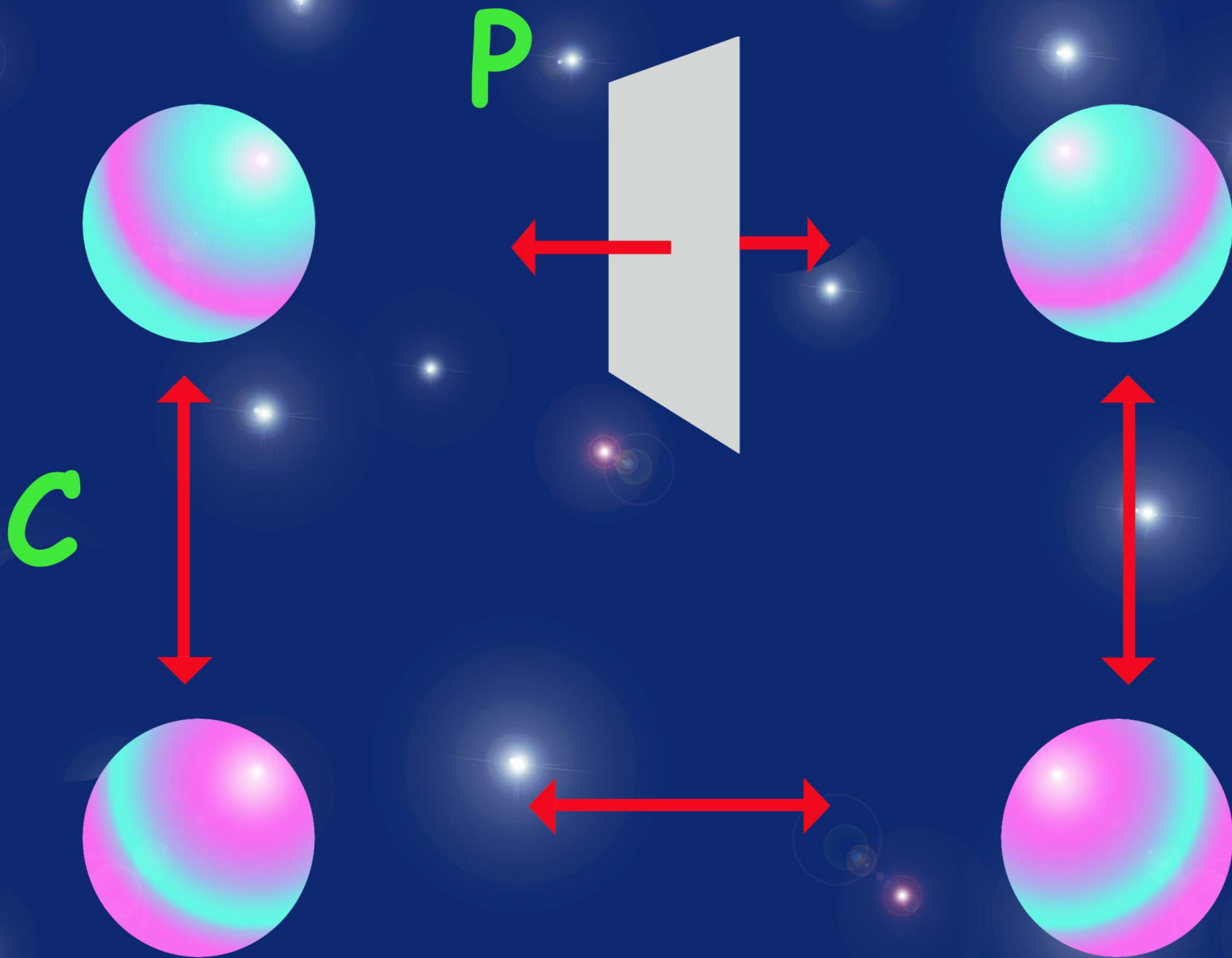
125



Higgs

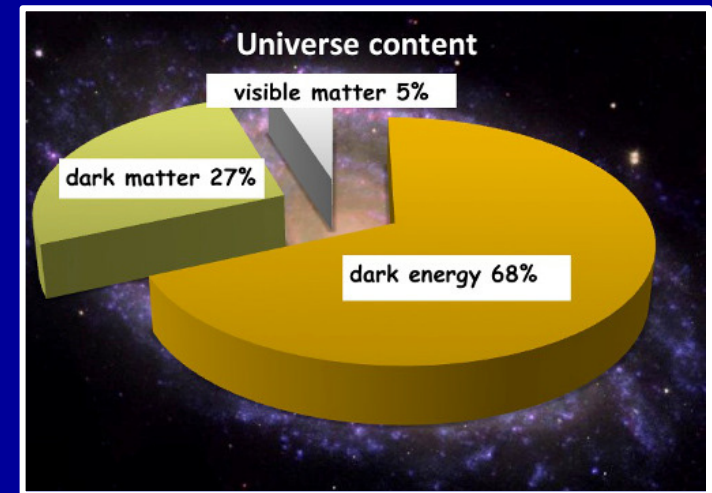
$J = 0$

neq





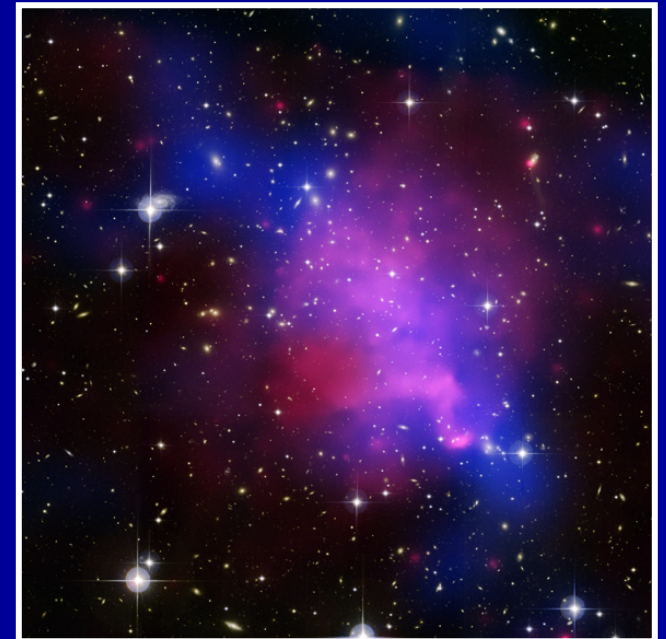
MATERIA OSCURA



**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?

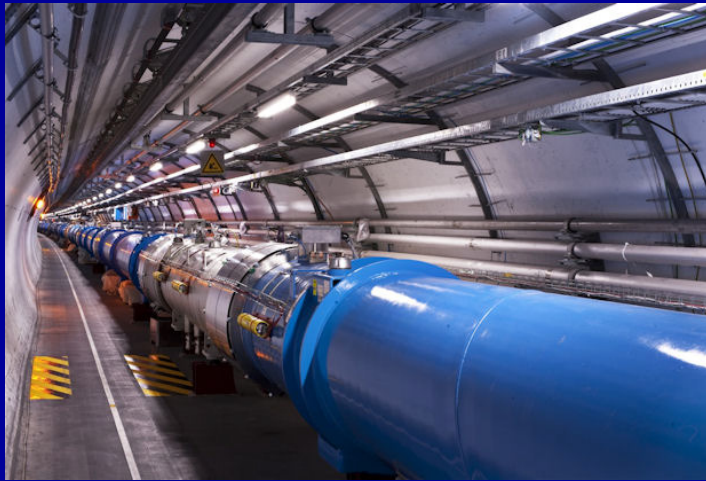
**El campo de Higgs podría ser
una puerta al mundo oscuro**



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.

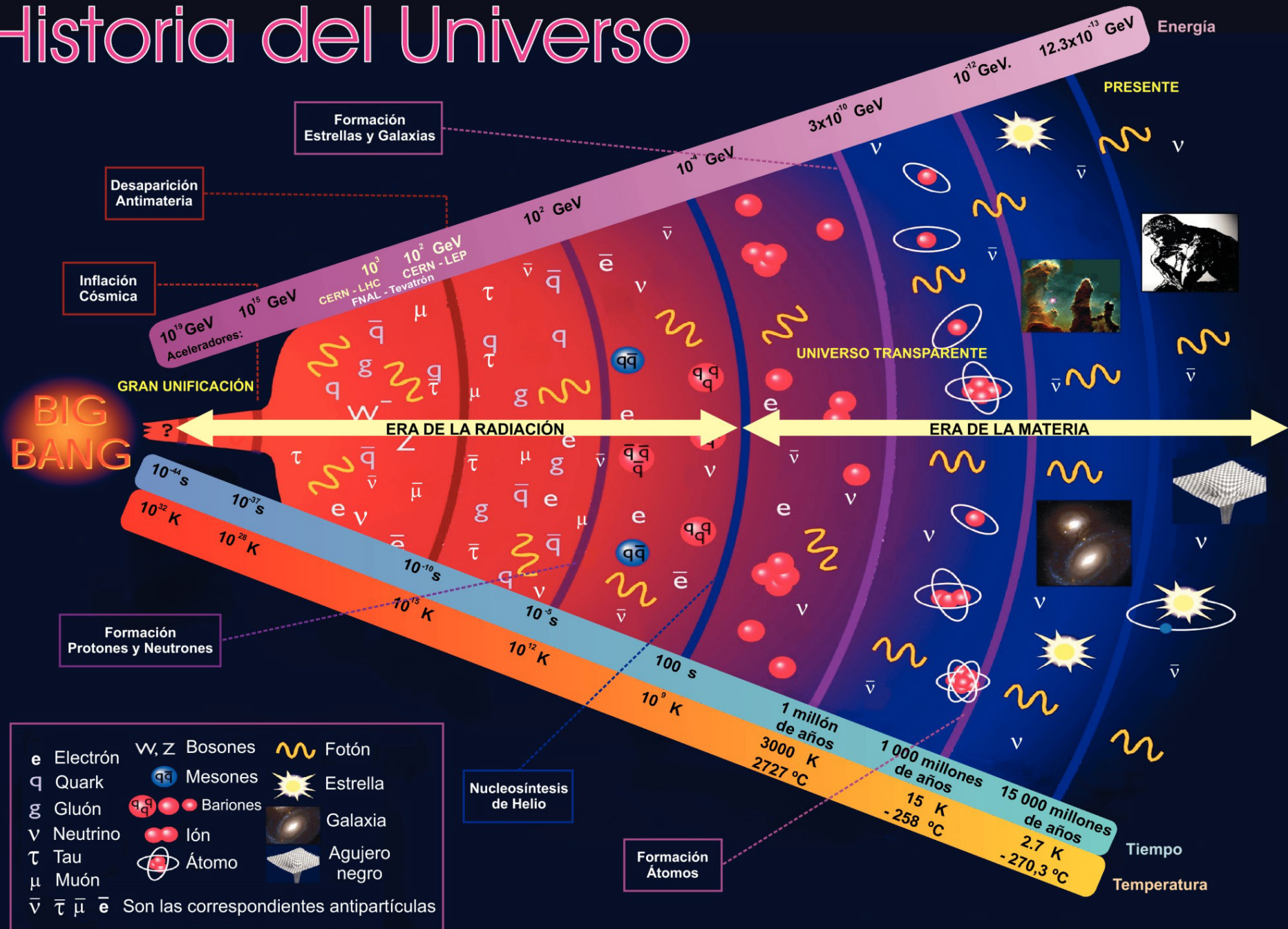




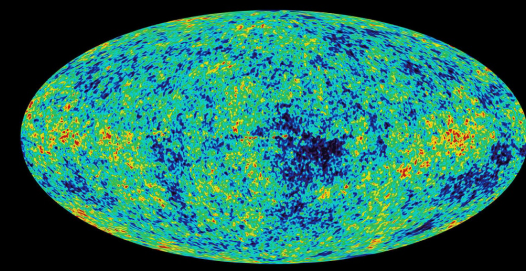
Datos Curiosos del LHC

- ❑ El mayor refrigerador del mundo ($-273\text{ °C} = 1,9\text{ K}$)
Más frío que el espacio exterior extra-galáctico ($2,7\text{ K}$)
- ❑ 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 ($\varnothing\ 0,006\text{ mm}$)
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 (0.9999999991 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

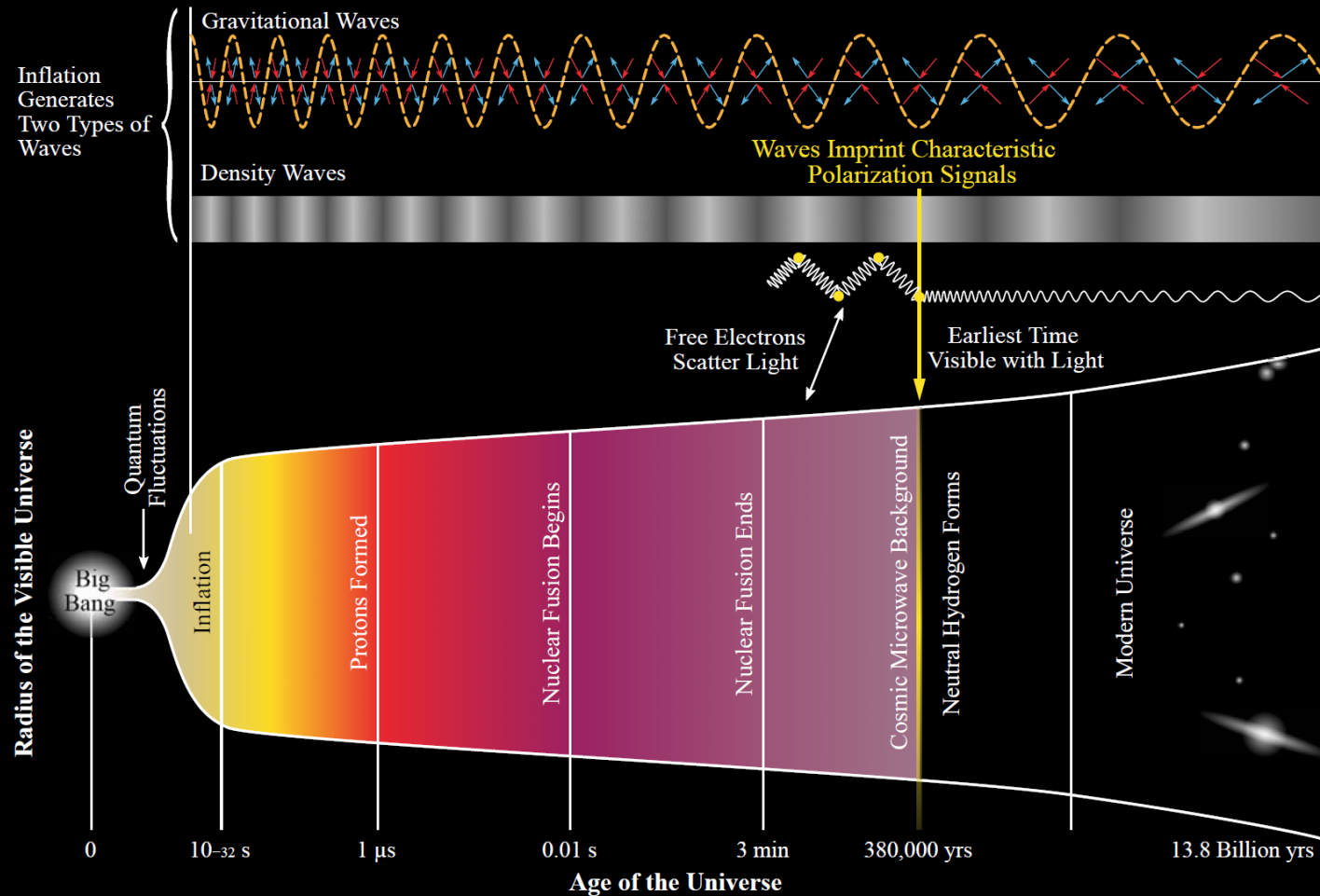
Historia del Universo



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



- ¿Polvo galáctico polarizado? (PLANCK, 2015)



Inflación Cósmica



¿Inflatón?

(otro campo sin espín!)

PLASMA DE QUARKS Y GLUONES

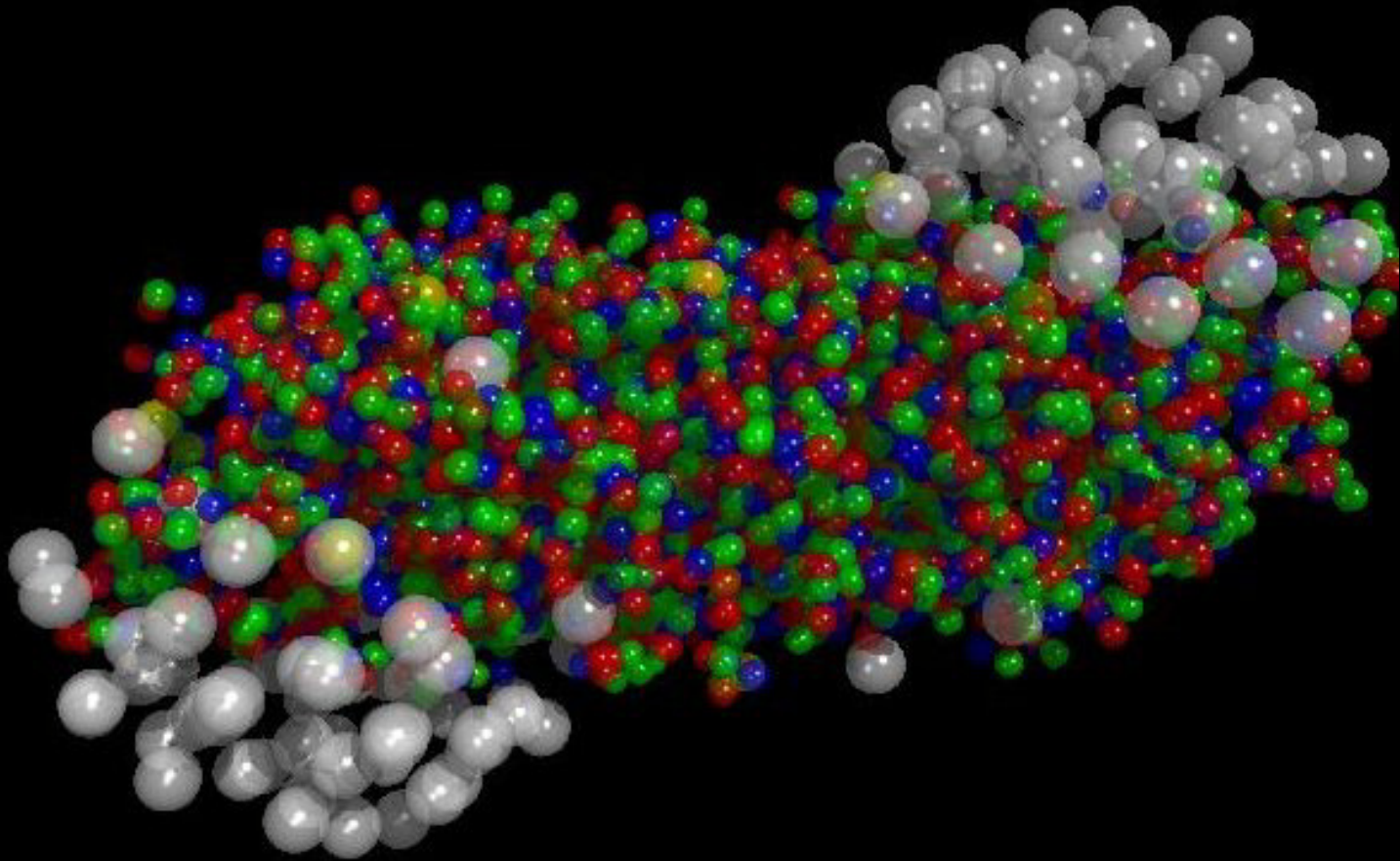
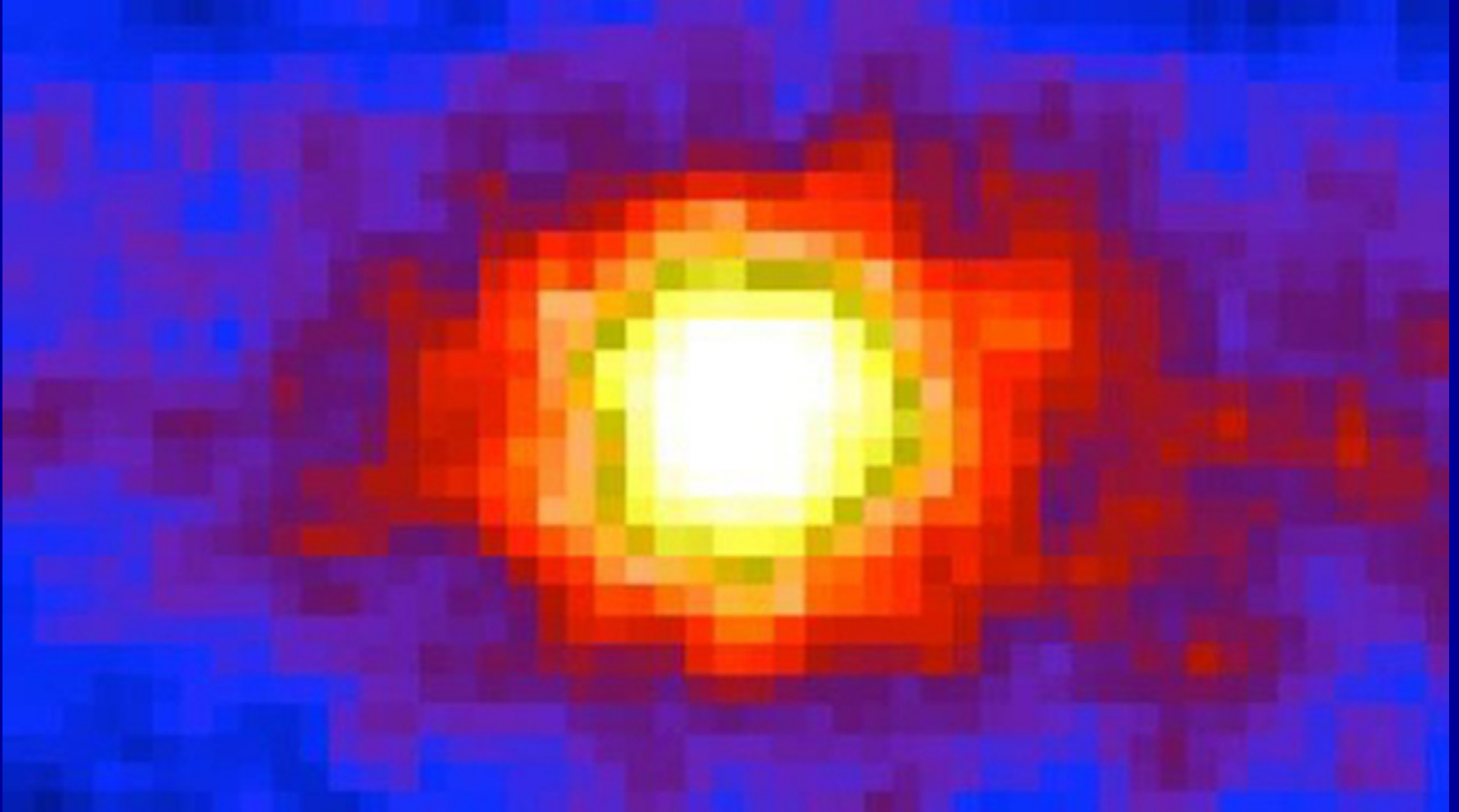


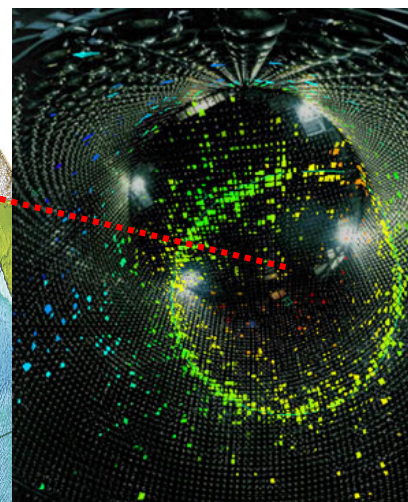
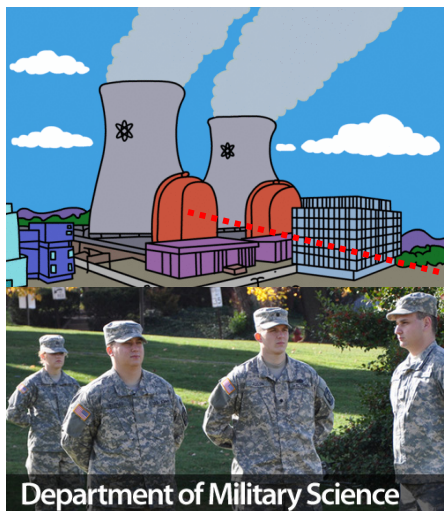
Imagen del Sol con neutrinos (Super-Kamiokande)





Proliferación Nuclear

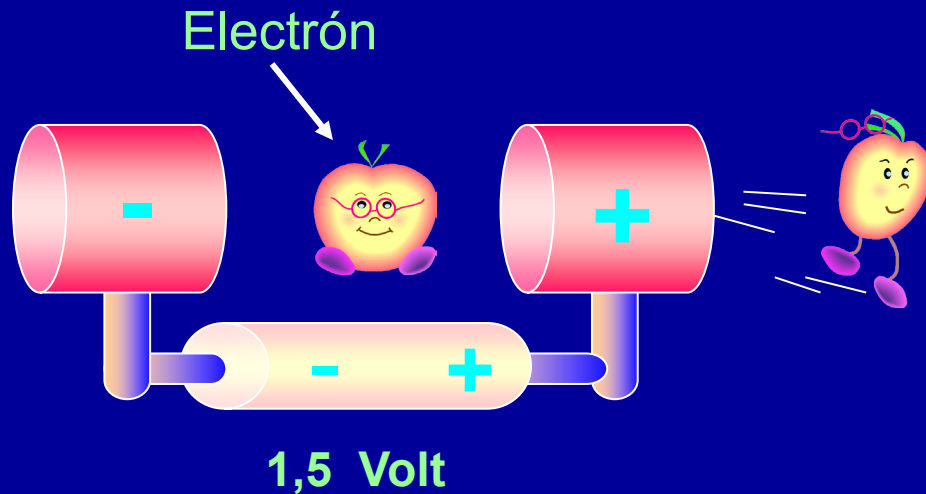
Control a distancia



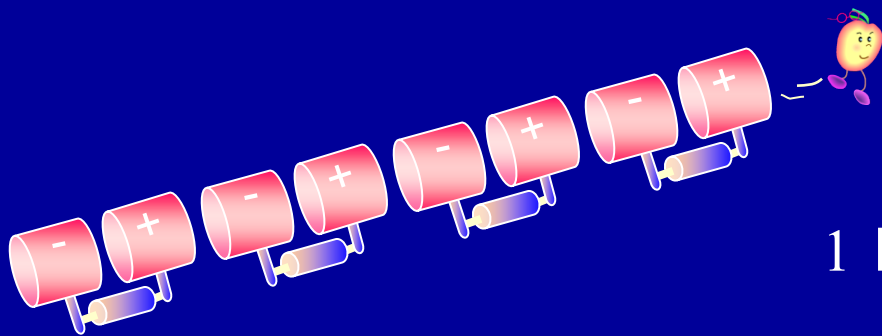
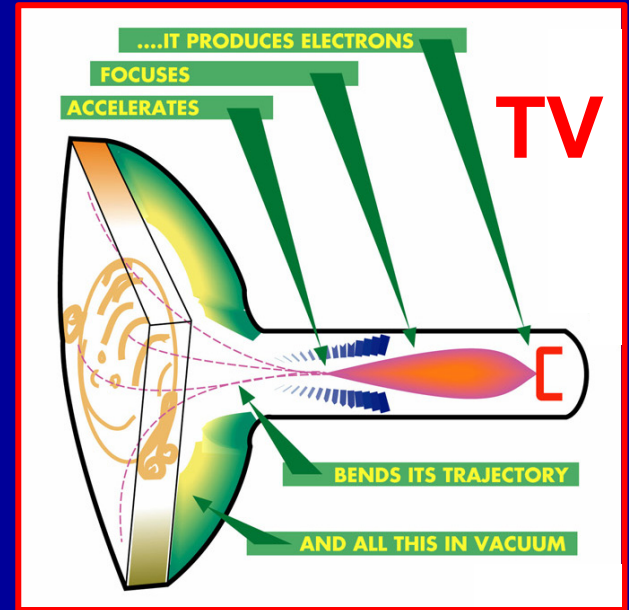
ν Detector



Aceleradores de Partículas



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

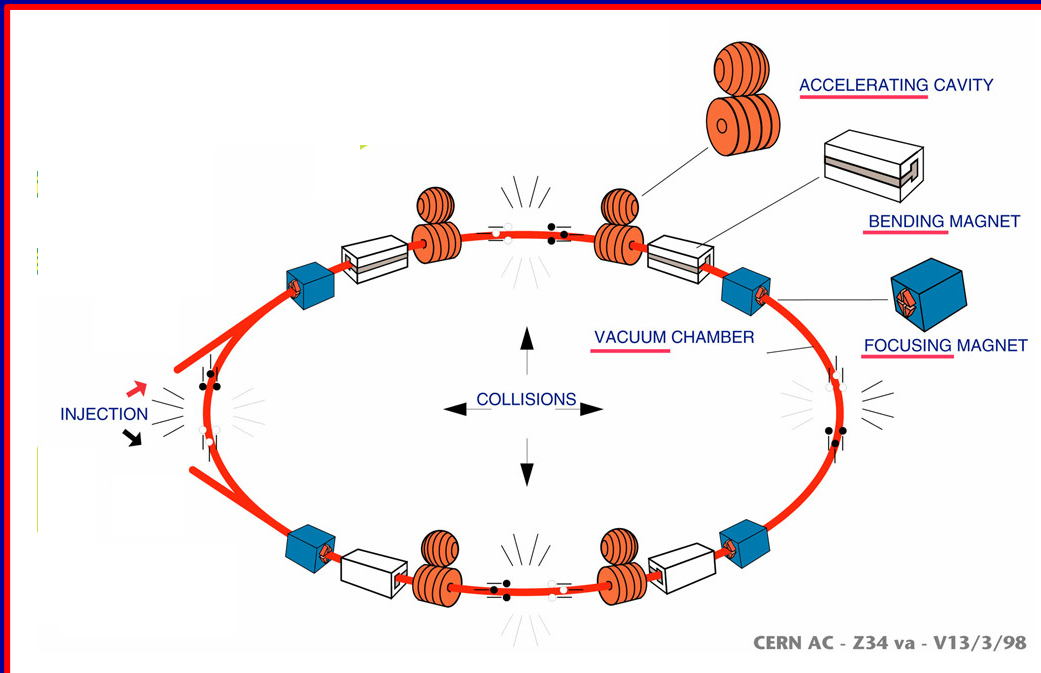
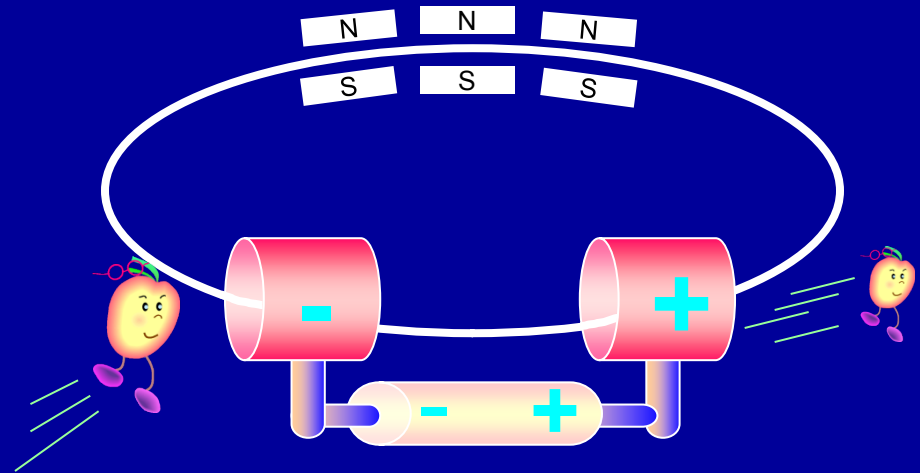
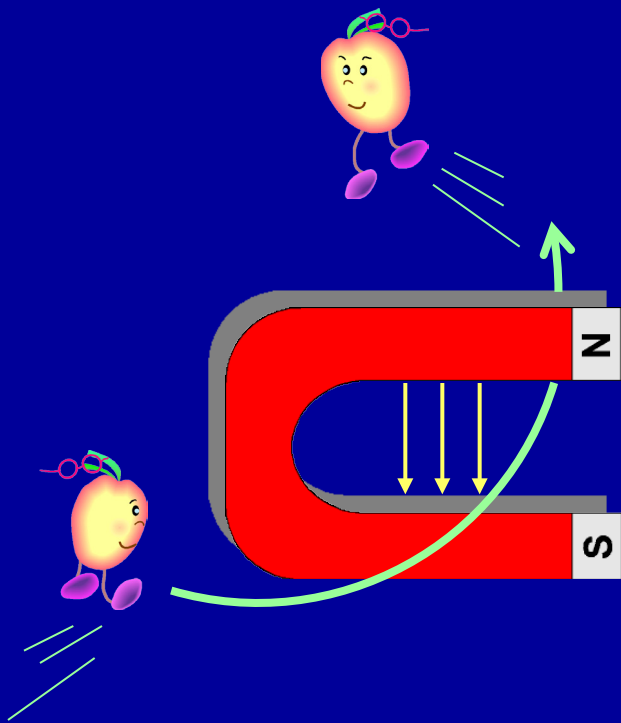


$$\sim 5 \text{ MeV / m}$$

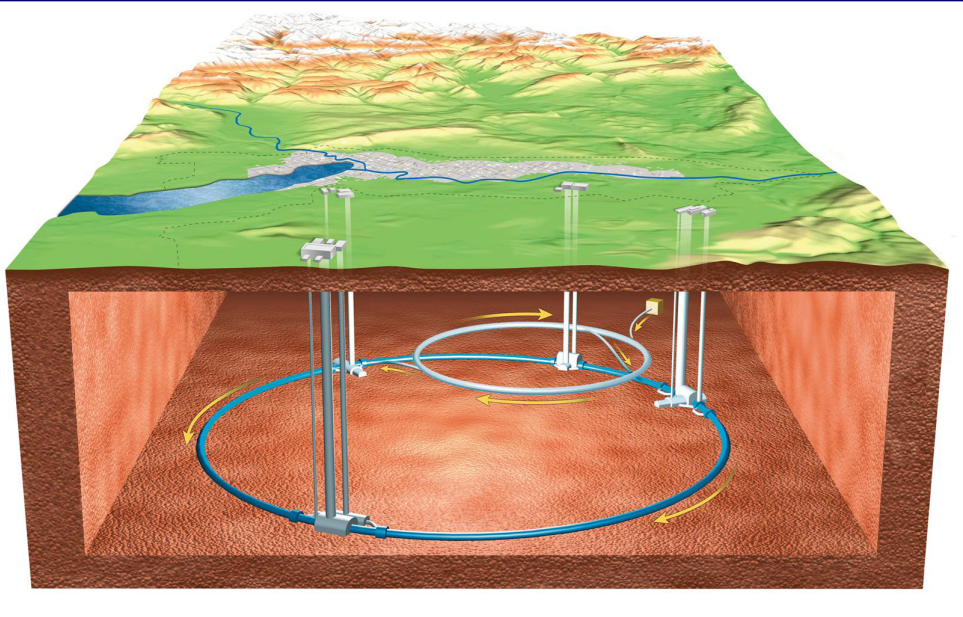
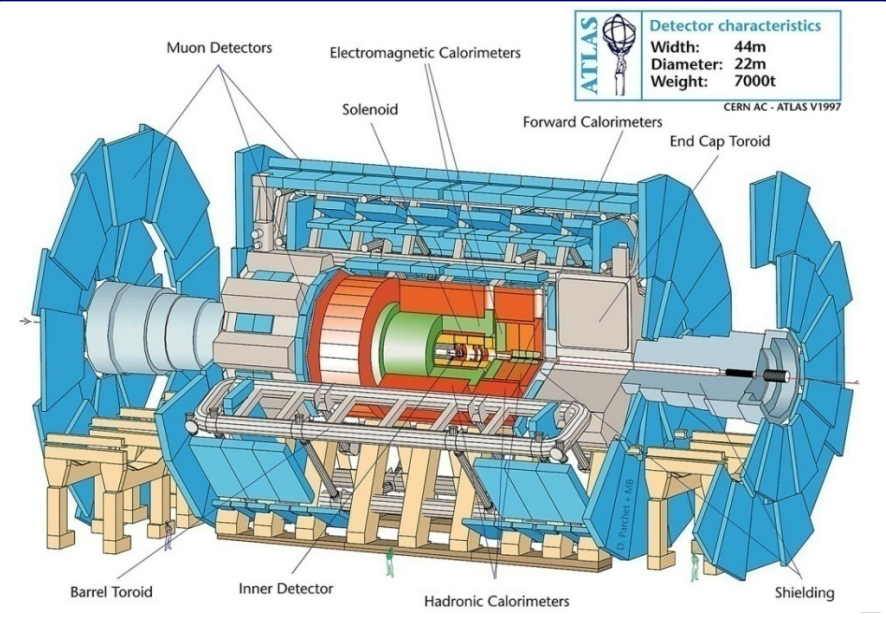
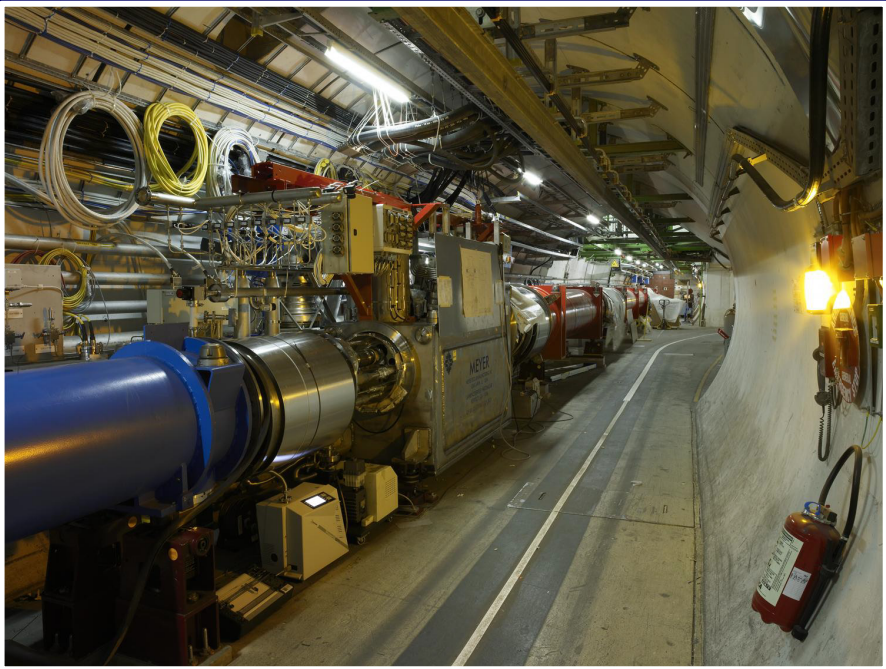
$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} = 1.000.000 \text{ eV}$$

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

Acelerador Circular

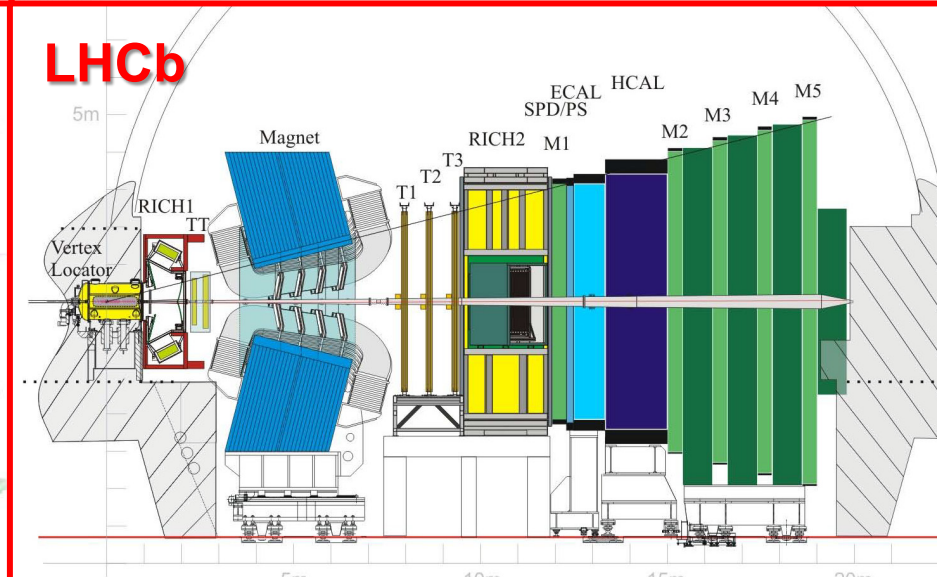
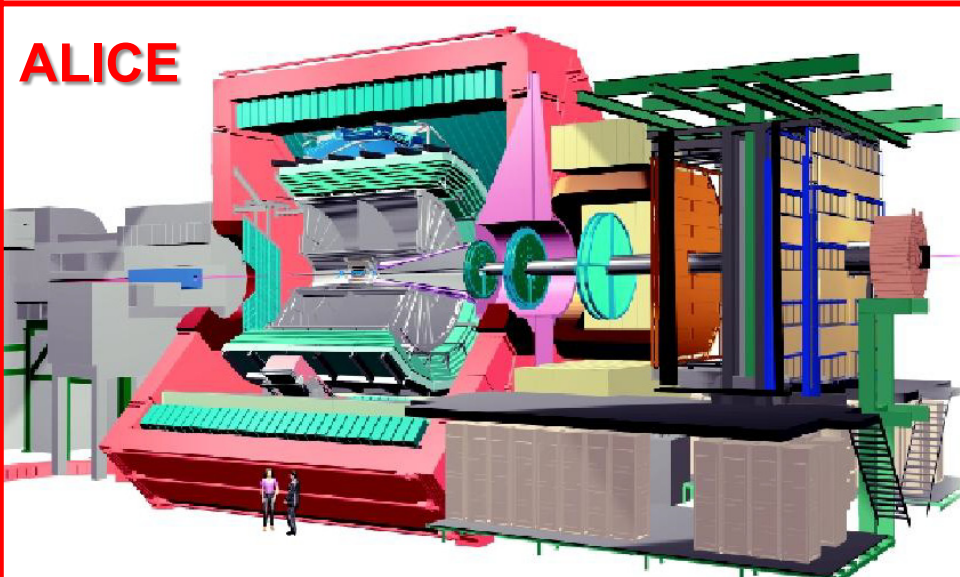
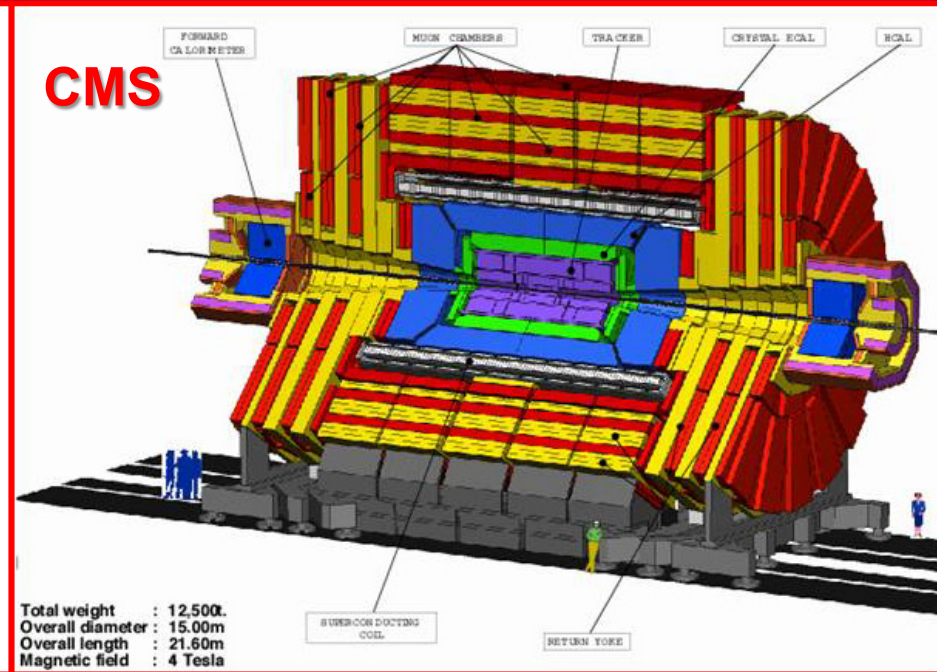
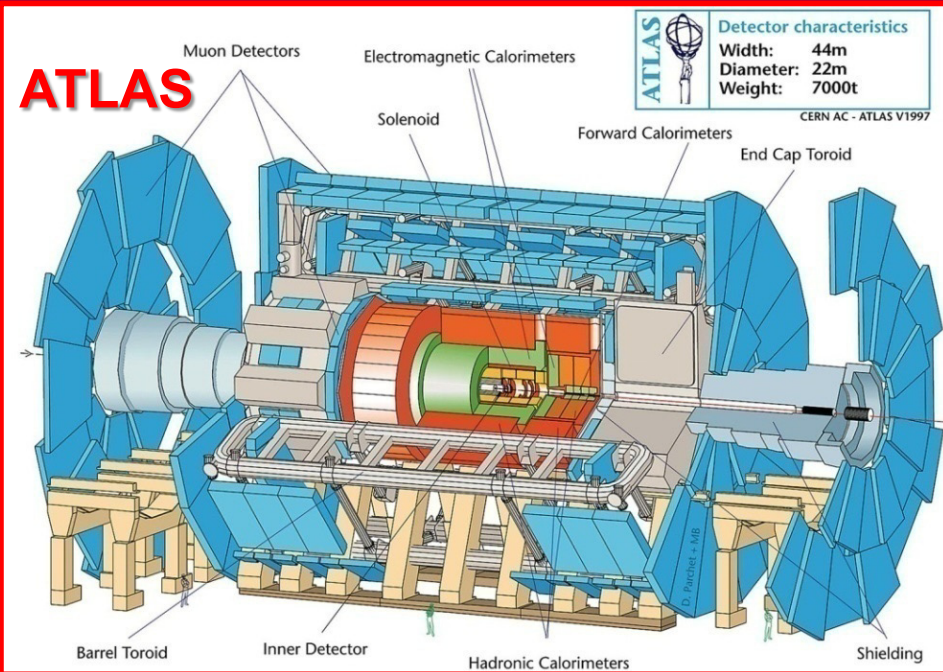


Colisionador

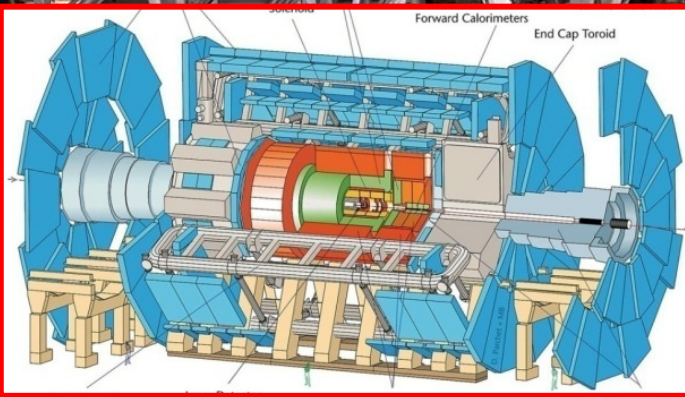
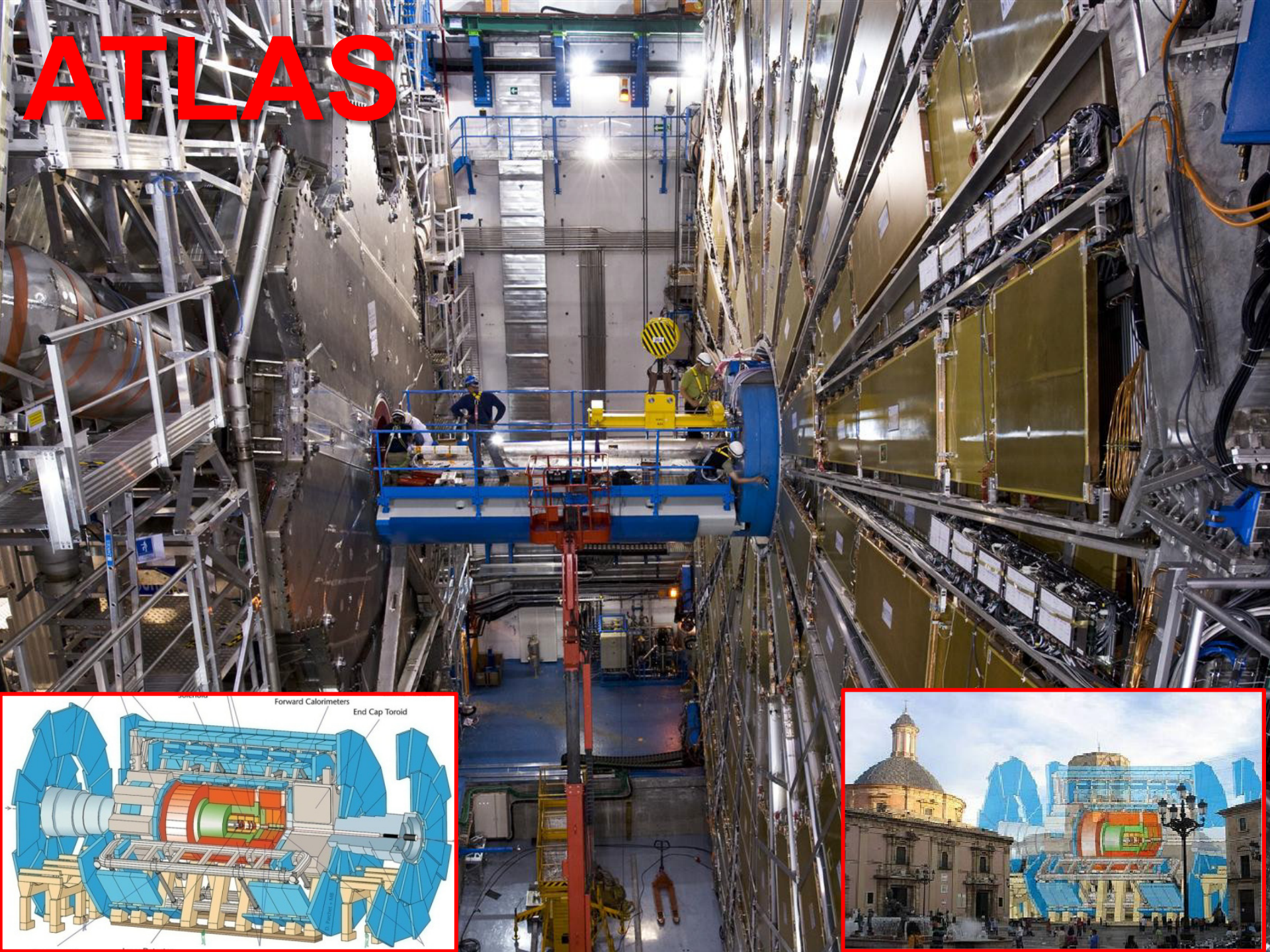


DETECTORES

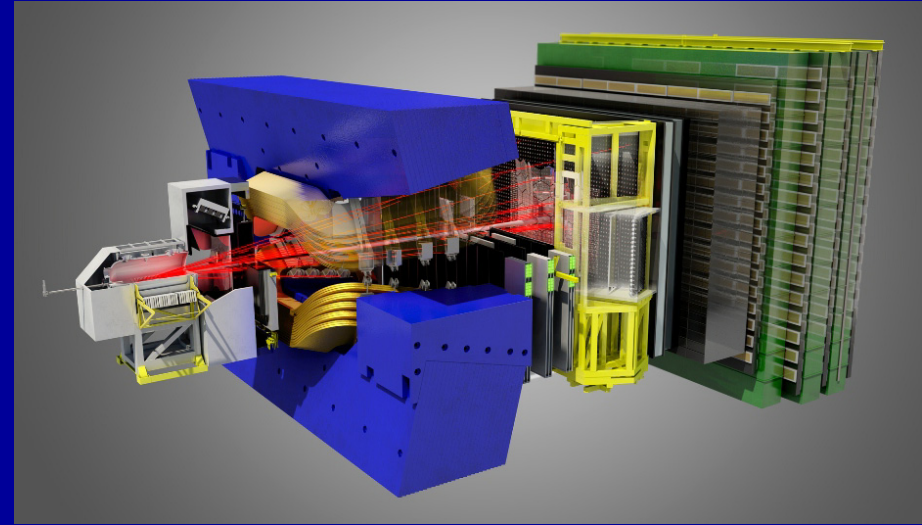
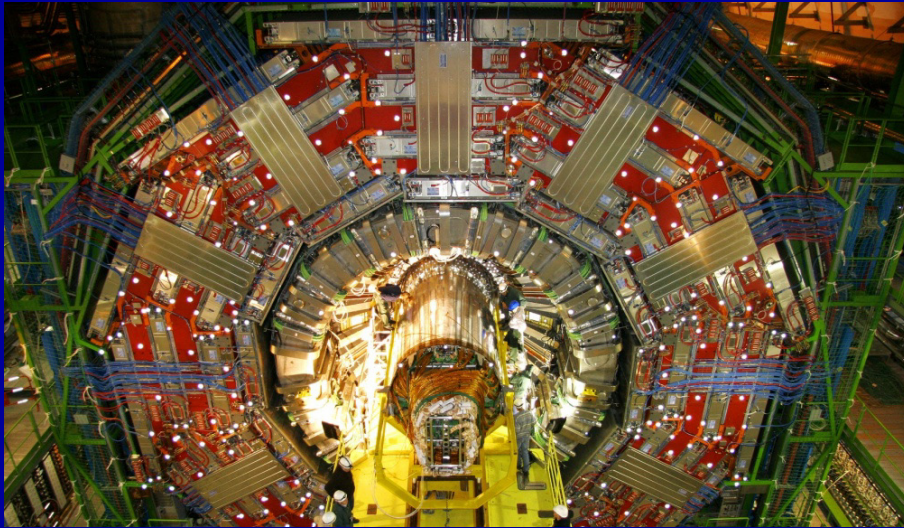
800 millones de colisiones por segundo



ATLAS



Contribución Española al LHC

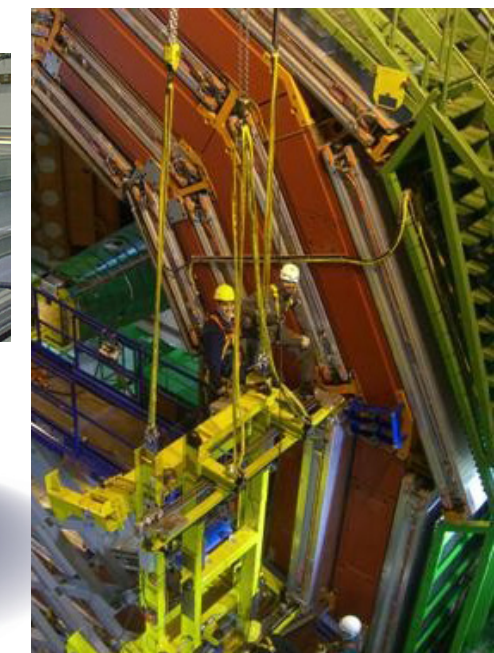
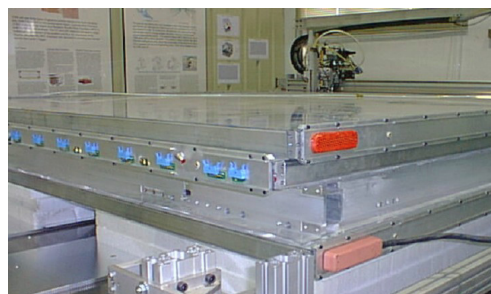
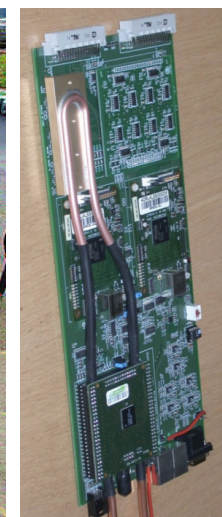
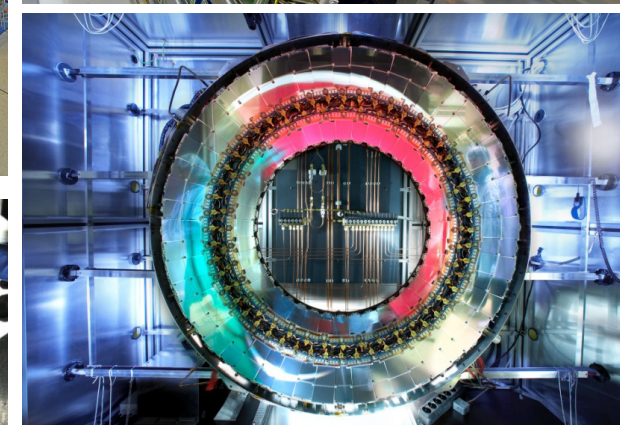
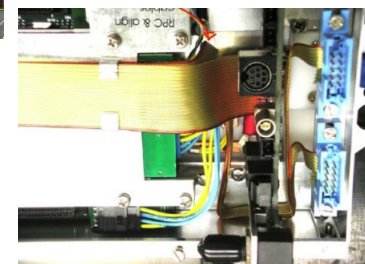
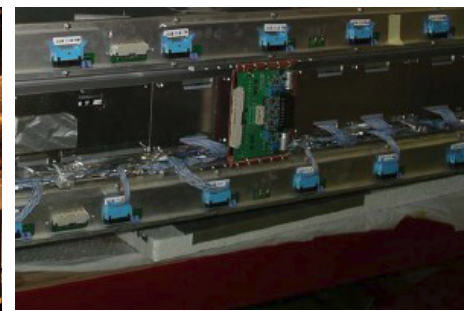
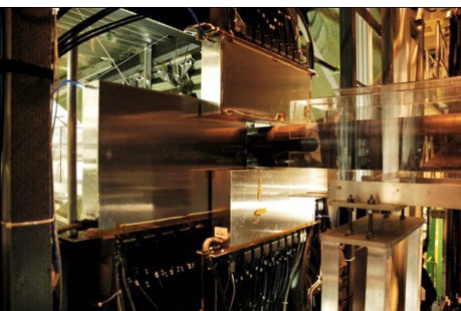
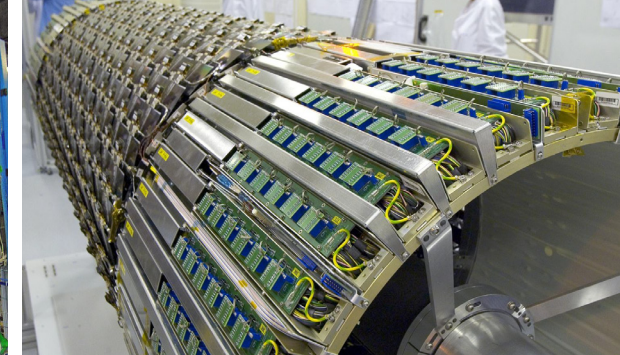
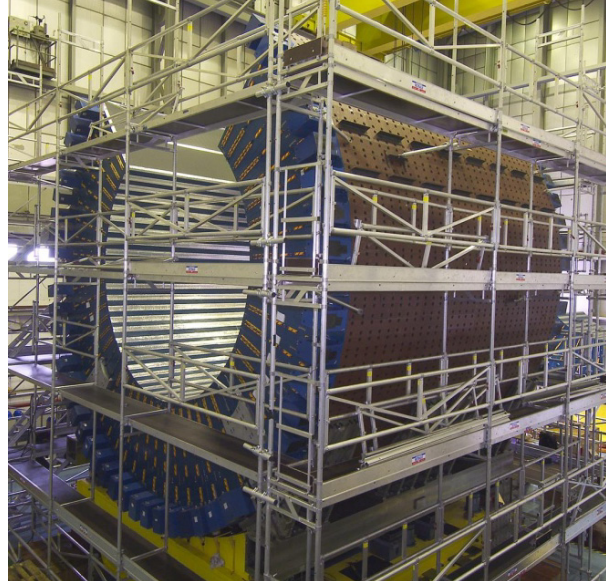


- ATLAS: IFAE, IMB (Barcelona), IFIC (Valencia), UAM (Madrid)
- CMS: CIEMAT, UAM (Madrid), IFCA (Santander), UO (Oviedo)
- LHCb: UB, URL (Barcelona), IGFAE (Santiago), IFIC (Valencia)
- ALICE: CIEMAT (Madrid), IGFAE (Santiago)
- Física Teórica: IFAE, IFIC, IFT, IGFAE, UAB, UB, UCM, UGr, UZ

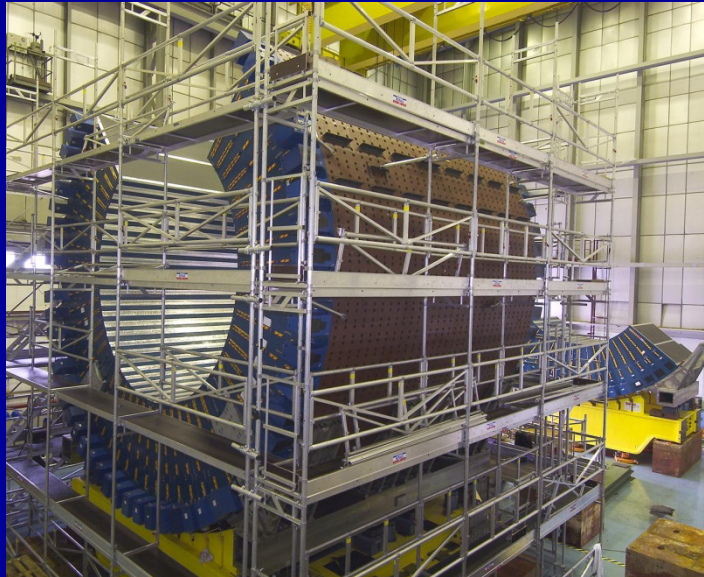
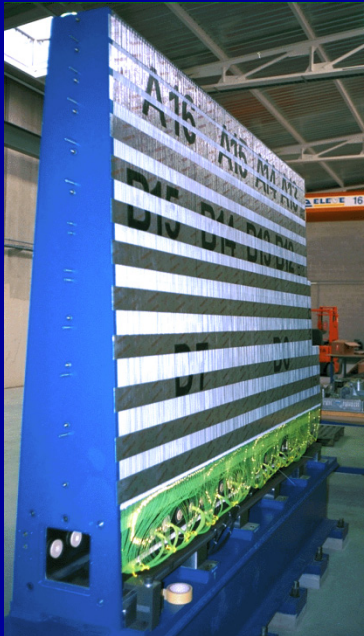
Coordinación:
(IFIC, Valencia)

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

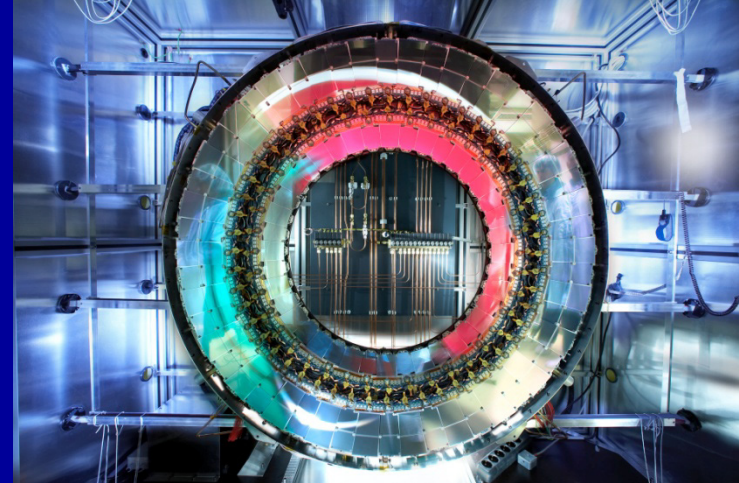




ATLAS @ IFIC



Tile Calorimeter



Silicon Tracker



El Modelo Estándar

GRID

