

# En el interior de protones y neutrones

## La interacción fuerte

Carlos Pena



# Plan

---

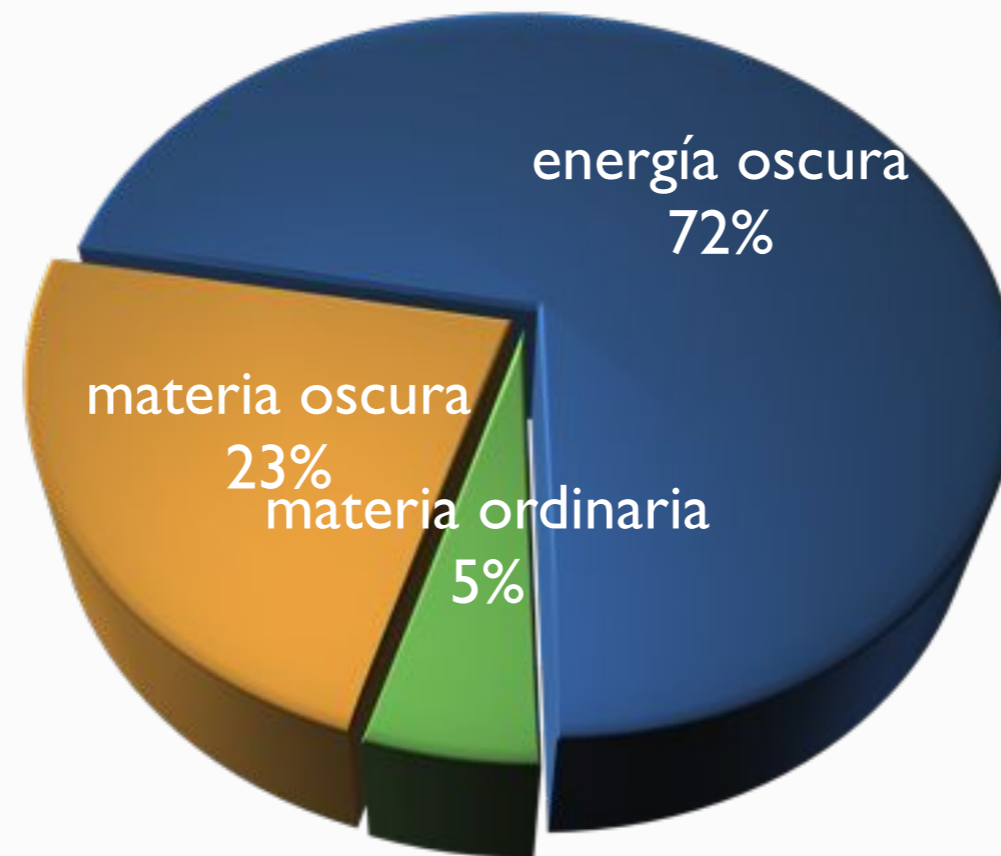
- La composición del Universo.
  - Materia ordinaria y componentes oscuros.
  - El interior del núcleo atómico: nucleones y quarks.
  - ¿Cuál es el origen de la masa?
  
- Cromodinámica cuántica.
  - Libertad asintótica y confinamiento.
  - Alta energía: el régimen perturbativo.
  - Baja energía: el régimen no perturbativo.
  
- La interacción fuerte en la Física de Altas Energías de nuestros días.
  - Temperatura y densidad altísimas: ¿plasma de quarks y gluones?
  - La interacción fuerte en LHC.

# Plan

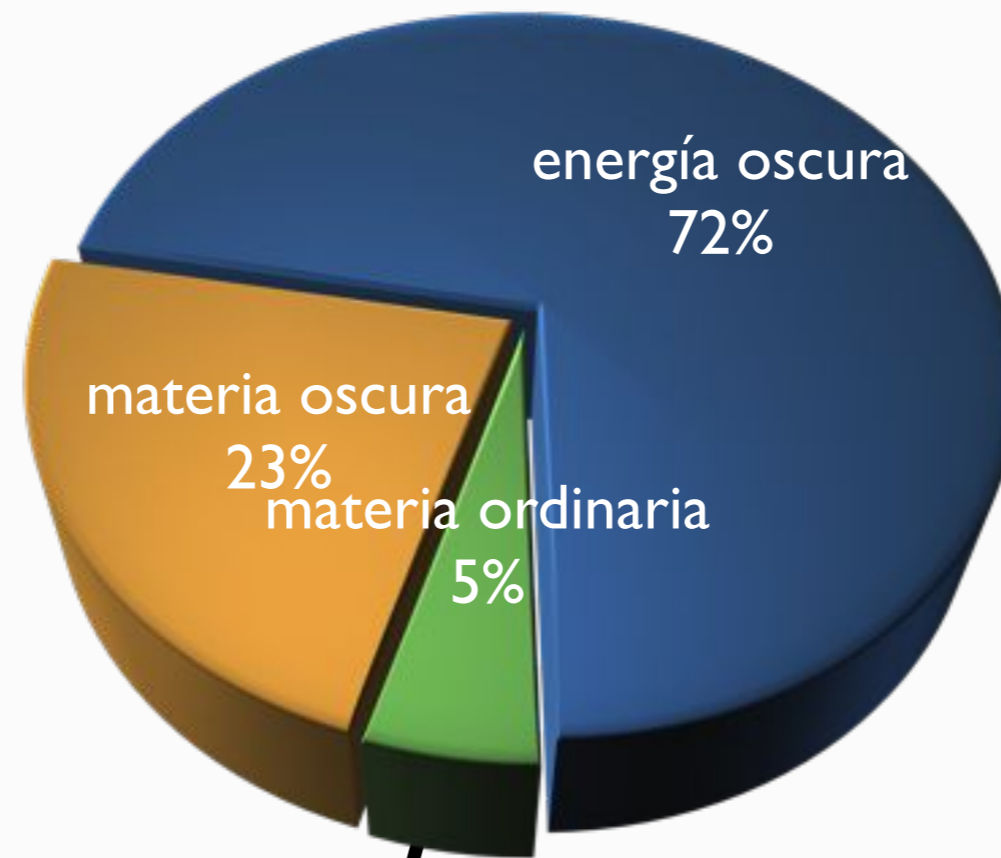
---

- La composición del Universo.
  - Materia ordinaria y componentes oscuros.
  - El interior del núcleo atómico: nucleones y quarks.
  - ¿Cuál es el origen de la masa?
- Cromodinámica cuántica.
  - Libertad asintótica y confinamiento.
  - Alta energía: el régimen perturbativo.
  - Baja energía: el régimen no perturbativo.
- La interacción fuerte en la Física de Altas Energías de nuestros días.
  - Temperatura y densidad altísimas: ¿plasma de quarks y gluones?
  - La interacción fuerte en LHC.

# Los componentes del Universo



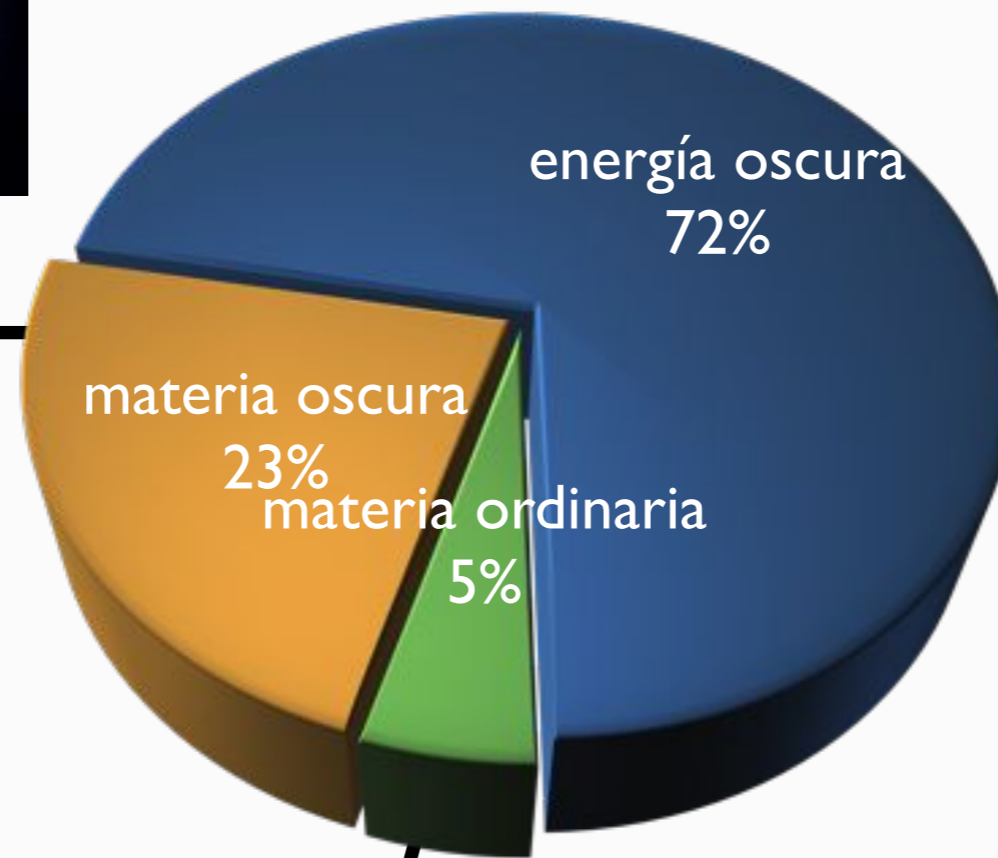
# Los componentes del Universo



# Los componentes del Universo



¿?

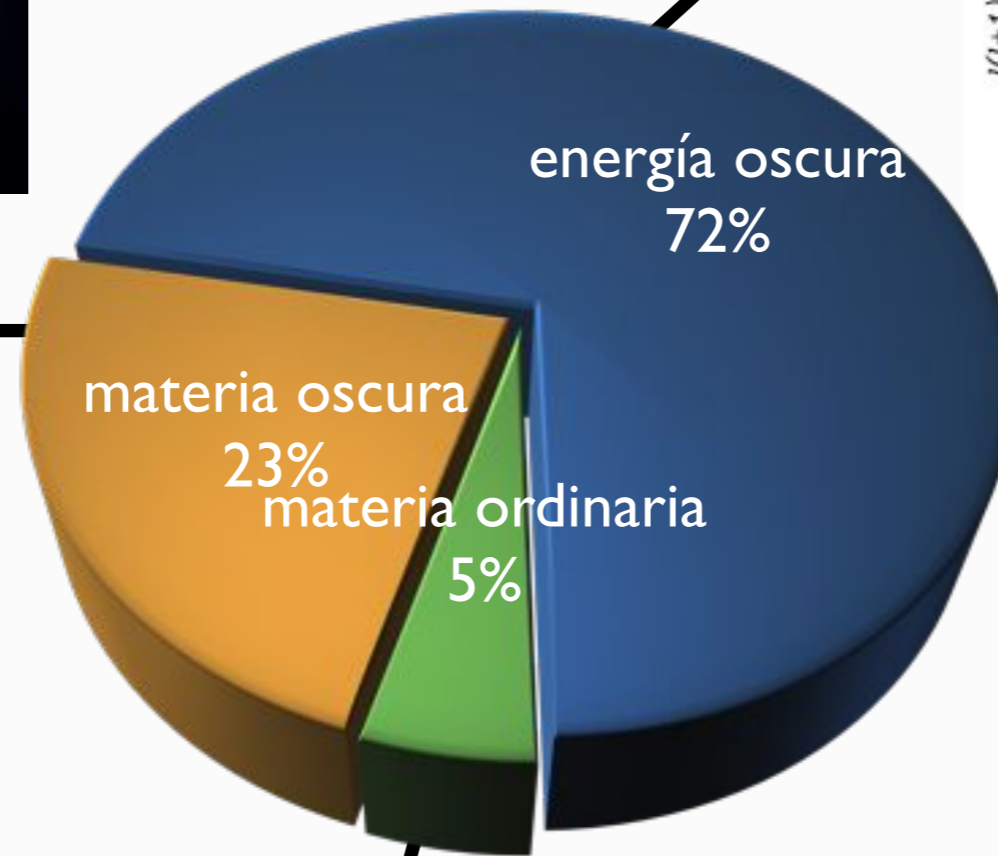
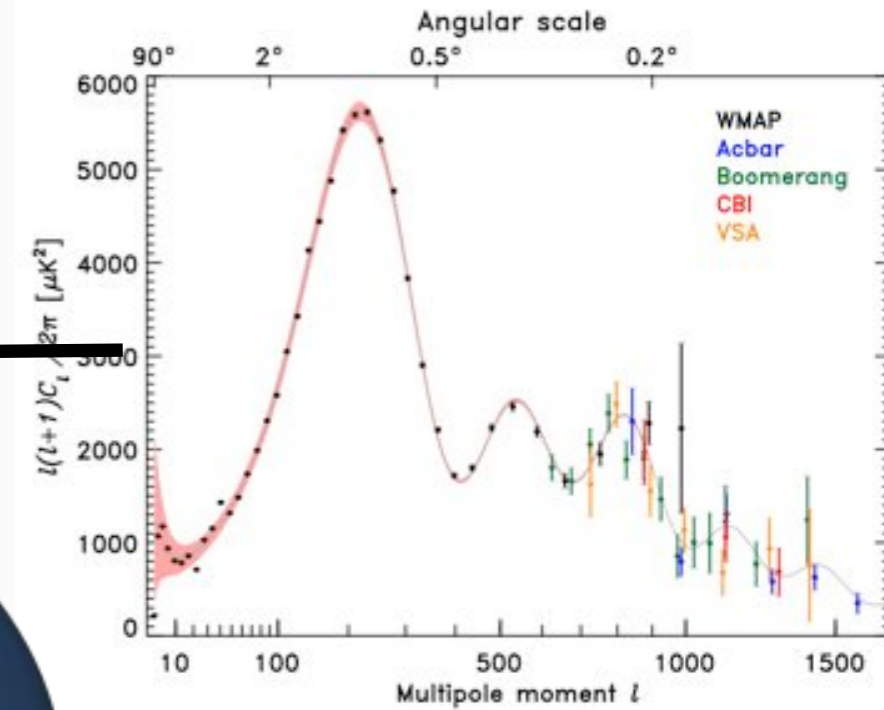




# Los componentes del Universo



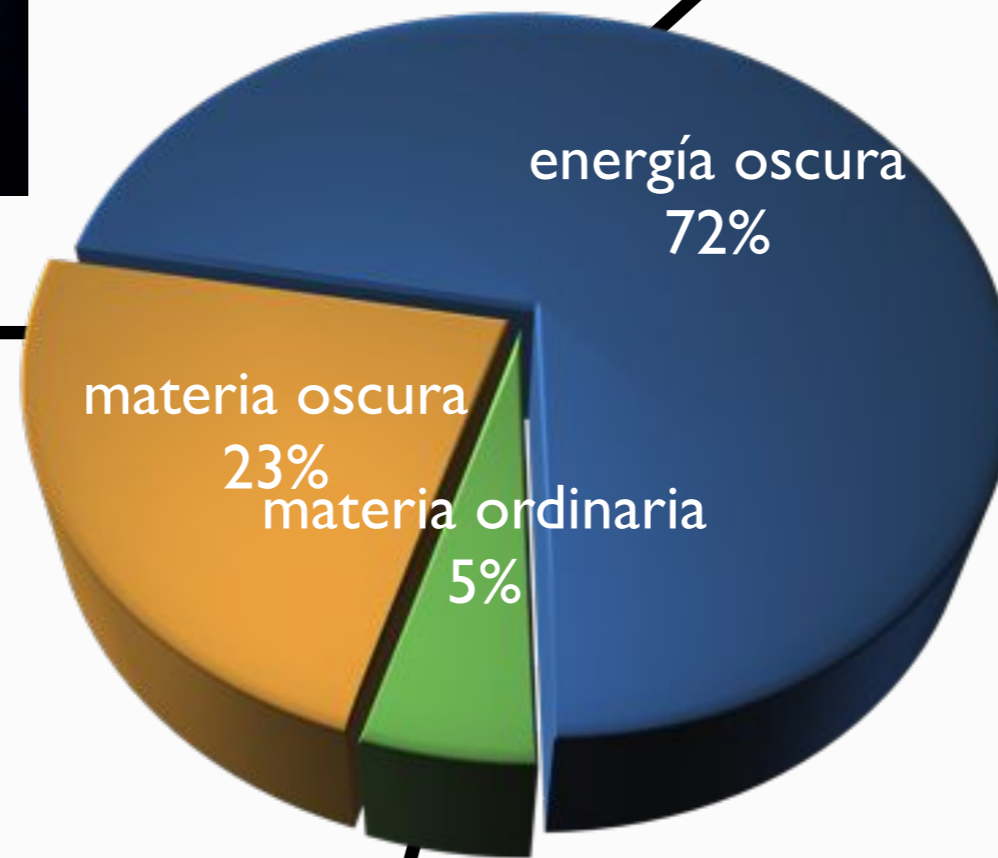
¿?



# Los componentes del Universo



¿?¿

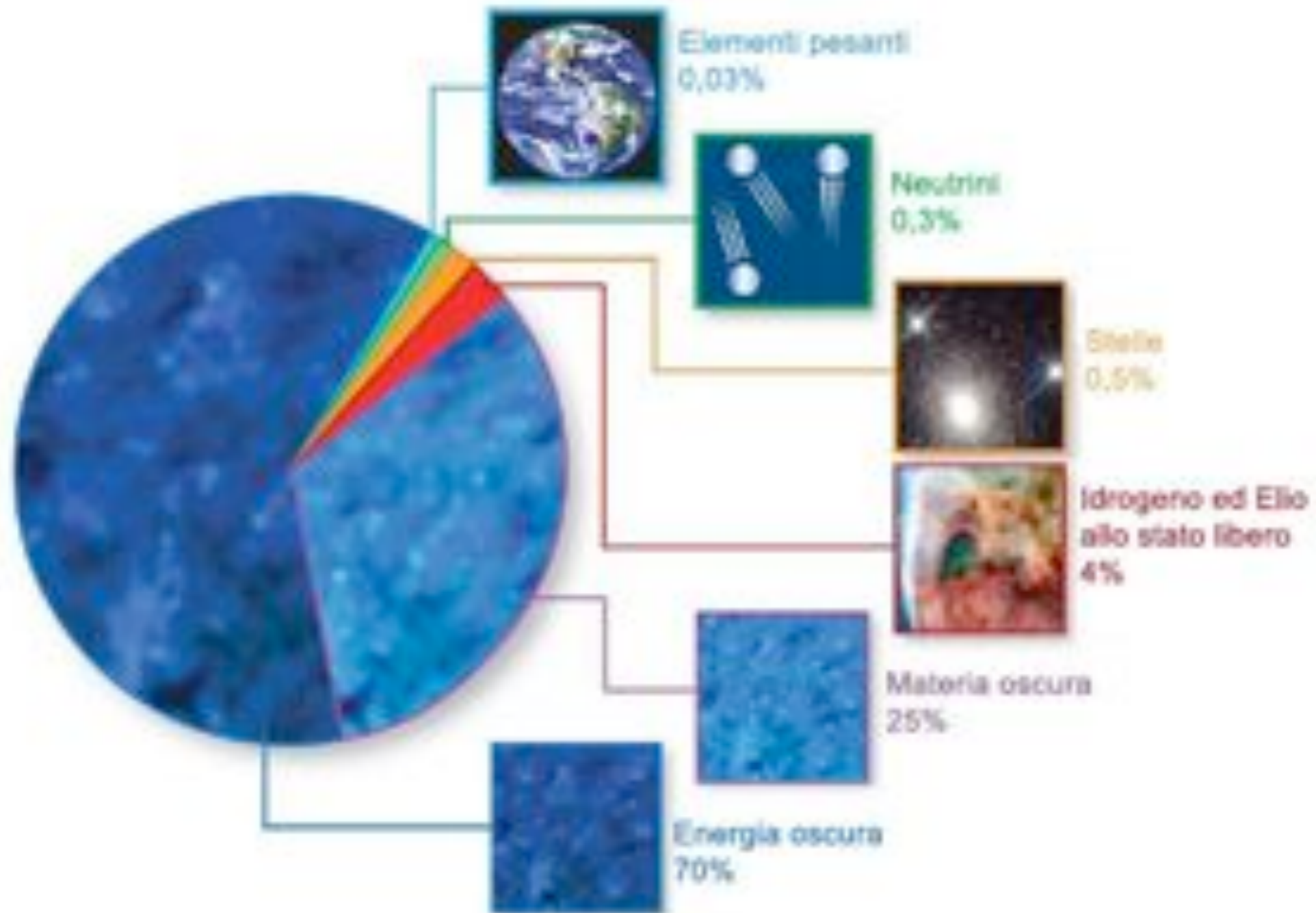


¿?¿  
¿?¿  
¿?¿





# Los componentes del Universo



# Materia ordinaria

---

¿Cuál es la estructura fundamental de la materia?

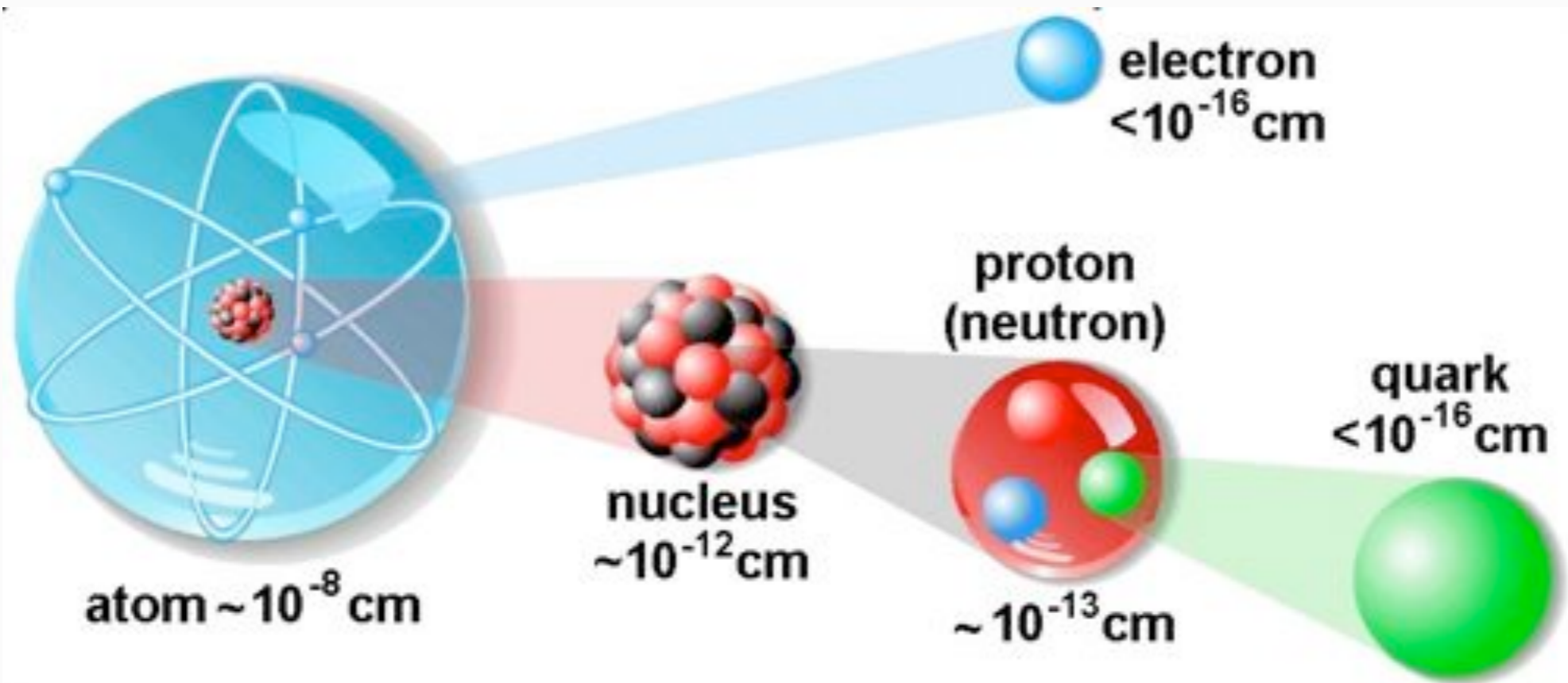
# Materia ordinaria

¿Cuál es la estructura fundamental de la materia?

$10 \text{ keV}/(hc)$

$100 \text{ MeV}/(hc)$

$\gtrsim 1 \text{ GeV}/(hc)$



Electromagnetismo

Interacciones nucleares  
débil y fuerte

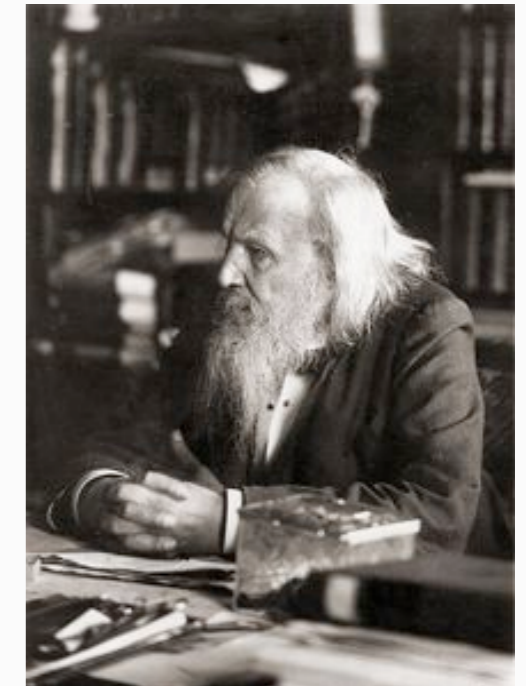
# Materia ordinaria

¿Cuál es la estructura fundamental de la materia?

		Group																				
		I	II											III	IV	V	VI	VII	VIII			
Period	1	1 H																				2 He
	2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne			
	3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar			
	4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr			
	5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe			
	6	55 Cs	56 Ba	* La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn			
	7	87 Fr	88 Ra	** Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo			
	8	119 Uun																				

* Lanthanides	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
** Actinides	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr



Mendeleev 1869

Alkali metals	Alkaline earth metals	Lanthanides	Actinides	Transition metals
Poor metals	Metalloids	Nonmetals	Halogens	Noble gases

State at standard temperature and pressure

Atomic number in red: gas

Atomic number in blue: liquid

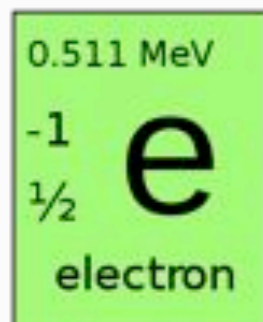
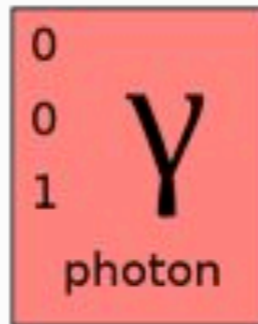
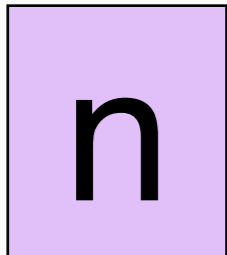
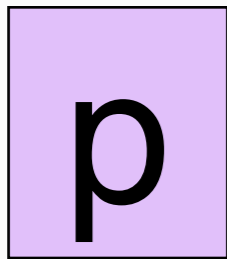
Atomic number in black: solid

solid border: at least one isotope is older than the Earth (Primordial elements)
dashed border: at least one isotope naturally arise from decay of other chemical elements and no isotopes are older than the earth
dotted border: only artificially made isotopes (synthetic elements)
no border: undiscovered



# Materia ordinaria

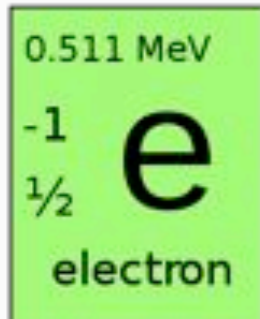
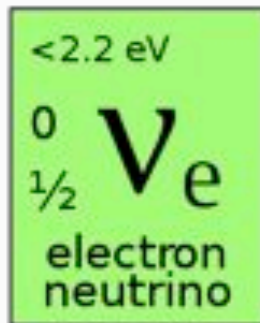
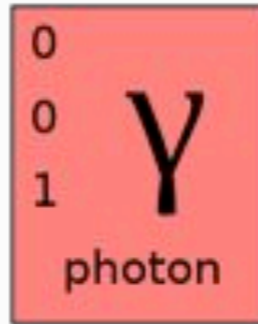
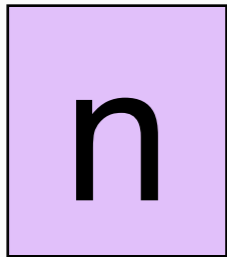
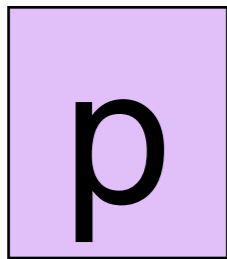
Reducción a cuatro  
constituyentes fundamentales



Boltzmann Rutherford  
Thomson Einstein

# Materia ordinaria

Átomo cuántico,  
desintegración beta



Boltzmann Rutherford  
Thomson Einstein Bohr  
Pauli Fermi

# Materia ordinaria

## Estructura interna de protones y neutrones: quarks



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

**u**  
up

0  
0  
1

**γ**  
photon

Quarks

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

**d**  
down

Leptons

<2.2 eV  
0  
 $\frac{1}{2}$

**$\nu_e$**   
electron  
neutrino

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

**e**  
electron

Boltzmann Rutherford  
Thomson Einstein Bohr  
Pauli Fermi Gell-Mann  
Zweig

# Materia ordinaria

Corrientes neutras,  
cromodinámica

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

<2.2 eV  
0  
 $\frac{1}{2}$

**$\nu_e$**   
electron  
neutrino

**Leptons**

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

**e**  
electron

0  
0  
1

**$\gamma$**   
photon

0  
0  
1

**g**  
gluon

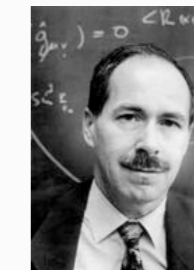
91.2 GeV  
0  
0  
1

**Z<sup>0</sup>**  
weak  
force

80.4 GeV  
 $\pm 1$   
1

**W<sup>±</sup>**  
weak  
force

**Bosons (Forces)**



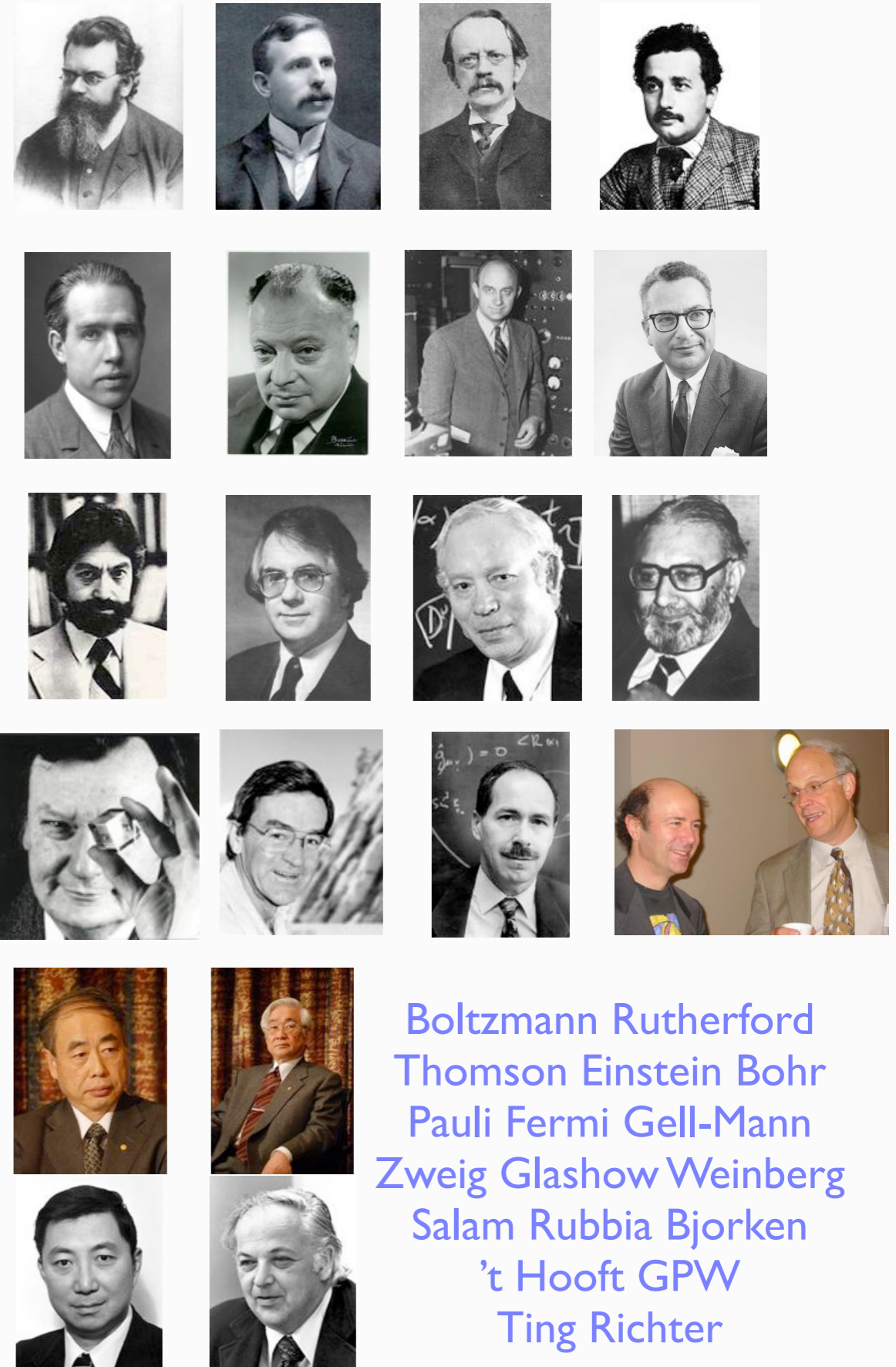
Boltzmann Rutherford  
Thomson Einstein Bohr  
Pauli Fermi Gell-Mann  
Zweig Glashow Weinberg  
Salam Rubbia Bjorken  
't Hooft GPW



# Materia ordinaria

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 →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b><math>\gamma</math></b> photon
Quarks	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluon
Leptons	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	<b>Z<sup>0</sup></b> weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	$\pm 1$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>e</b> electron	<b><math>\mu</math></b> muon	<b><math>\tau</math></b> tau	<b>W<sup>±</sup></b> weak force



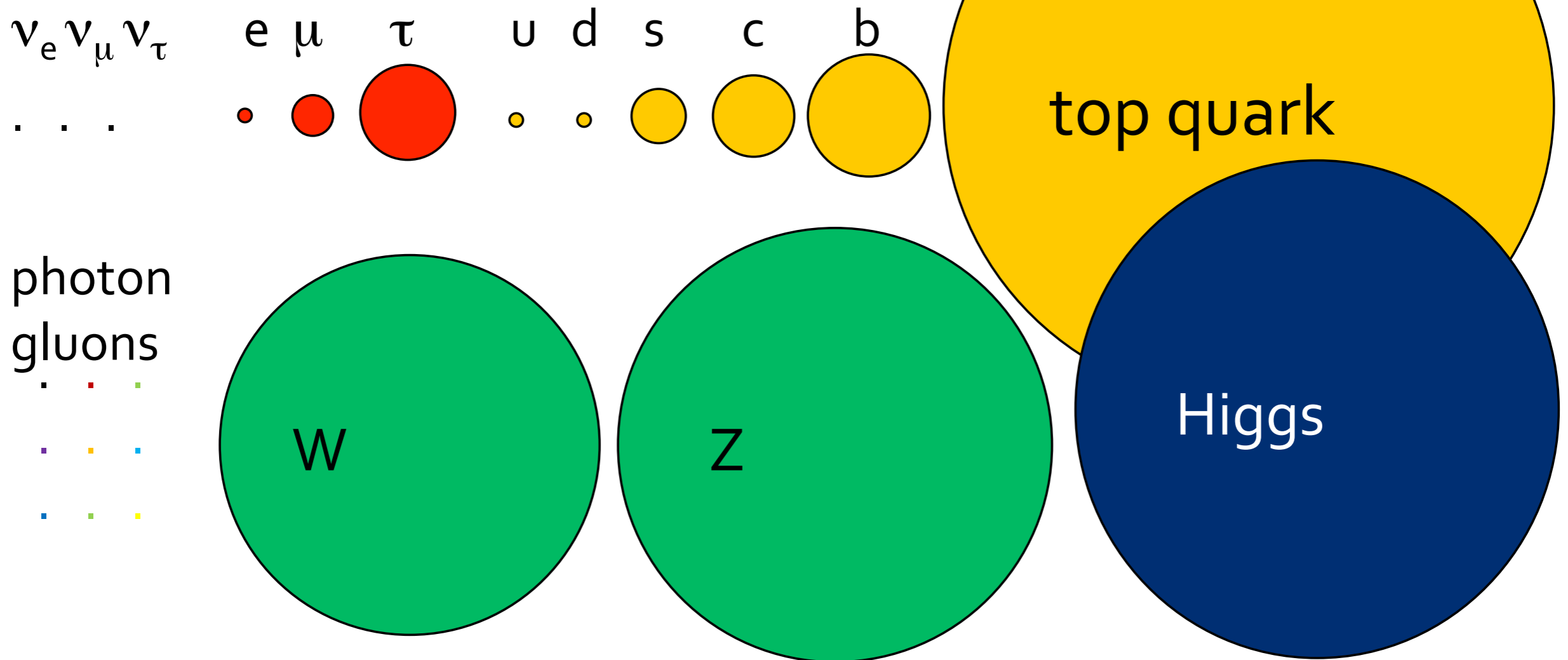
Boltzmann Rutherford  
Thomson Einstein Bohr  
Pauli Fermi Gell-Mann  
Zweig Glashow Weinberg  
Salam Rubbia Bjorken  
't Hooft GPW  
Ting Richter

Bosons (Forces)

# Materia ordinaria

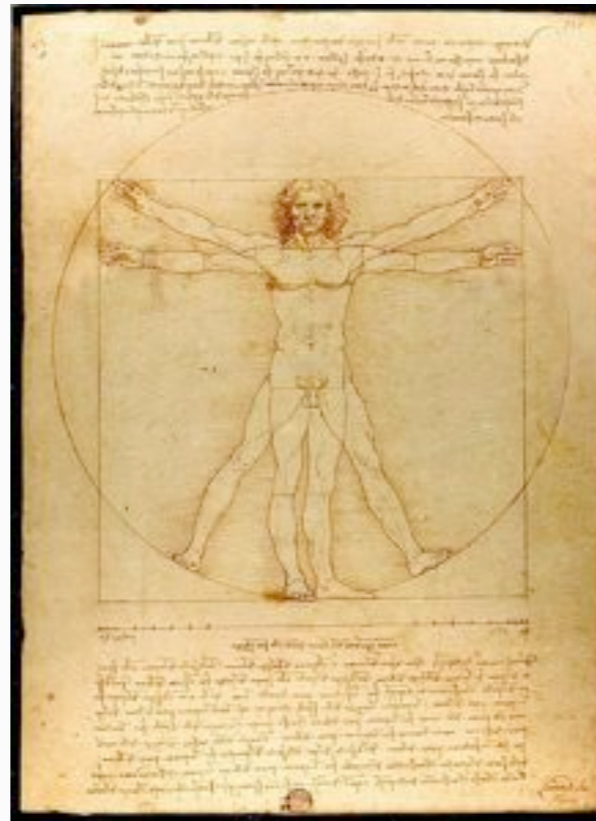
## Particle Masses

Mass proportional to area:



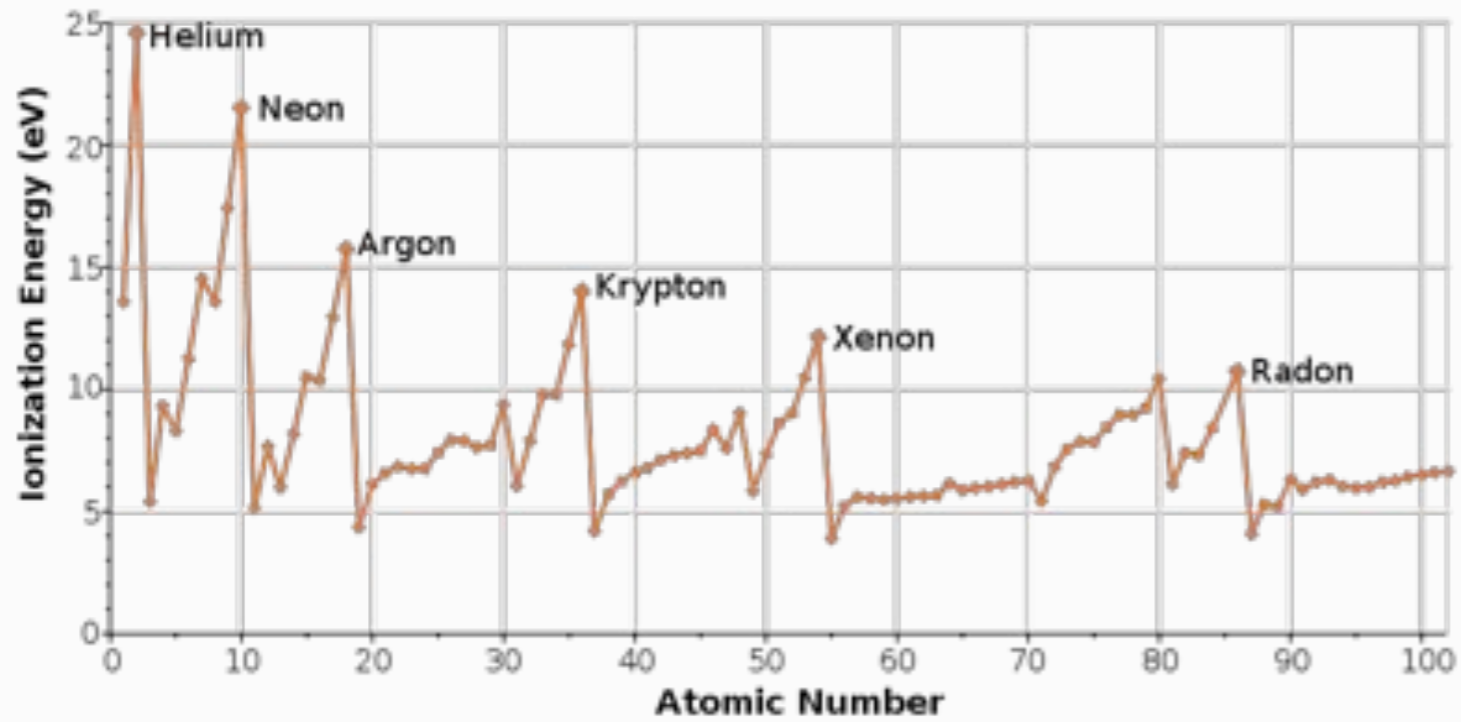


# Materia ordinaria

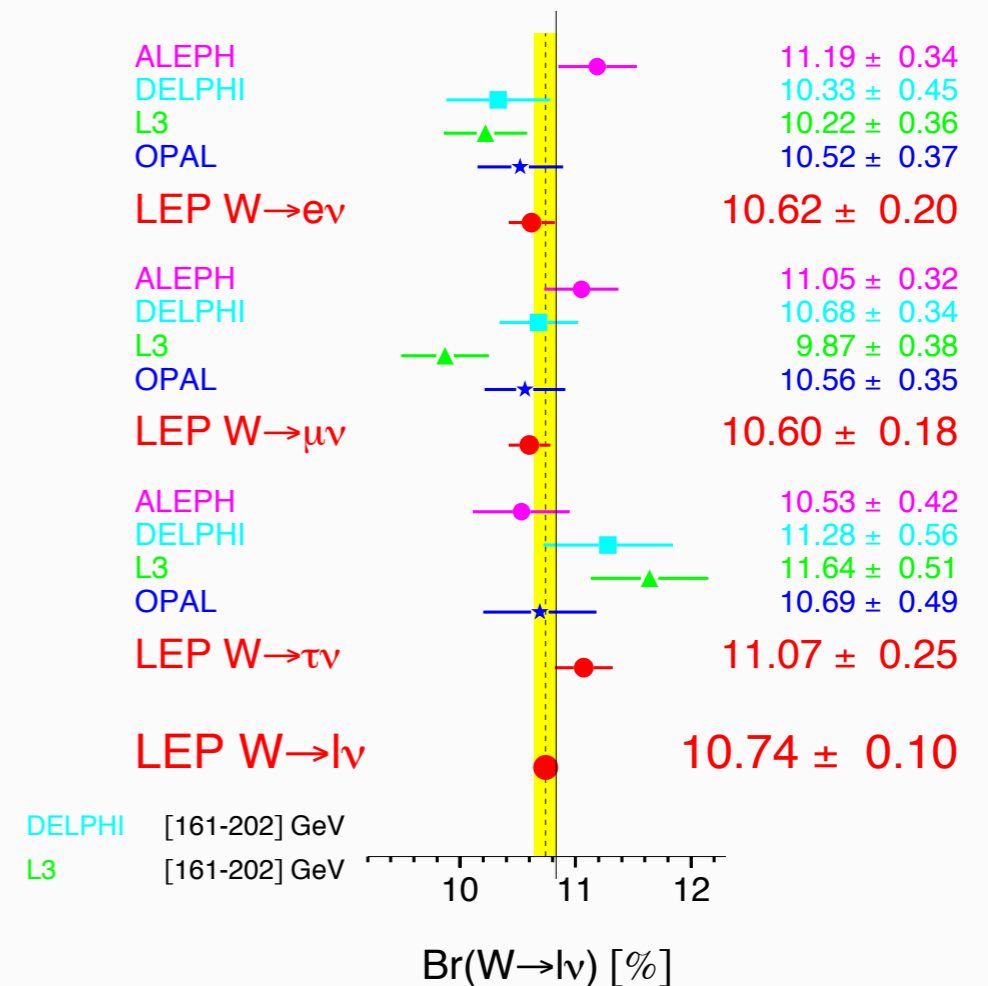


Principio ordenador: buscar la simetría en la naturaleza

# Materia ordinaria



## W Leptonic Branching Ratios



Principio ordenador: buscar la simetría en la naturaleza



# Standard Model of FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

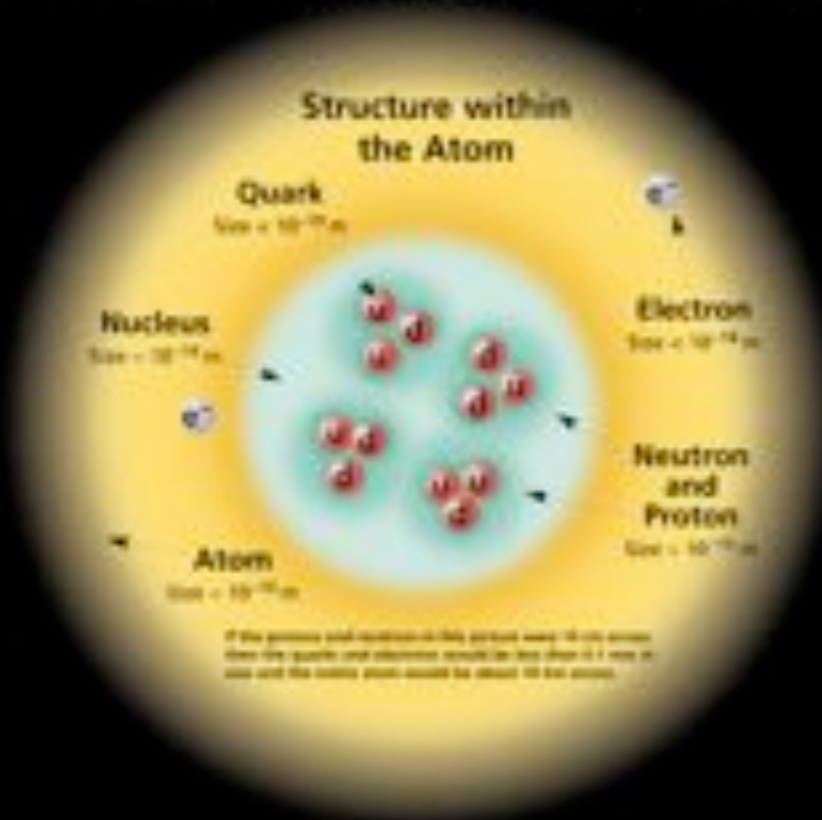
The Standard Model summarizes the current knowledge in Particle Physics. It is the quantum theory that includes the theory of strong interactions (quantum chromodynamics or QCD) and the unified theory of weak and electromagnetic interactions (electroweak). Gravity is included on this chart because it is one of the fundamental interactions even though not part of the "Standard Model."

## FERMIONS

matter constituents  
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

Leptons spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\nu_e$ electron neutrino	<1.10 <sup>-6</sup>	0
$e^-$ electron	0.000511	-1
$\nu_\mu$ muon neutrino	<0.0002	0
$\mu^-$ muon	0.106	-1
$\nu_\tau$ tau neutrino	<0.02	0
$\tau^-$ tau	1.7771	-1

Quarks spin = 1/2		
Flavor	Approx. Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$u$ up	0.001	2/3
$d$ down	0.006	-1/3
$c$ charm	1.3	2/3
$s$ strange	0.1	-1/3
$t$ top	175	2/3
$b$ bottom	4.3	-1/3



If the protons and neutrons in this nucleus were 10 cm across, then the quarks and electrons would be less than 1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.

## BOSONS

force carriers  
spin = 0, 1, 2, ...

Unified Electroweak spin = 1		
Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\gamma$ photon	0	0
$W^-$	80.4	-1
$W^+$	80.4	+1
$Z^0$	91.187	0

Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$g$ gluon	0	0

**Color Charge**  
Each quark carries one of three types of "strong charge," also called "color charge." These charges have nothing to do with the colors of visible light. There are eight possible types of color charge for gluons, but at short

color-charged particles interact by exchanging photons. In strong interactions color-charged particles interact by exchanging gluons. Leptons, photons, and  $W$  and  $Z$  bosons have no strong interactions and hence no color charge.

**Quarks Confined in Mesons and Baryons**  
One cannot isolate quarks and gluons; they are confined in color-neutral particles called hadrons. This confinement (confinement) results from multiple exchanges of gluons among the color-charged constituents. As color-charged particles (quarks and gluons) move apart, the energy in the color-force field between them increases. This energy eventually is converted into additional quark-antiquark pairs (see figure below). The quarks and antiquarks then combine into hadrons; these are the particles seen to emerge. Two types of hadrons have been observed in nature: mesons ( $q\bar{q}$ ) and baryons ( $qqq$ ).

**Residual Strong Interaction**  
The strong binding of color-neutral protons and neutrons to form nuclei is due to residual strong interactions between their color-charged constituents. It is similar to the residual electrical interaction that binds electrically neutral atoms to form molecules. It can also be viewed as the exchange of mesons between the hadrons.

## PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

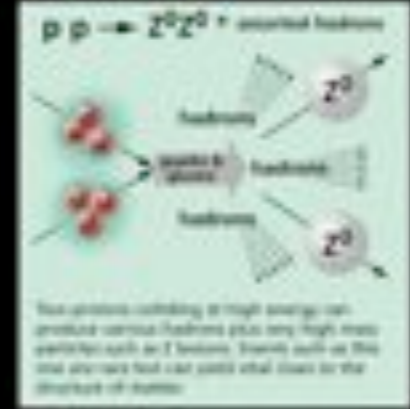
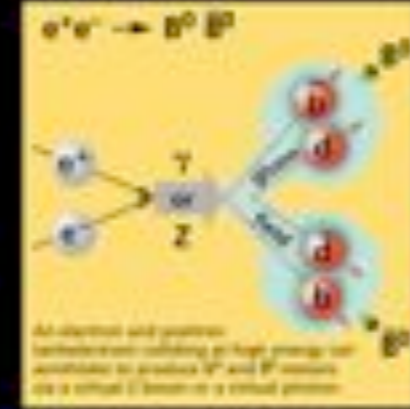
Baryons $qqq$ and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$					
Baryons are fermions; hadrons. There are about 100 types of baryons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Spin
$p$	proton	$uud$	1	0.938	1/2
$\bar{p}$	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
$n$	neutron	$udd$	0	0.940	1/2
$\Lambda$	baryon	$uds$	0	1.116	1/2
$\Xi^-$	strange	$ssu$	-1	1.321	1/2

Property	Interaction	Gravitational	Weak	Electromagnetic	Strong	
			Intermediate		Fundamental	Residual
Acts on:		Mass - Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge	No residual strong interaction here
Particles experiencing:		All	Quarks, Leptons	Electrically charged	Quarks, Gluons	Hadrons
Particles mediating:		Graviton (not yet observed)	$W^+$ $W^-$ $Z^0$	$\gamma$	Gluons	Mesons
Strength (relative to gravity):		$10^{-41}$	0.8	1	21	Not applicable to quarks
		$10^{-41}$	$10^{-6}$	1	60	Not applicable to hadrons
		$10^{-38}$	$10^{-7}$	1	20	

Mesons $q\bar{q}$					
Mesons are bosons; hadrons. There are about 100 types of mesons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Spin
$\pi^+$	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
$K^-$	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0
$\rho^+$	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1
$B^0$	B meson	$d\bar{b}$	0	5.279	0
$\chi_c$	charm	$c\bar{c}$	0	2.360	0

**Matter and Antimatter**  
For every particle type there is a corresponding antiparticle type, denoted by a bar over the particle symbol (unless + or - charge is shown). Particle and antiparticle have identical mass and spin but opposite charges. Some electrically neutral bosons (e.g.,  $Z^0$ ,  $\gamma$ , and  $\eta$ ,  $\eta'$ ,  $\pi^0$ , but not  $K^0$  or  $B^0$ ) are their own antiparticles.

**Figures**  
These diagrams are an artist's conception of physical processes. They are not exact and have no meaningful scale. Green shaded areas represent the cloud of gluons or the gluon field, and red lines the quark paths.



**The Particle Adventure**  
Visit the accompanying web feature The Particle Adventure at <http://ParticleAdventure.org>.

This chart has been made possible by the generous support of:  
U.S. Department of Energy  
U.S. National Science Foundation  
Lawrence Berkeley National Laboratory  
Stanford Linear Accelerator Center  
American Physical Society, Division of Particle and Field  
**DUPRE** INDUSTRIES, INC.

©2006 Contemporary Physics Education Project. CPEP is a nonprofit organization of teachers, physicists, and educators, dedicated to CPEP 501 (c) (3) 501(c)(3) Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, 94720. For information on charts, text materials, hands-on classroom activities, and workshops, see <http://CPEPweb.org>.



# Standard Model of FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

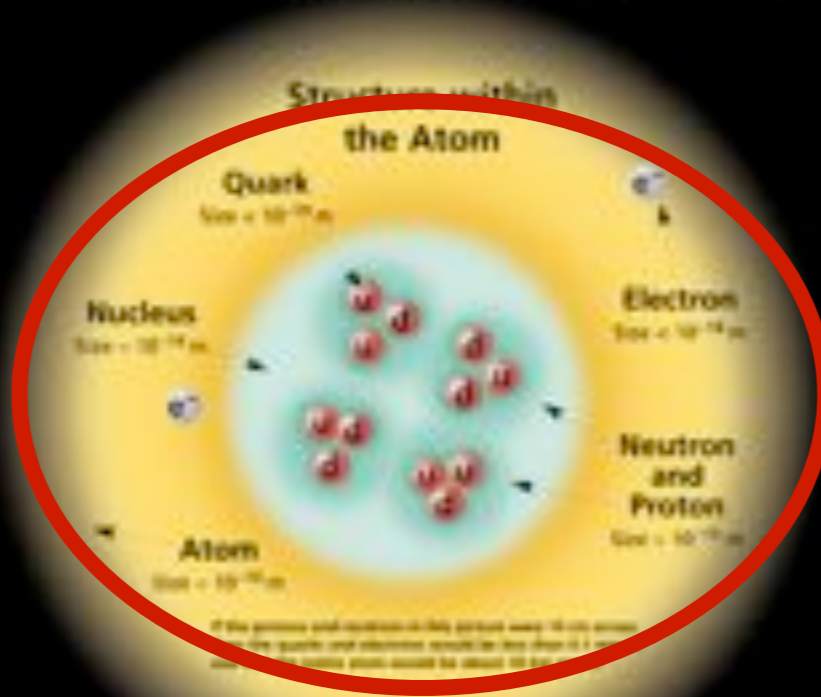
The Standard Model summarizes the current knowledge in Particle Physics. It is the quantum theory that includes the theory of strong interactions (quantum chromodynamics or QCD) and the unified theory of weak and electromagnetic interactions (electroweak). Gravity is included on this chart because it is one of the fundamental interactions, even though not part of the "Standard Model."

## FERMIONS

matter constituents  
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

Leptons spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\nu_e$ electron neutrino	<1x10 <sup>-9</sup>	0
e <sup>-</sup> electron	0.000511	-1
$\nu_\mu$ muon neutrino	<0.0002	0
$\mu^-$ muon	0.106	-1
$\nu_\tau$ tau neutrino	<0.02	0
$\tau^-$ tau	1.7771	-1

Quarks spin = 1/2		
Flavor	Approx. Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
u up	0.001	2/3
d down	0.006	-1/3
c charm	1.3	2/3
s strange	0.1	-1/3
t top	175	2/3
b bottom	4.3	-1/3



## BOSONS

force carriers  
spin = 0, 1, 2, ...

Unified Electroweak spin = 1		
Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\gamma$ photon	0	0
W <sup>-</sup>	80.4	-1
W <sup>+</sup>	80.4	+1
Z <sup>0</sup>	91.187	0

Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
g gluon	0	0

**Color Charge**  
Each quark carries one of three types of "strong charge," also called "color charge." These charges have nothing to do with the colors of visible light. There are eight gluons, each with a different combination of color charge for gluons, but all carry the same amount of color charge for gluons. Unlike photons, gluons have strong interactions and hence no color charge.

**Quarks Confined in Mesons and Baryons**  
One cannot isolate quarks and gluons; they are confined in color neutral particles called hadrons. This confinement (binding) results from multiple exchanges of gluons among the color-charged constituents. As color-charged particles (quarks and gluons) move apart, the energy in the color force field between them increases. This energy eventually is converted into additional quark-antiquark pairs (see figure below). The quarks and antiquarks then combine into hadrons; these are the particles seen in nature. Two types of hadrons have been observed in nature: mesons (quark-antiquark) and baryons (quark-quark-quark).

**Residual Strong Interaction**  
The strong binding of color neutral protons and neutrons to form nuclei is due to residual strong interactions between their color-charged constituents. This interaction is called the nuclear force. It is the force that binds electrically neutral atoms into molecules. It is also the force that binds the nucleons in the nucleus.

Spin is the intrinsic angular momentum of particles. Spin is given in units of  $\hbar$ , which is a quantum unit of angular momentum, where  $\hbar = 1.054 \times 10^{-34}$  Joule-cm. Masses are given in GeV/c<sup>2</sup> (remember  $E = mc^2$ , where  $c = 3 \times 10^{10}$  cm/s). The mass of the proton is 0.938 GeV/c<sup>2</sup> = 1.67x10<sup>-27</sup> kg.

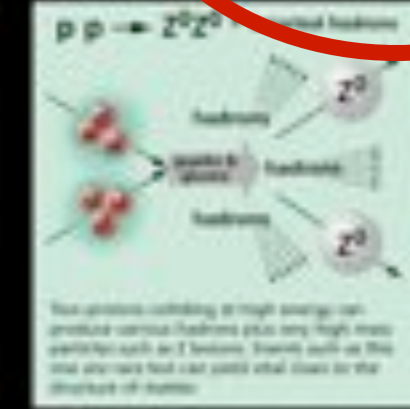
## PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

Baryons (qqq) and Antibaryons (qqq)					
Baryons are fermions (hadrons). There are about 100 types of baryons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Spin
p	proton	uud	1	0.938	1/2
$\bar{p}$	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
n	neutron	udd	0	0.940	1/2
$\bar{n}$	anti-neutron	$\bar{u}\bar{d}\bar{d}$	0	0.940	1/2
$\Lambda^0$	lambda	uds	0	1.115	1/2
$\bar{\Lambda}^0$	anti-lambda	$\bar{u}\bar{s}\bar{d}$	0	1.115	1/2

Property	Interaction	Gravitational	Weak	Electromagnetic	Strong	
		Mass - Energy	Flavor	Electric Charge	Fundamental	Residual
Acts on:		All	Quarks, Leptons	Electrically charged	Quarks, Gluons	Hadrons
Participates in:		Gravity (not on classical)	W <sup>+</sup> W <sup>-</sup> Z <sup>0</sup>	$\gamma$	Gluons	Mesons
Strength (force) decreases:		10 <sup>-41</sup>	0.8	1	21	Not applicable to quarks
Range:		10 <sup>-16</sup>	10 <sup>-16</sup>	1	16	Not applicable to hadrons
Examples:		10 <sup>-38</sup>	10 <sup>-7</sup>	1	Not applicable to hadrons	20

Mesons (q $\bar{q}$ )					
Mesons are bosons (hadrons). There are about 180 types of mesons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Spin
$\pi^+$	pion	u $\bar{d}$	+1	0.140	0
$\pi^-$	anti-pion	$\bar{u}d$	-1	0.140	0
$\rho^+$	rho	u $\bar{d}$	+1	0.770	1
$\rho^0$	anti-rho	$\bar{d}\bar{u}$	0	0.770	0
$\eta_c$	charmonium	$c\bar{c}$	0	2.980	0

**Matter and Antimatter**  
For every particle type there is a corresponding anti-particle type, denoted by a bar over the particle symbol (unless a charge is shown). Particle and anti-particles have identical mass and spin but opposite charges. Some particles are their own antiparticles, e.g.,  $\gamma$ ,  $\eta$ , and  $\eta_c$ , etc., but not  $\pi^+$  and  $\pi^-$  and their counterparts.



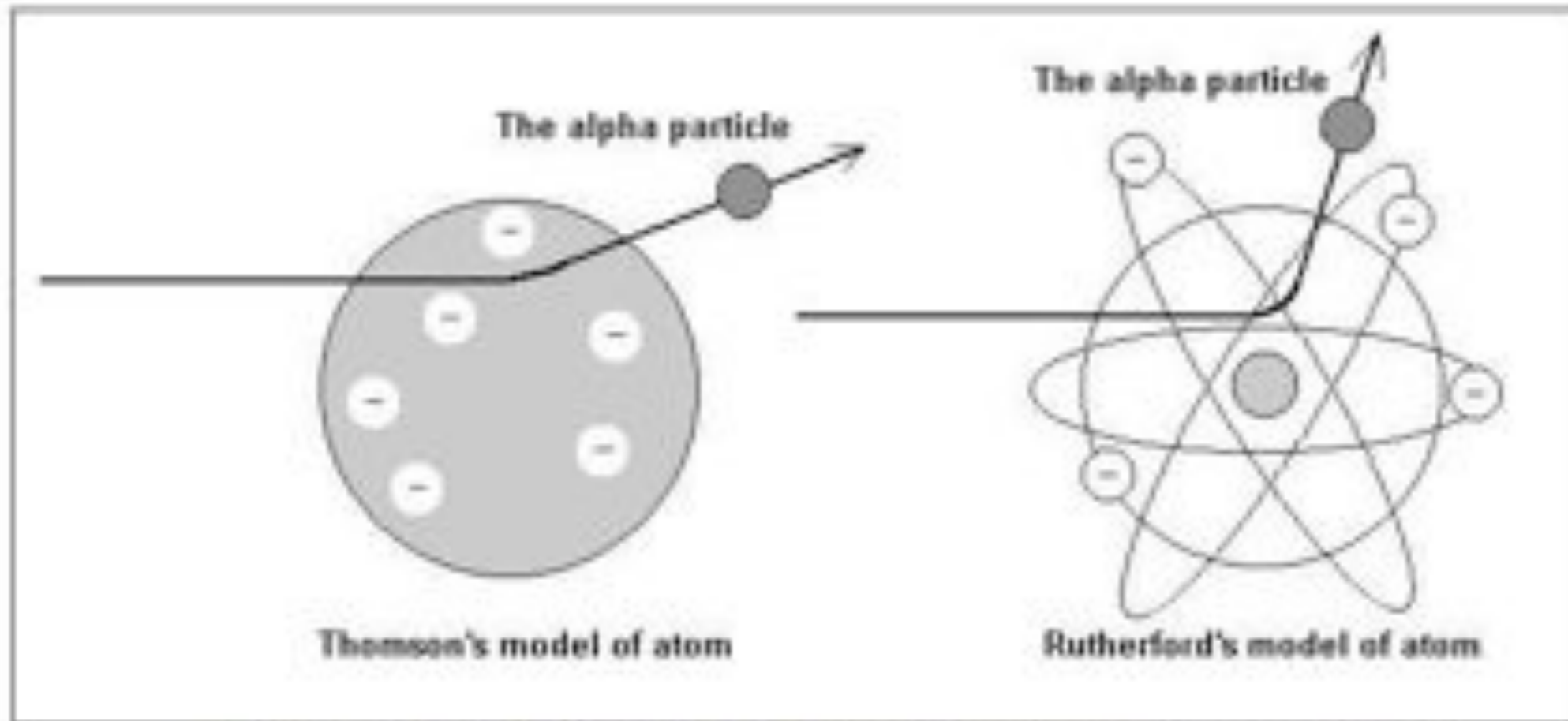
**Figures**  
These diagrams are an artist's conception of physical processes. They are not exact and have no meaningful scale. Green shaded areas represent the cloud of gluons or the gluon field, and red lines the quark paths.

**Particle Adventure**  
Visit the accompanying web feature The Particle Adventure at <http://ParticleAdventure.org>.

This chart has been made possible by the generous support of:  
U.S. Department of Energy  
U.S. National Science Foundation  
Lawrence Berkeley National Laboratory  
Stanford Linear Accelerator Center  
American Physical Society, Division of Particle and Field Studies  
**DOE** (Department of Energy), et al.

©2008 Contemporary Physical Education Program, CPEP is a nonprofit organization of teachers, physicists, and educators, dedicated to CPEP 501 (c) (3), Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, 94720. For information on charts, text materials, hands-on classroom activities, and workshops, visit <http://CPEPweb.org>

# Descubriendo las piezas: el “átomo planetario”



The models of the Thomson's atom and Rutherford's atom; and the expected aberrations of alpha particle in both cases.



$A \neq Z \Rightarrow$  neutrón

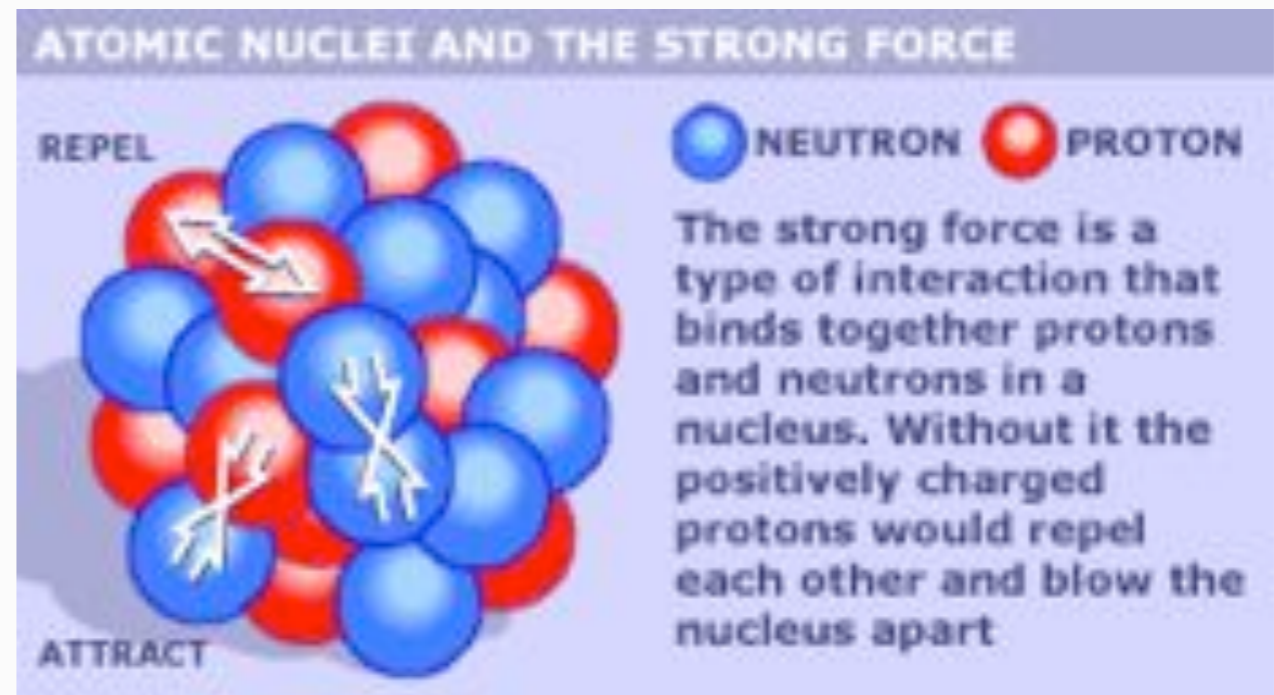


# Descubriendo las piezas: protones y neutrones

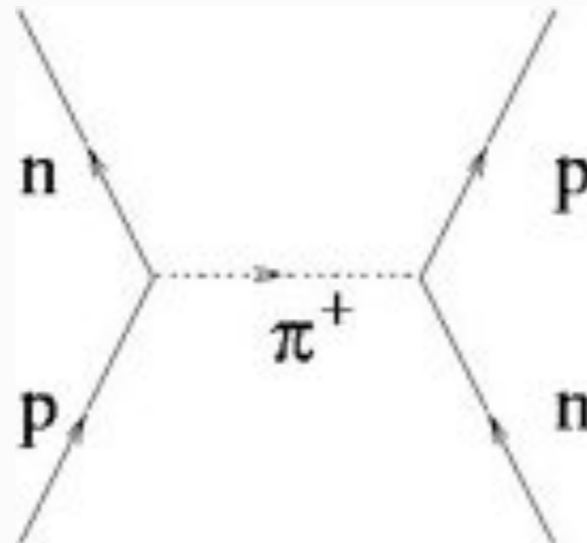
## Descubrimiento del neutrón



Chadwick 1932



¿Cómo se mantienen unidos los protones y los neutrones?



Yukawa 1934

# Descubriendo las piezas: quarks

---

*Three quarks for Muster Mark!  
Sure he has not got much of a bark  
And sure any he has it's all beside the mark.*

*James Joyce, Finnegans Wake*

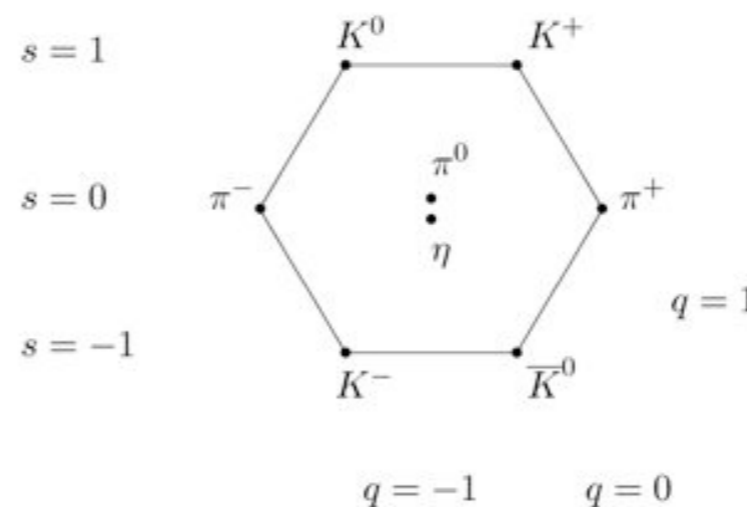
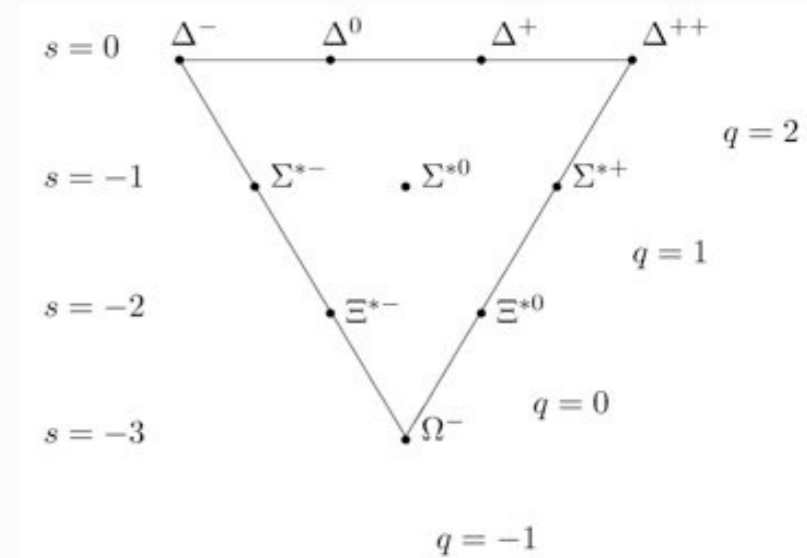
# Descubriendo las piezas: quarks

*Three quarks for Muster Mark!  
Sure he has not got much of a bark  
And sure any he has it's all beside the mark.*

James Joyce, *Finnegans Wake*

El zoo de partículas se explica con una simetría basada en octetes (y decupletes): el *Camino Óctuple*.

Gell-Mann, Ne'eman 1961





# Descubriendo las piezas: quarks

*Three quarks for Muster Mark!  
Sure he has not got much of a bark  
And sure any he has it's all beside the mark.*

James Joyce, *Finnegans Wake*

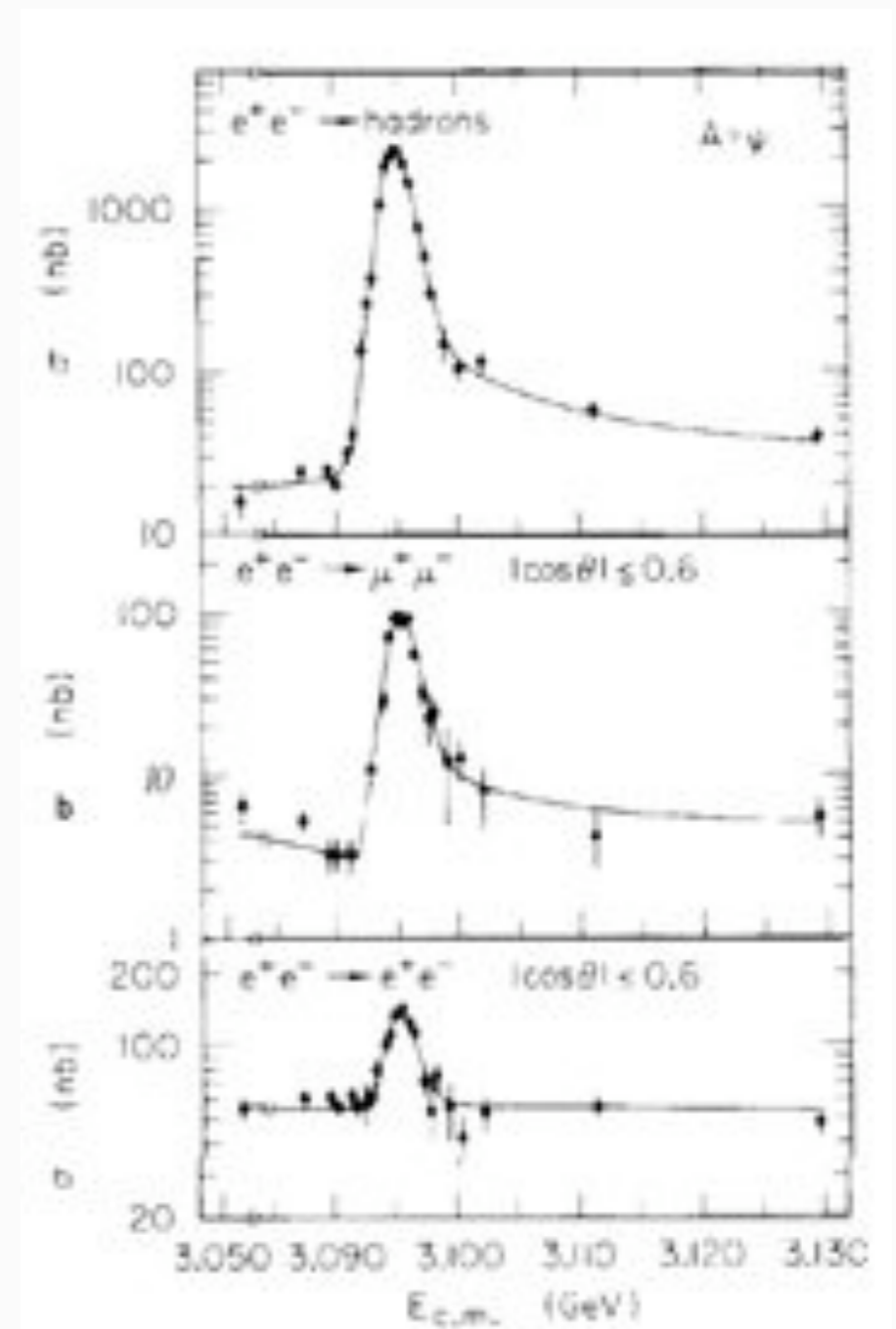
El zoo de partículas se explica con una simetría basada en octetes (y decupletes): el *Camino Óctuple*.

Gell-Mann, Ne'eman 1961



Esto conduce de manera natural a la hipótesis de que protones y neutrones están constituidos por partículas más elementales: los *quarks*.

Gell-Mann, Zweig 1964  
Bjorken, Feynman 1968-9

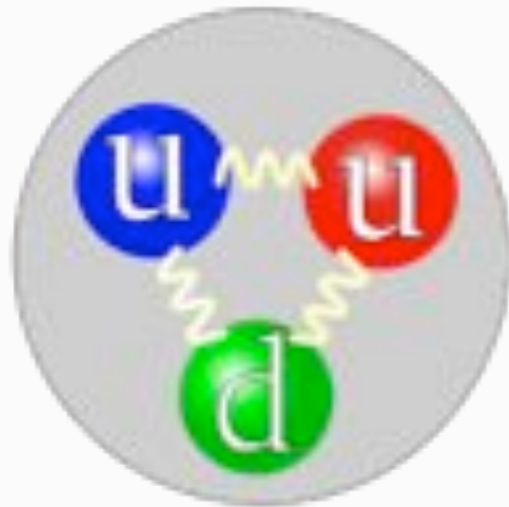


# La Cromodinámica Cuántica

Los *hadrones* (protones, neutrones, piones, ...) están constituidos por *quarks*, que poseen una carga de **color**.

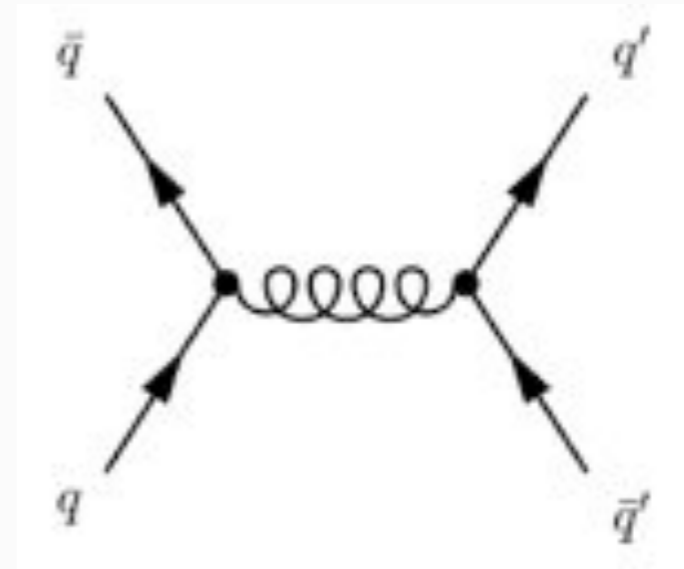
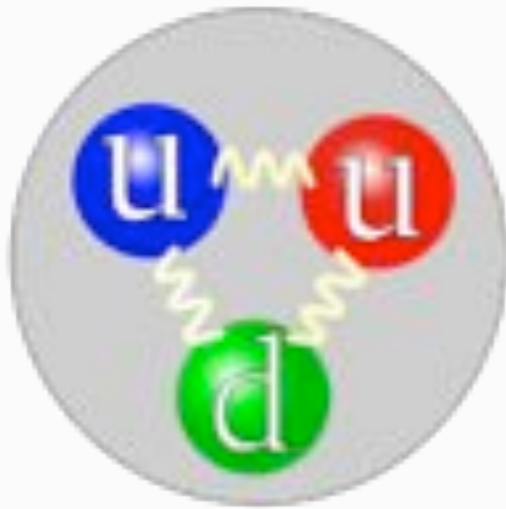
1969 - mediados de 1970s

muchas contribuciones; la introducción del color se remonta a Greenberg (1964)



# La Cromodinámica Cuántica

Los *hadrones* (protones, neutrones, piones, ...) están constituidos por *quarks*, que poseen una carga de **color**.

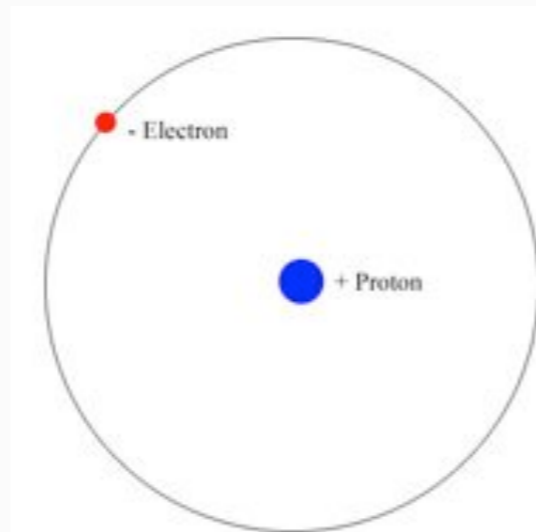
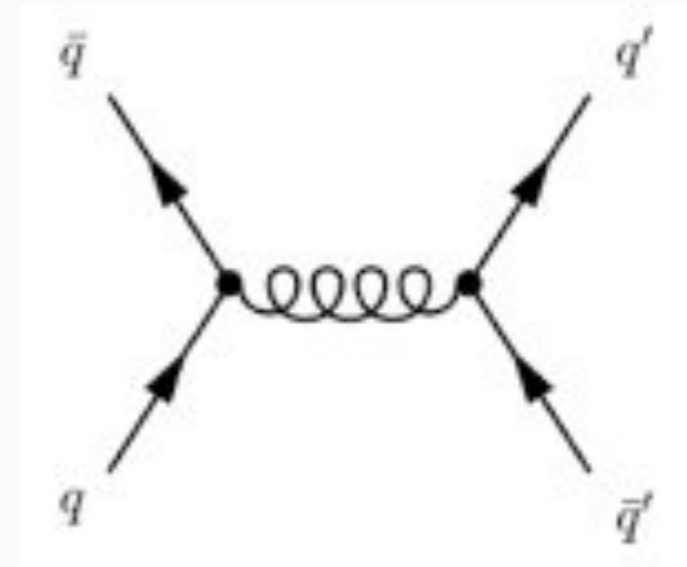
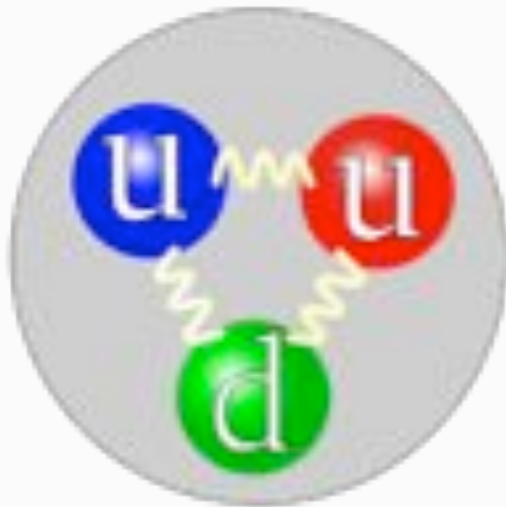


La **interacción fuerte** entre quarks implica el intercambio de **gluones**, de la misma forma que las cargas eléctricas interactúan intercambiando fotones.



# La Cromodinámica Cuántica

Los *hadrones* (protones, neutrones, piones, ...) están constituidos por *quarks*, que poseen una carga de **color**.



La **interacción fuerte** entre quarks implica el intercambio de **gluones**, de la misma forma que las cargas eléctricas interactúan intercambiando fotones.

En la analogía electromagnetismo - interacción fuerte los nucleones son estados ligados de quarks, como los átomos lo son de núcleo y electrones. Los protones y neutrones están unidos por una fuerza similar a la de van der Waals, que une los átomos en moléculas.

# ¿Cuál es el origen de la masa?

Masa del electrón:  $m_e \simeq 0.511 \text{ MeV}/c^2$

Masa del nucleón:  $m_N \simeq 940 \text{ MeV}/c^2$

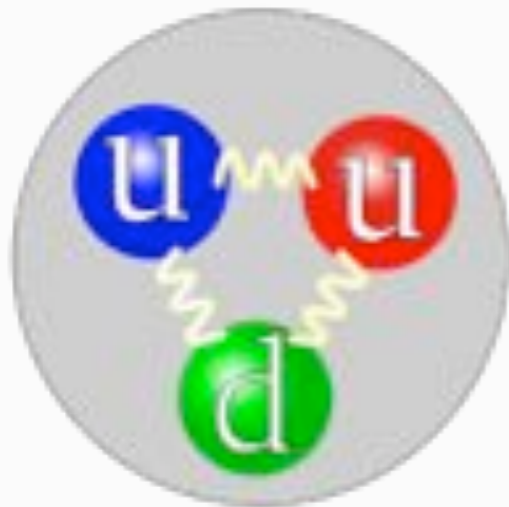
Casi toda la masa del átomo está en el núcleo

# ¿Cuál es el origen de la masa?

Masa del electrón:  $m_e \simeq 0.511 \text{ MeV}/c^2$

Masa del nucleón:  $m_N \simeq 940 \text{ MeV}/c^2$

Casi toda la masa del átomo está en el núcleo

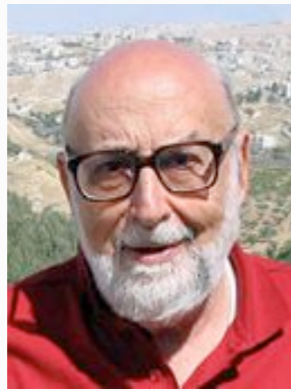


¿Cuál es el origen de la masa de un protón?

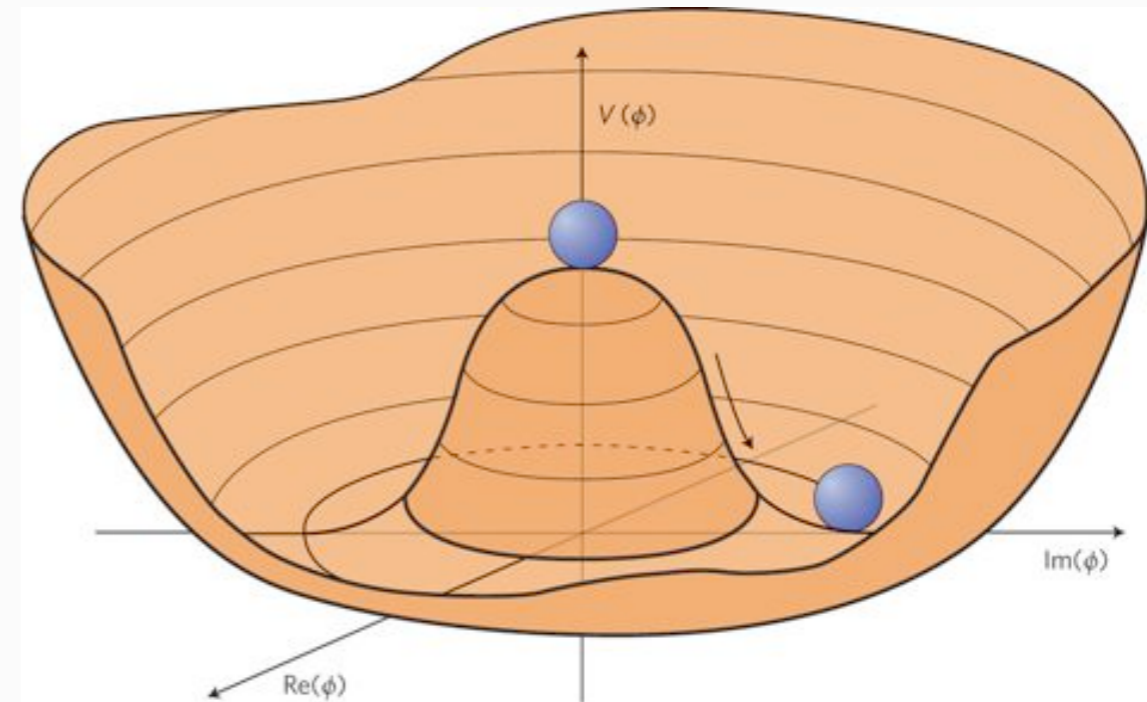


# ¿Cuál es el origen de la masa?

Modelo Estándar: las partículas elementales adquieren masa a través de la rotura espontánea de la simetría electrodébil.

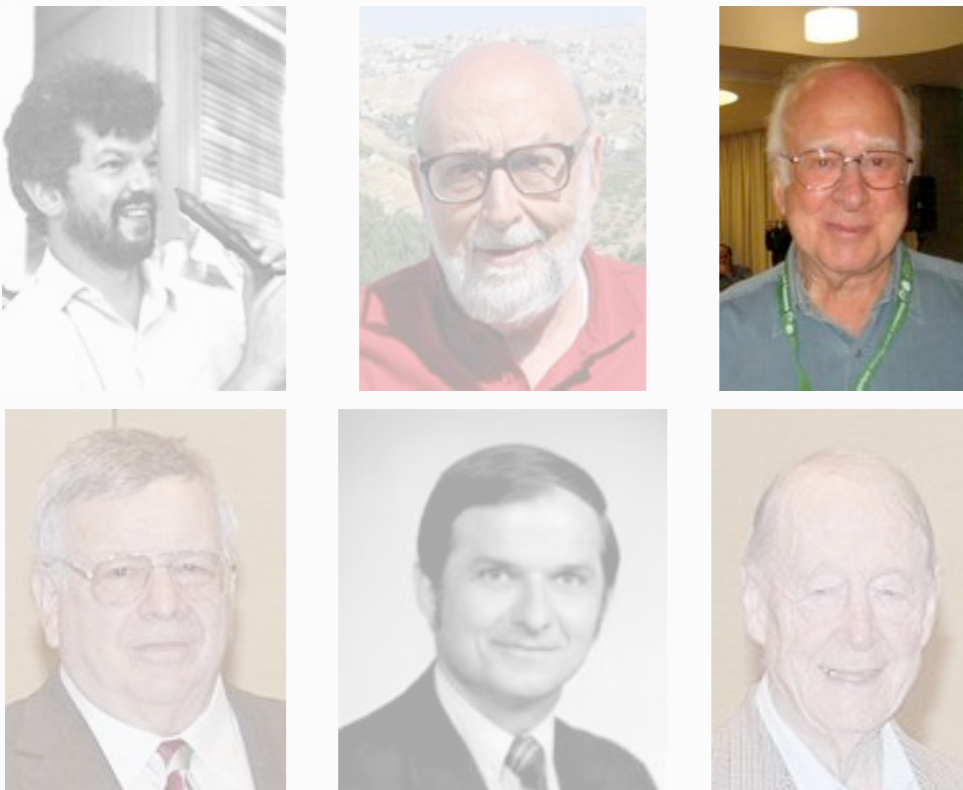


Englert, Brout, Higgs, Guralnik,  
Hagen, Kibble 1963-64

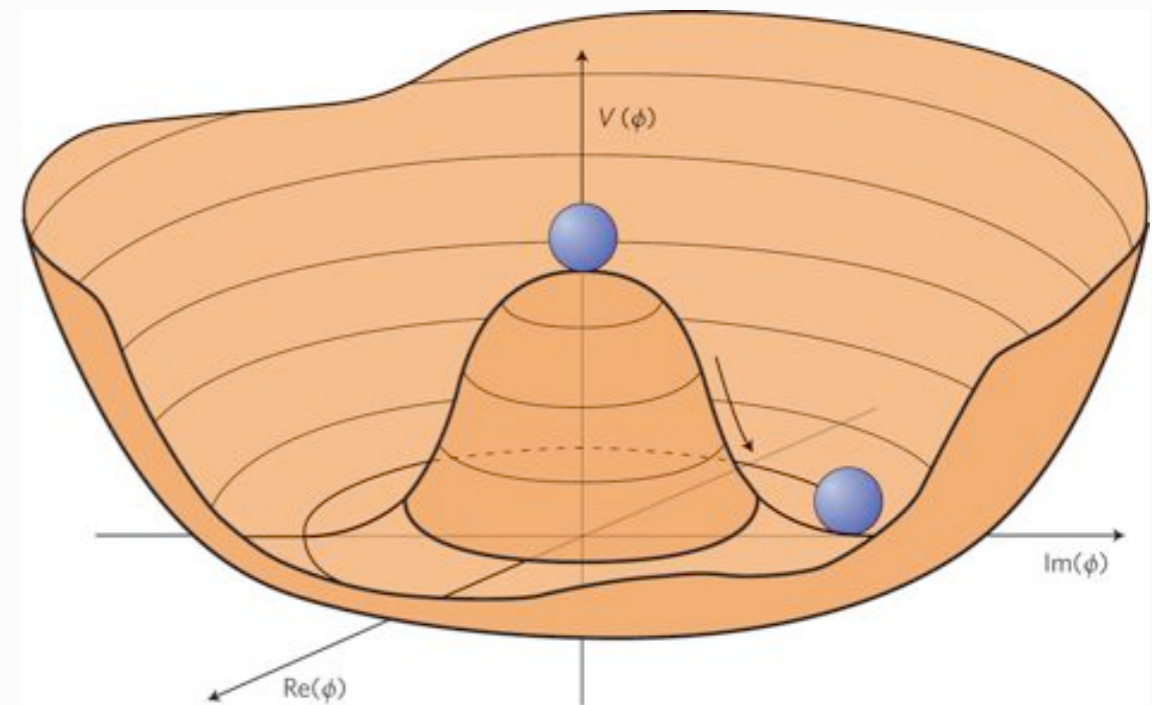


# ¿Cuál es el origen de la masa?

Modelo Estándar: las partículas elementales adquieren masa a través de la rotura espontánea de la simetría electrodébil.



Englert, Brout, Higgs, Guralnik,  
Hagen, Kibble 1963-64



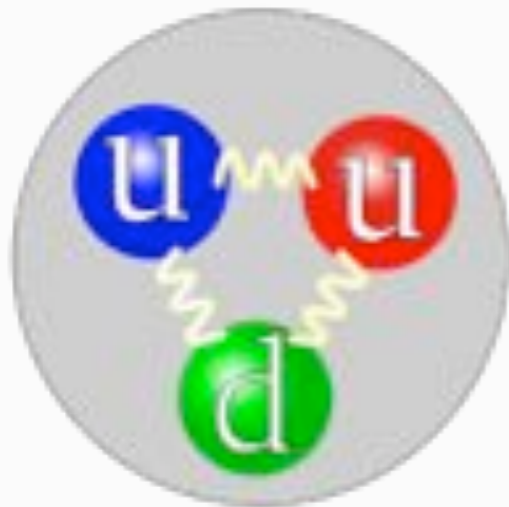
**Bosón de Higgs:** partícula asociada a la generación de masa.

# ¿Cuál es el origen de la masa?

Masa del electrón:  $m_e \simeq 0.511 \text{ MeV}/c^2$

Masa del nucleón:  $m_N \simeq 940 \text{ MeV}/c^2$

Casi toda la masa del átomo está en el núcleo



¿Cuál es el origen de la masa de un protón?

$$\begin{aligned} m_u &\sim 5 \text{ MeV}/c^2 \\ m_d &\sim 10 \text{ MeV}/c^2 \end{aligned} \Rightarrow (2m_u + m_d) \sim 20 \text{ MeV}/c^2$$

electromagnetismo:  $\frac{E_{\text{bind}}(H)}{(m_e + m_p)c^2} \approx 1.4 \times 10^{-5}$

interacción fuerte:  $\frac{E_{\text{bind}}(\text{proton})}{3m_q c^2} \approx 50$

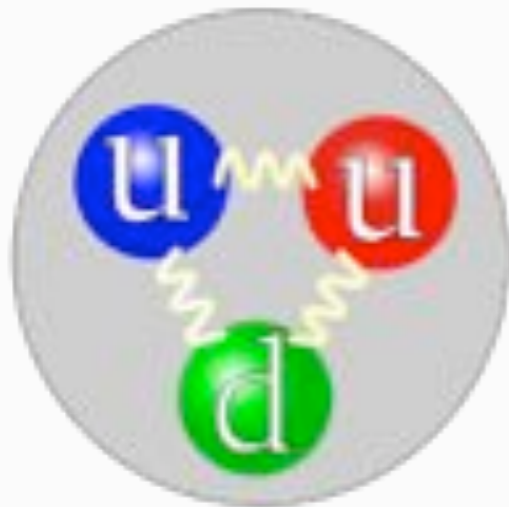


# ¿Cuál es el origen de la masa?

Masa del electrón:  $m_e \simeq 0.511 \text{ MeV}/c^2$

Masa del nucleón:  $m_N \simeq 940 \text{ MeV}/c^2$

Casi toda la masa del átomo está en el núcleo



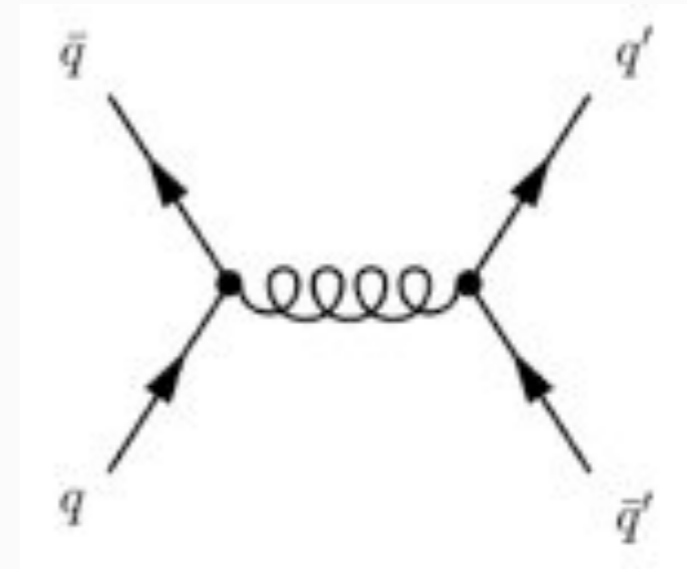
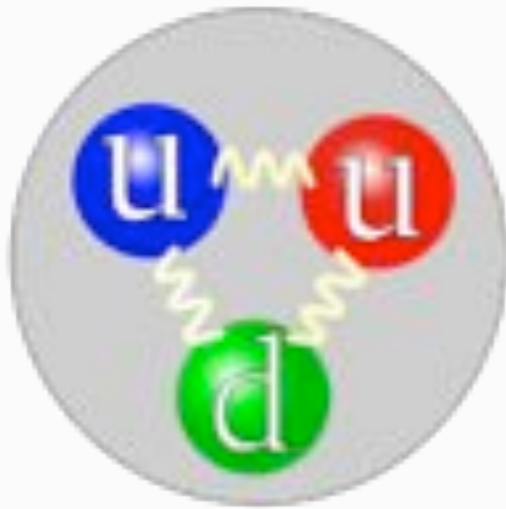
Más del 99% de la masa de la materia ordinaria es energía de ligadura de interacción fuerte entre quarks

# Plan

- La composición del Universo.
  - Materia ordinaria y componentes oscuros.
  - El interior del núcleo atómico: nucleones y quarks.
  - ¿Cuál es el origen de la masa?
- Cromodinámica cuántica.
  - Libertad asintótica y confinamiento.
  - Alta energía: el régimen perturbativo.
  - Baja energía: el régimen no perturbativo.
- La interacción fuerte en la Física de Altas Energías de nuestros días.
  - Temperatura y densidad altísimas: ¿plasma de quarks y gluones?
  - La interacción fuerte en LHC.

# La Cromodinámica Cuántica

Los *hadrones* (protones, neutrones, piones, ...) están constituidos por *quarks*, que poseen una carga de **color**.

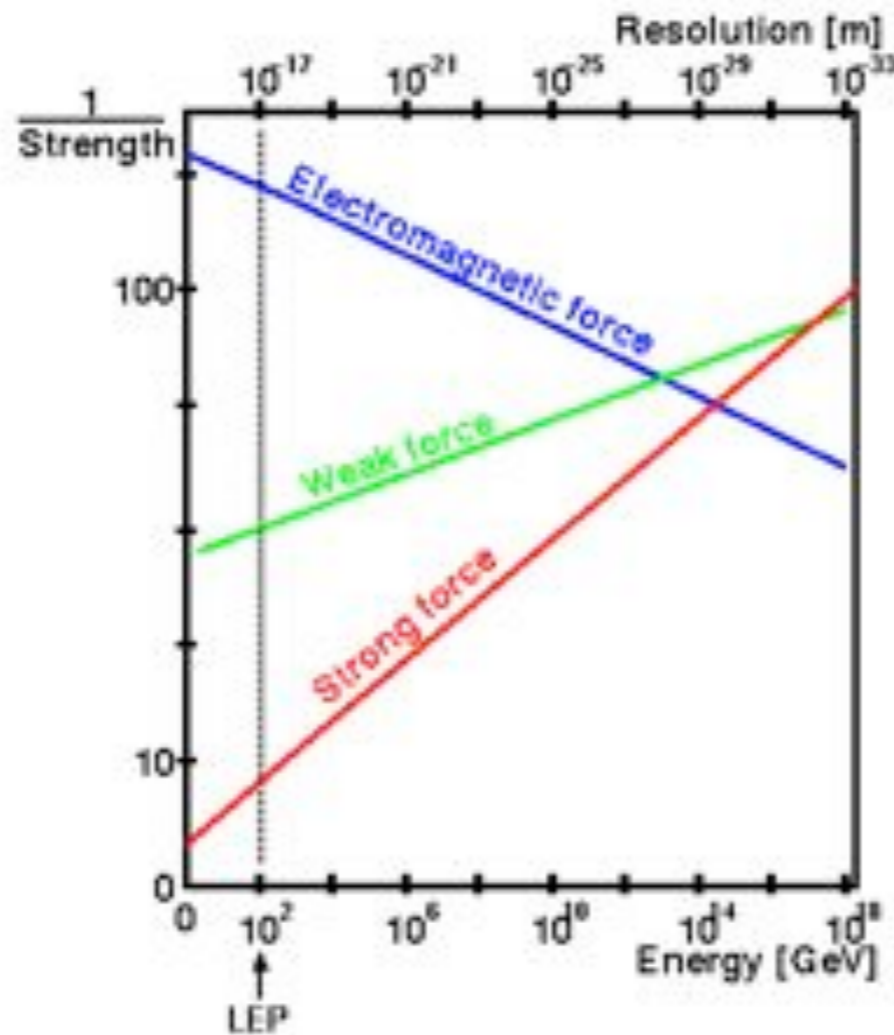
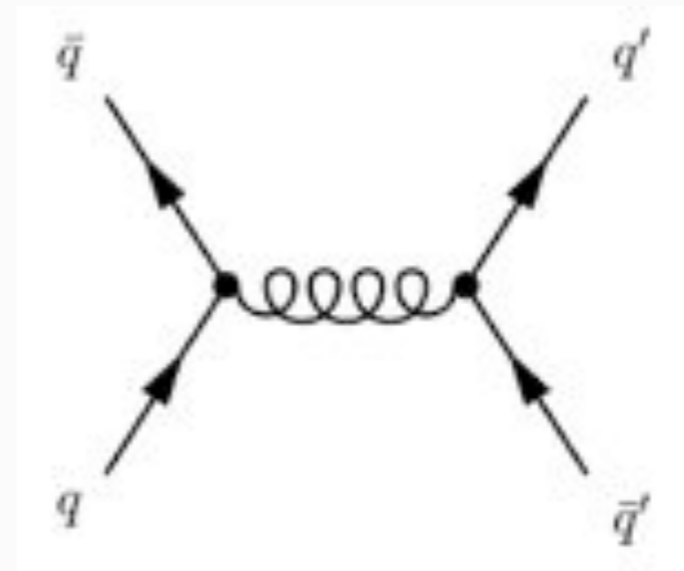
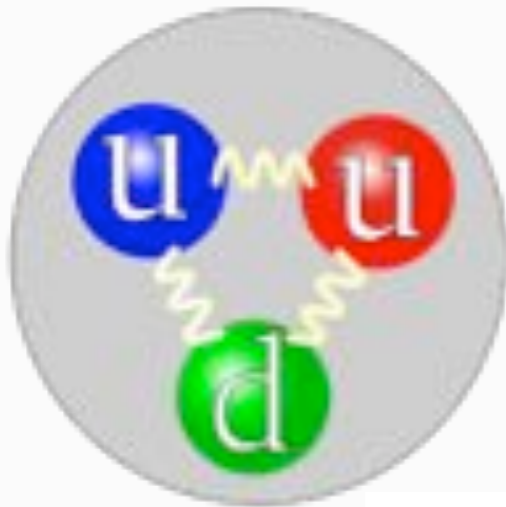


La **interacción fuerte** entre quarks implica el intercambio de **gluones**, de la misma forma que las cargas eléctricas interactúan intercambiando fotones.



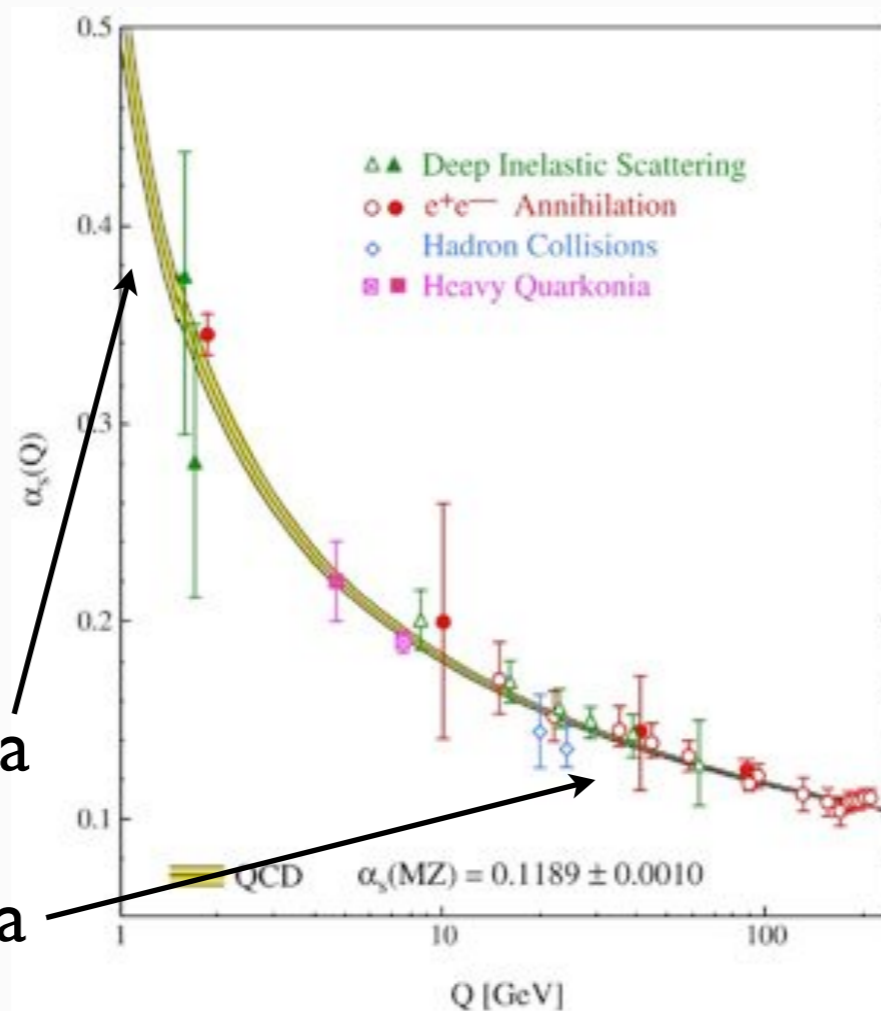
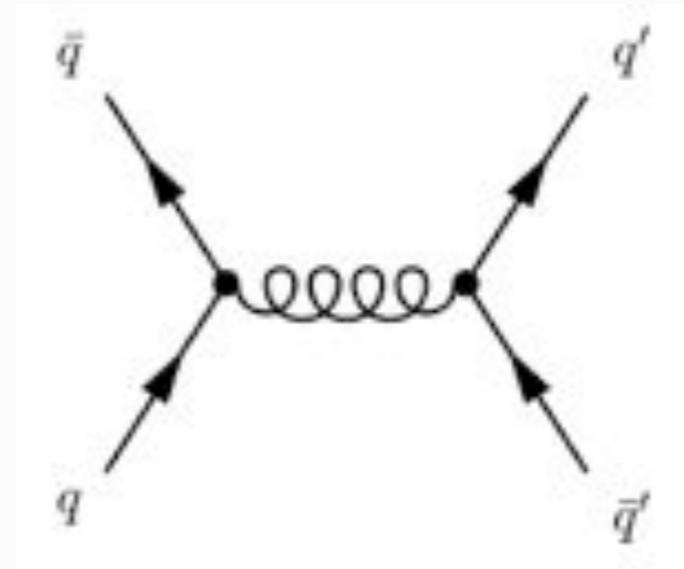
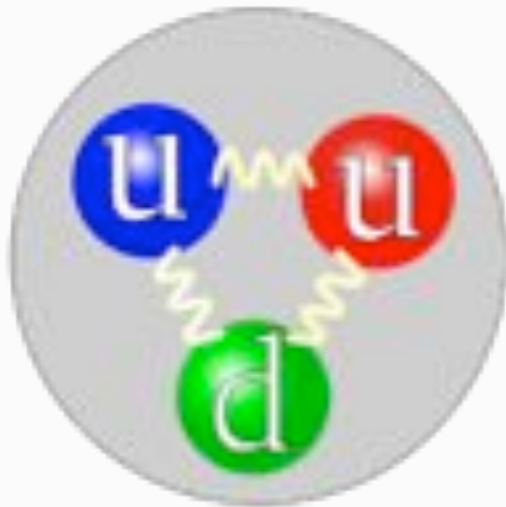
# Libertad asintótica

Los *hadrones* (protones, neutrones, piones, ...) están constituidos por *quarks*, que poseen una carga de **color**.



# Libertad asintótica

Los *hadrones* (protones, neutrones, piones, ...) están constituidos por *quarks*, que poseen una carga de **color**.



Fuerte a gran distancia

Débil a corta distancia

The Nobel Prize in Physics 2004  
David J. Gross, H. David Politzer, Frank Wilczek



David J. Gross



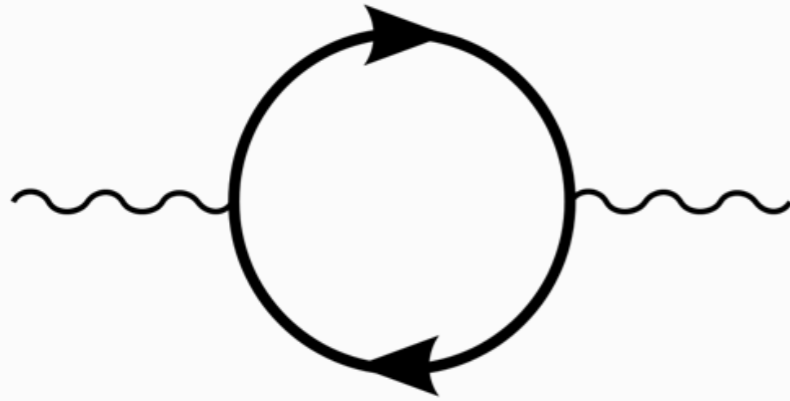
H. David Politzer



Frank Wilczek

The Nobel Prize in Physics 2004 was awarded jointly to David J. Gross, H. David Politzer and Frank Wilczek "for the discovery of asymptotic freedom in the theory of the strong interaction".

# Burbujas en el vacío



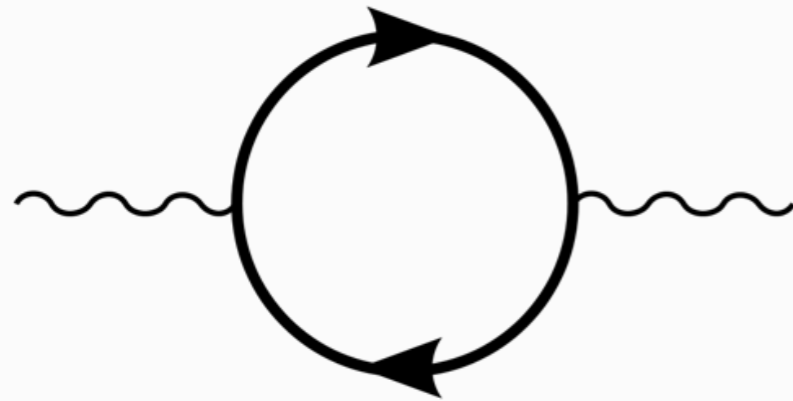
Polarización del vacío

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

El vacío cuántico posee estructura, revelada por los campos gauge.

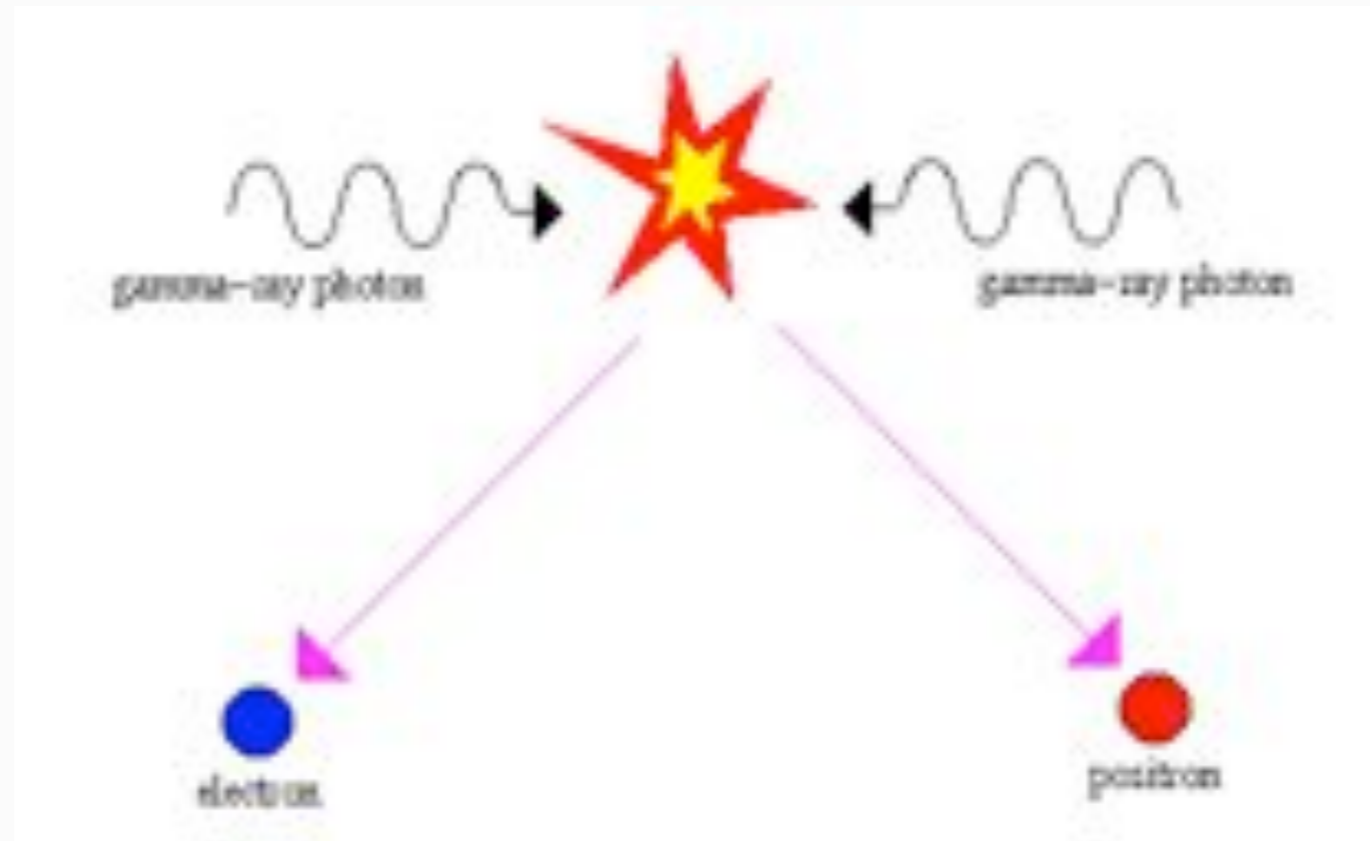


# Burbujas en el vacío



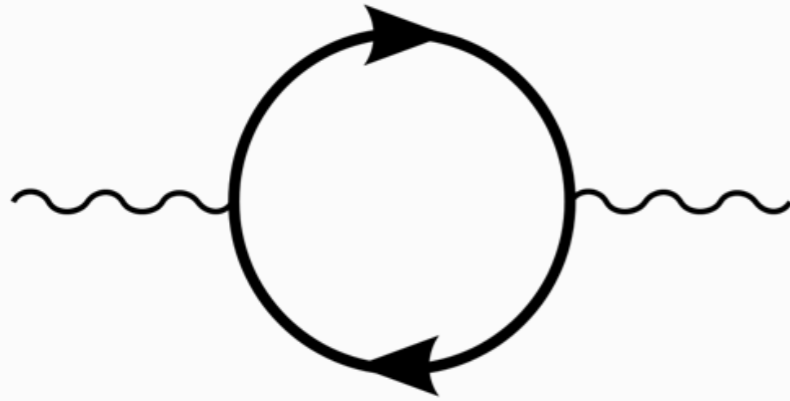
Polarización del vacío

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



Efecto Schwinger: creación de pares electrón-positrón en campos eléctricos muy fuertes.

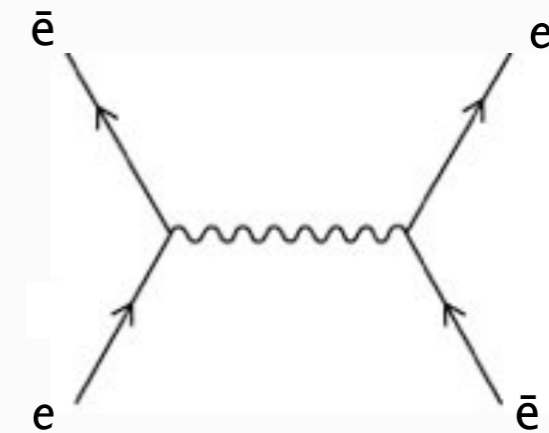
# Burbujas en el vacío



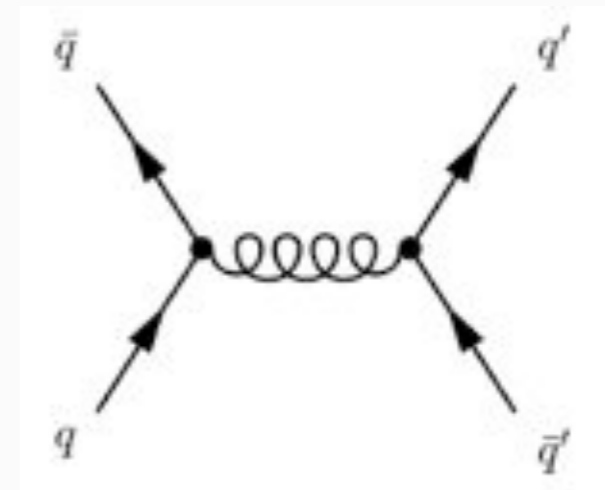
Polarización del vacío

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

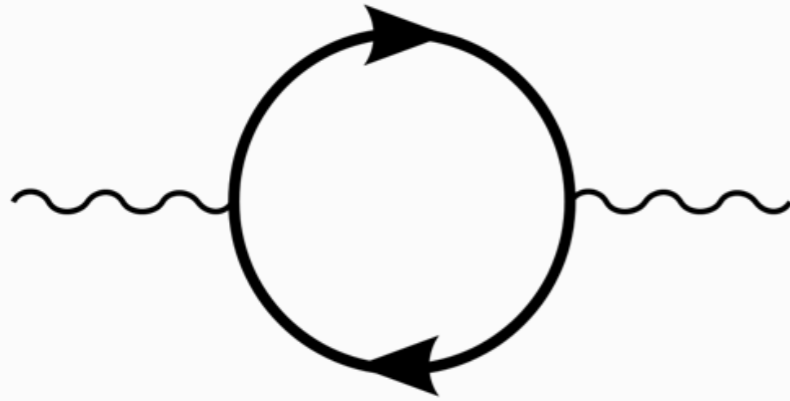
Electrodinámica: apantallamiento de la carga



Cromodinámica: ANTI-apantallamiento de la carga



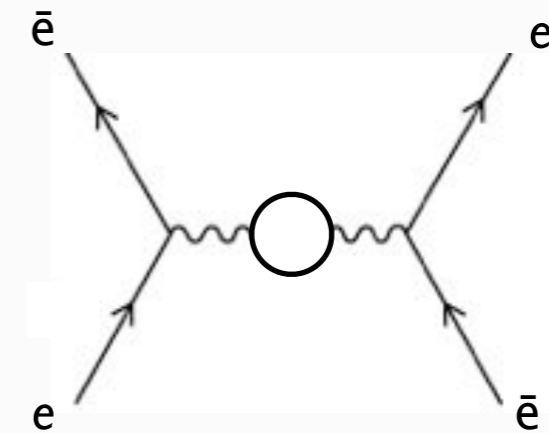
# Burbujas en el vacío



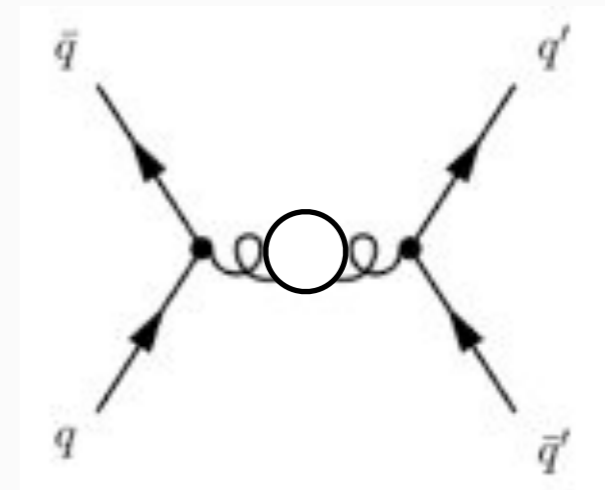
Polarización del vacío

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

Electrodinámica: apantallamiento de la carga

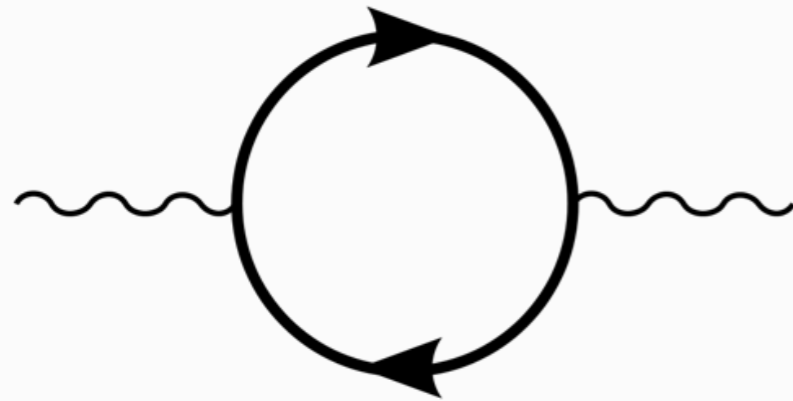


Cromodinámica: ANTI-apantallamiento de la carga





# Burbujas en el vacío

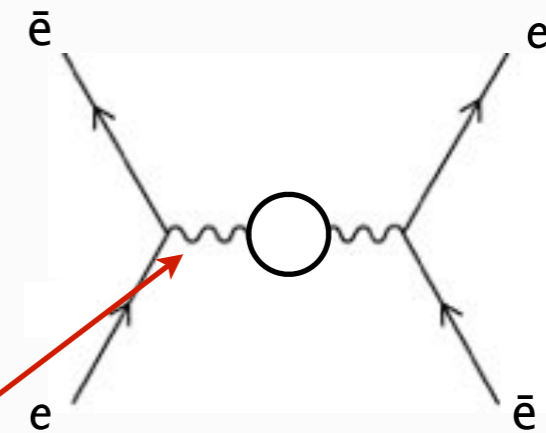


Polarización del vacío

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

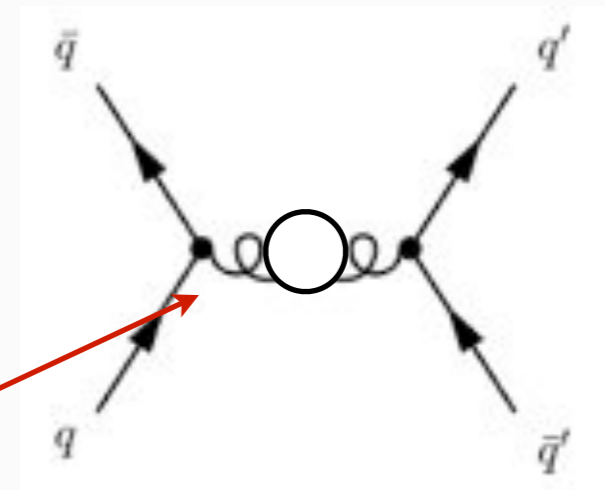
Electrodinámica: apantallamiento de la carga

el fotón NO lleva carga de eléctrica

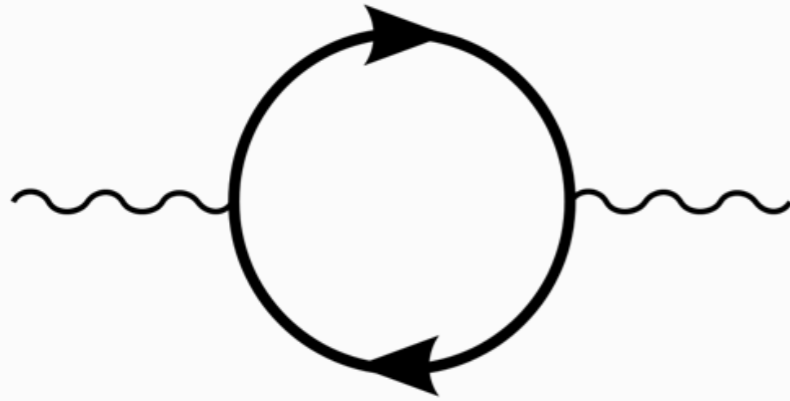


Cromodinámica: ANTI-apantallamiento de la carga

el gluon SÍ lleva carga de color



# Burbujas en el vacío

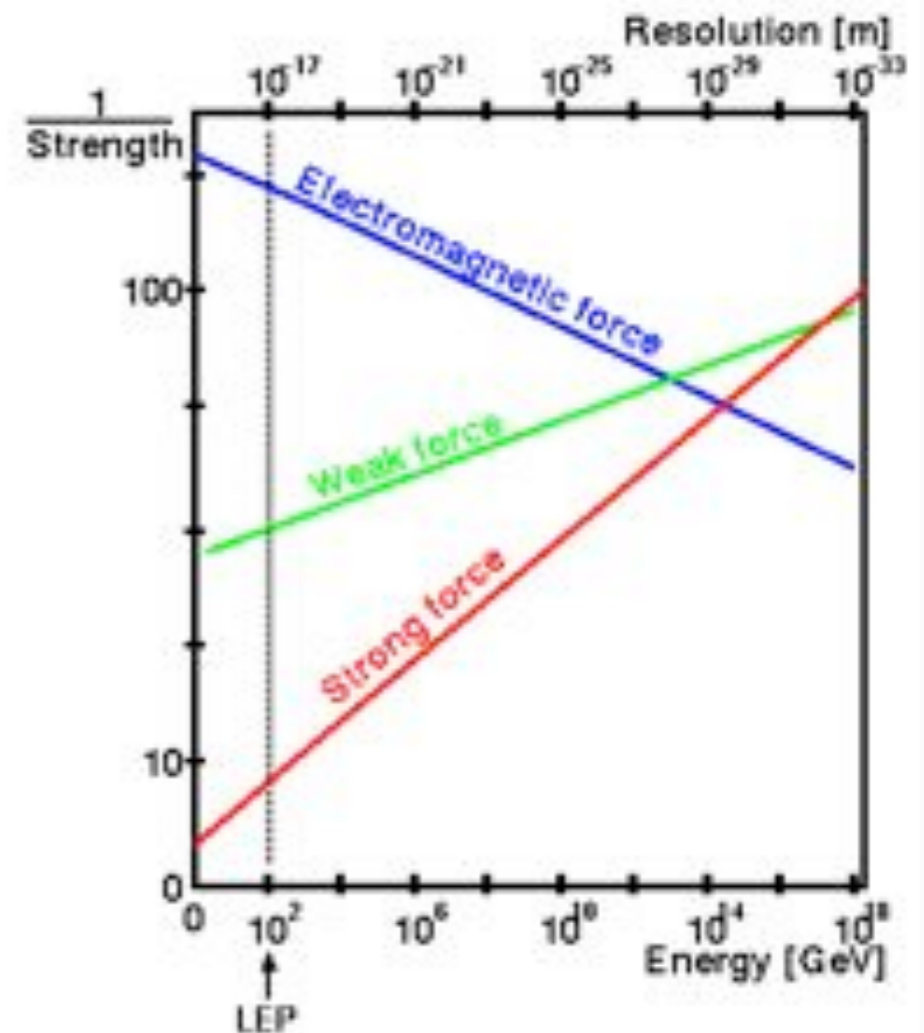


Polarización del vacío

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

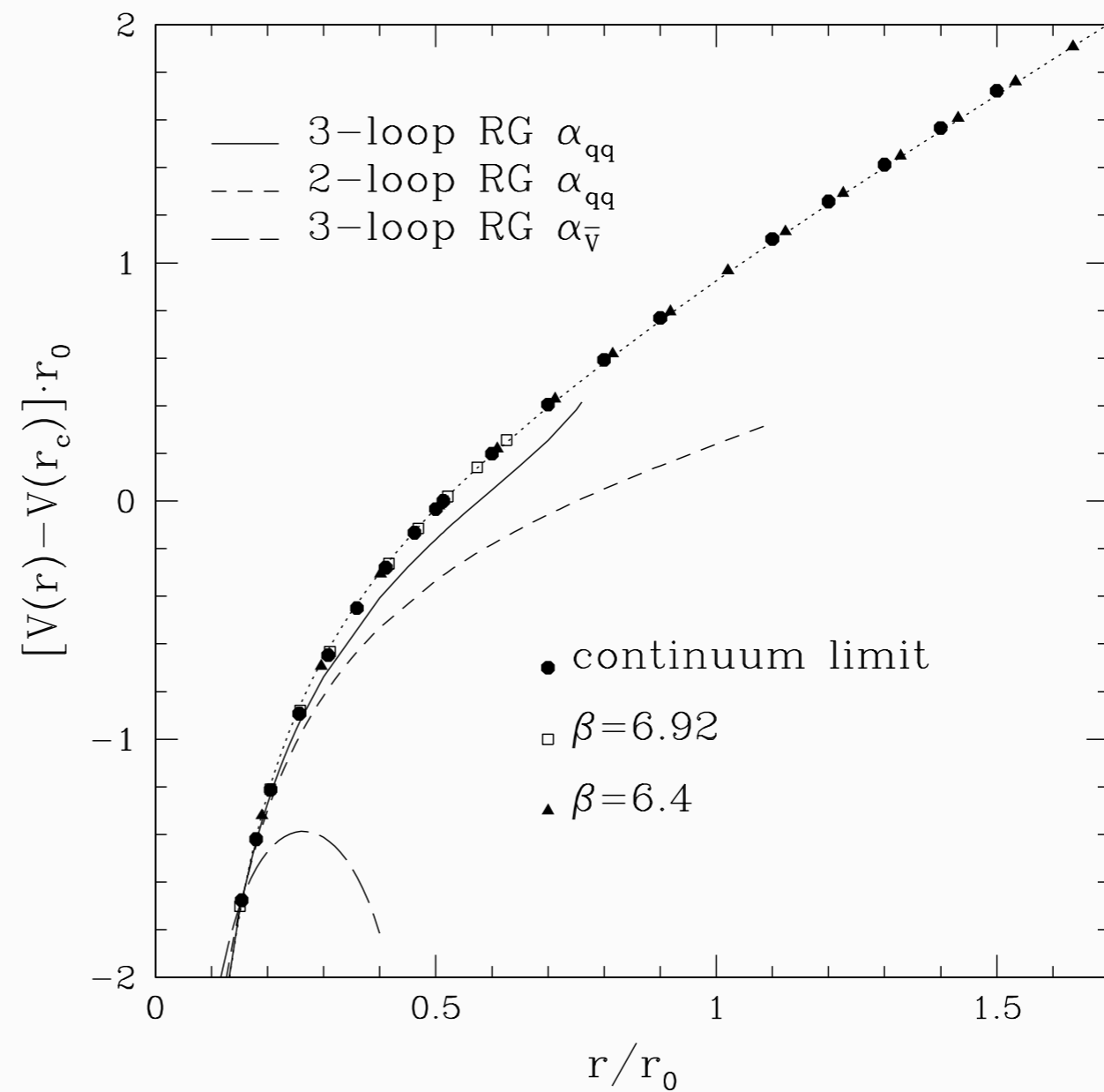
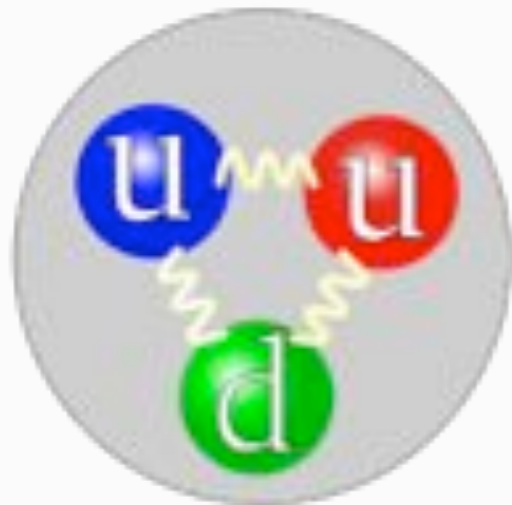
Electrodinámica: apantallamiento de la carga

Cromodinámica: ANTI-apantallamiento de la carga



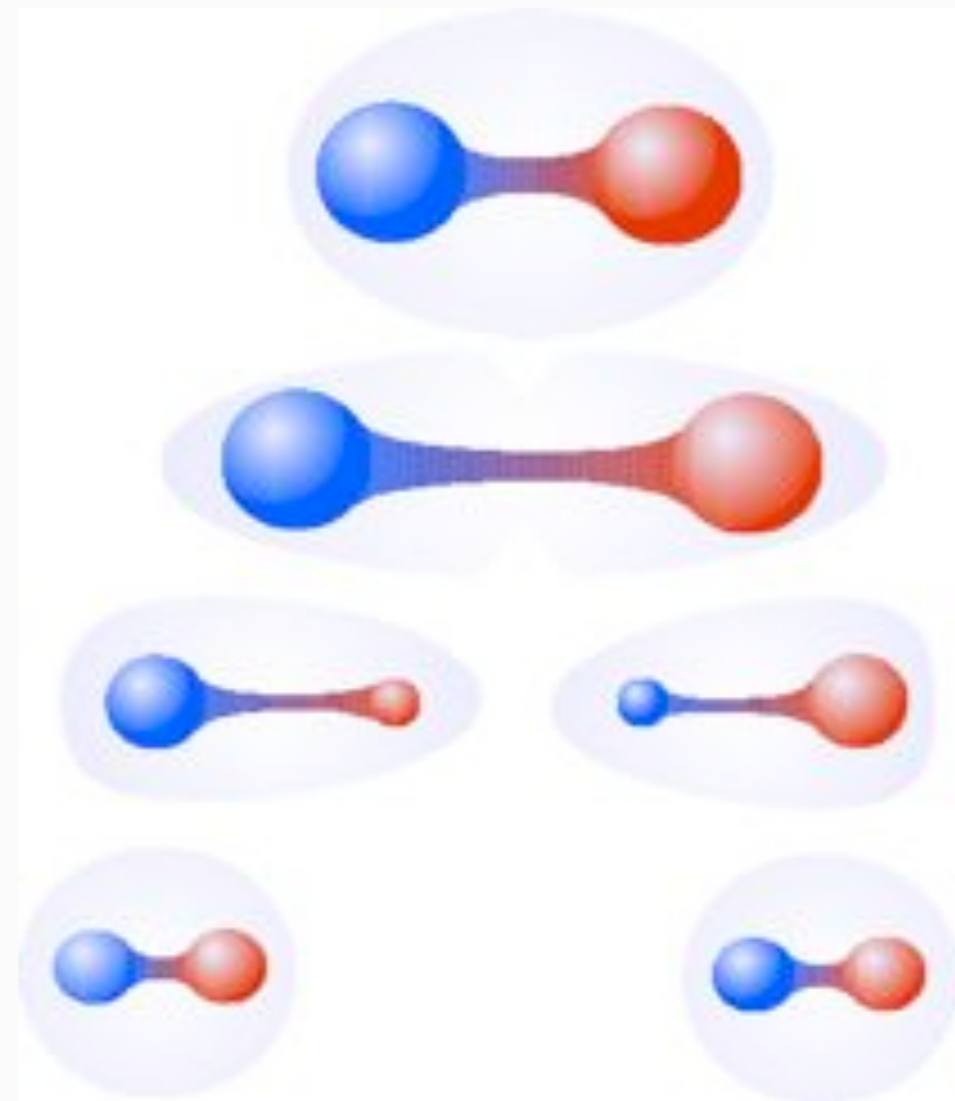
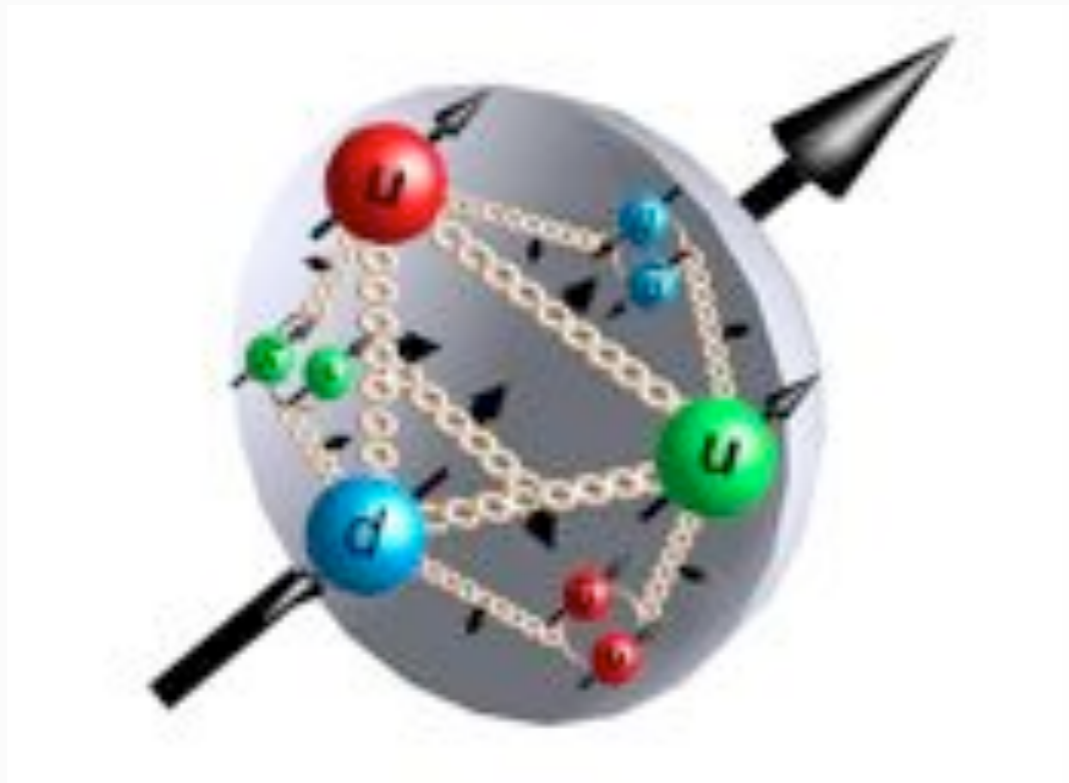
# Confinamiento

Los quarks no existen como partículas aisladas: sólo *confinados* en hadrones.



# Confinamiento

Los quarks no existen como partículas aisladas: sólo *confinados* en hadrones.

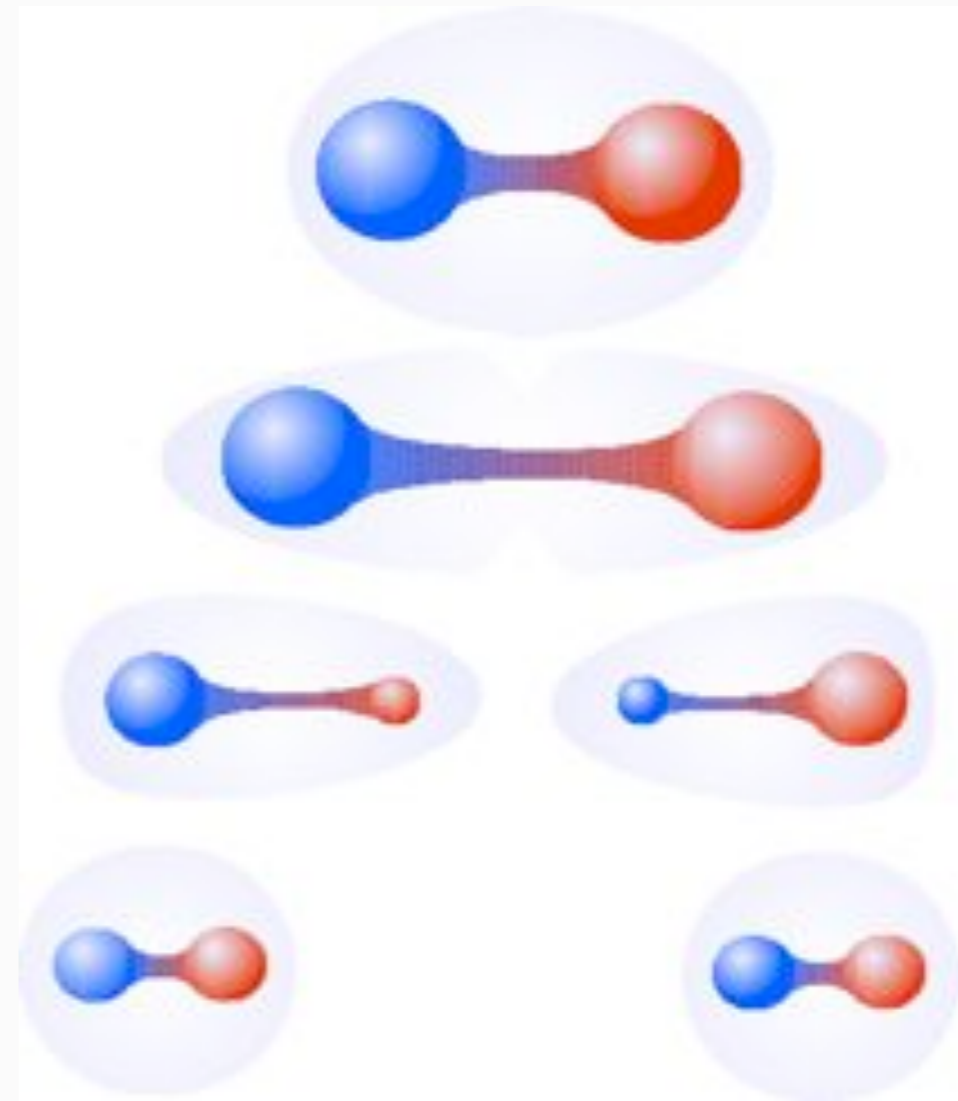
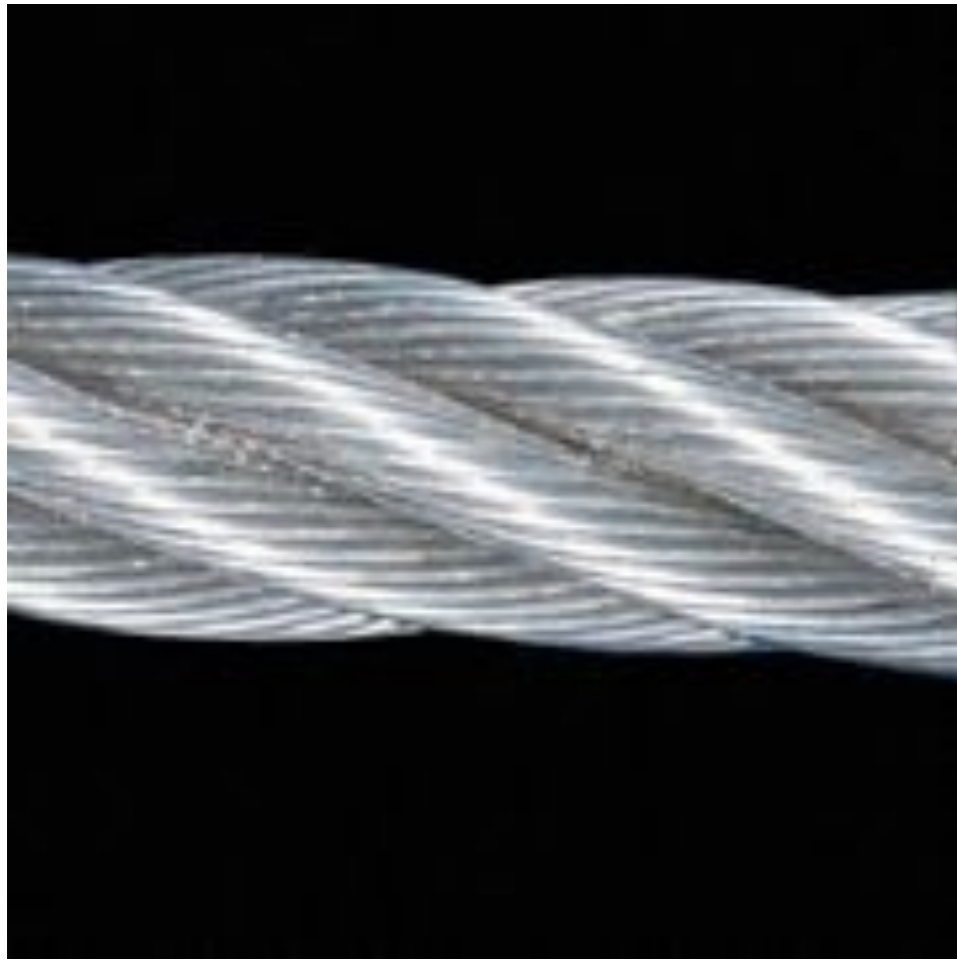


Al alejar los quarks la tensión entre ellos es suficiente para excitar un par quark-antiquark en el vacío. La cuerda se rompe y se forman dos hadrones. (Similar a lo que ocurre al intentar separar los polos de un imán.)



# Confinamiento

Los quarks no existen como partículas aisladas: sólo *confinados* en hadrones.



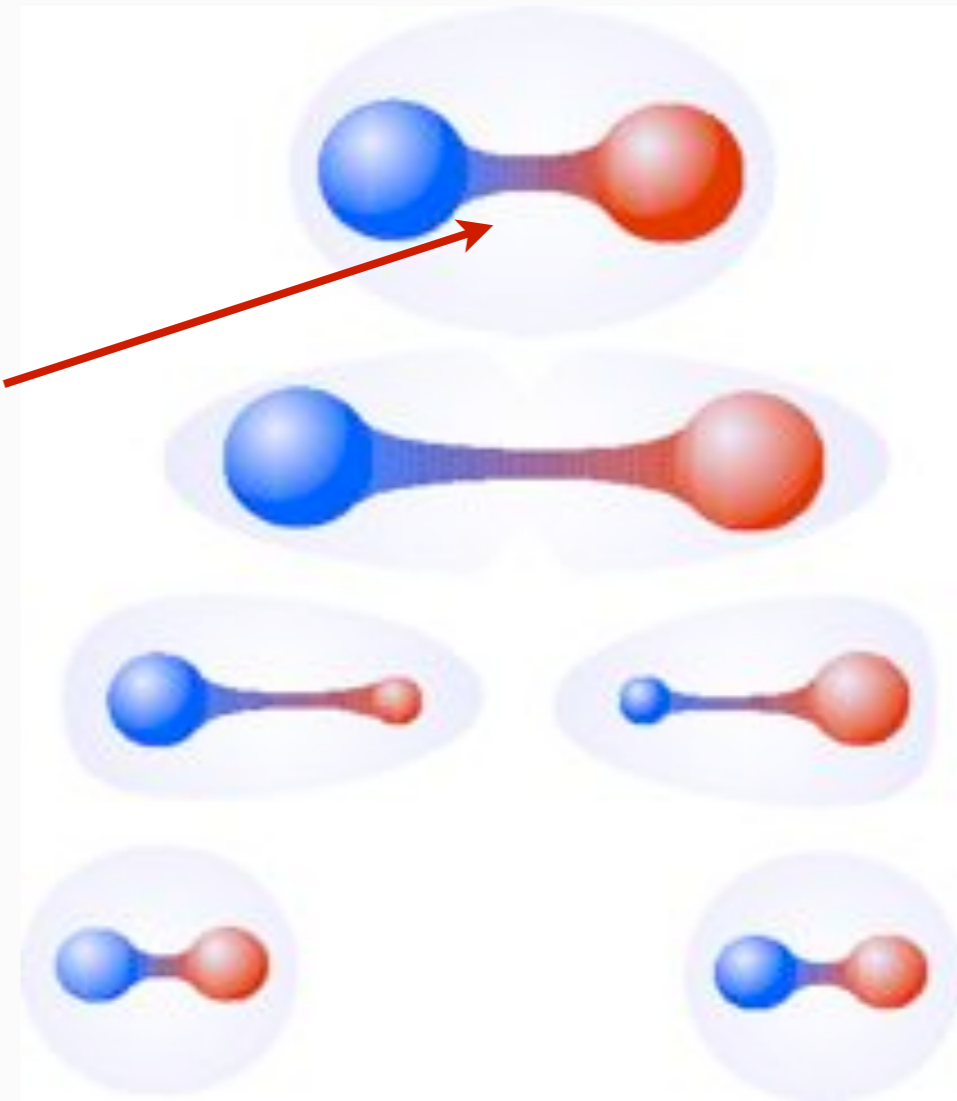
La tensión de la “cuerda” quark-antiquark es similar a la de un cable de acero, pero está concentrada en una sección 13 órdenes de magnitud menor.

# Confinamiento

Los quarks no existen como partículas aisladas: sólo *confinados* en hadrones.

$$F \sim 10^5 \text{ N}$$

$$\sigma \approx (0.4 \text{ GeV})^2$$

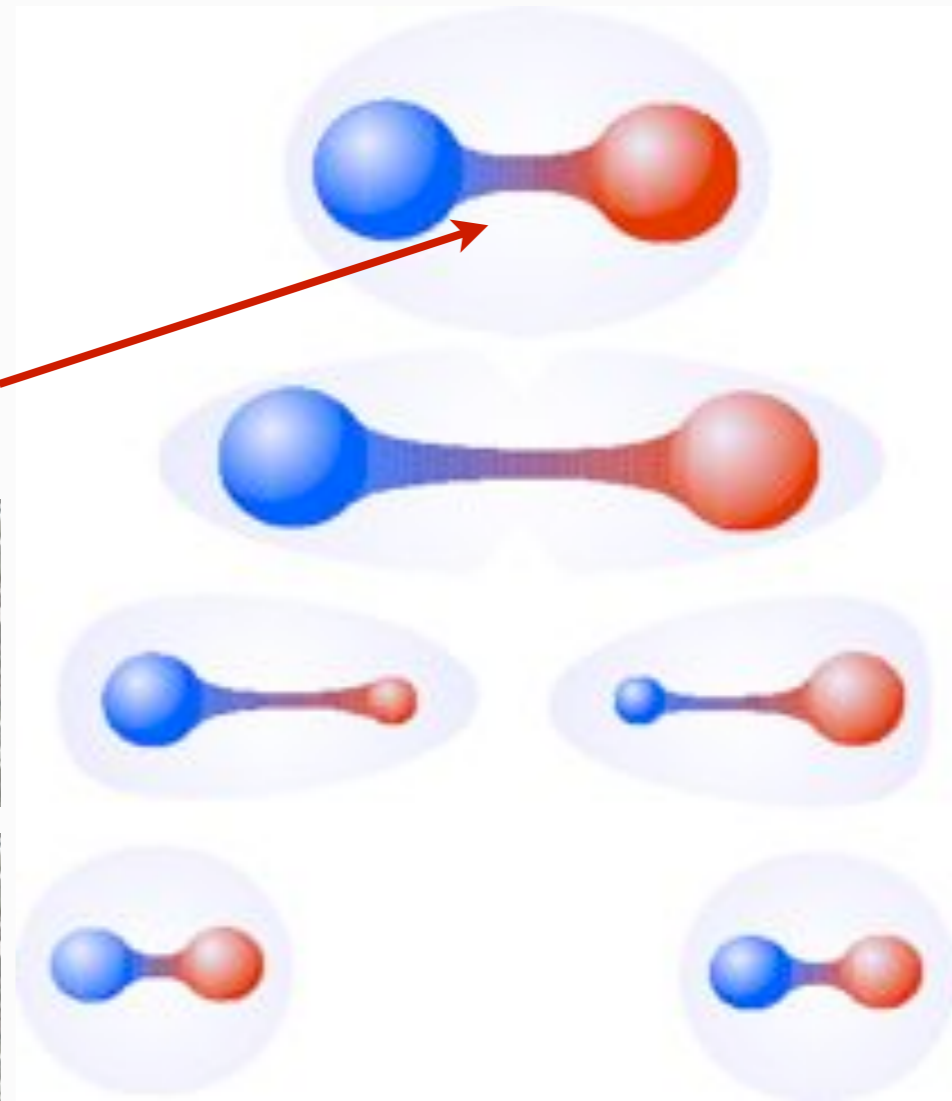


# Confinamiento

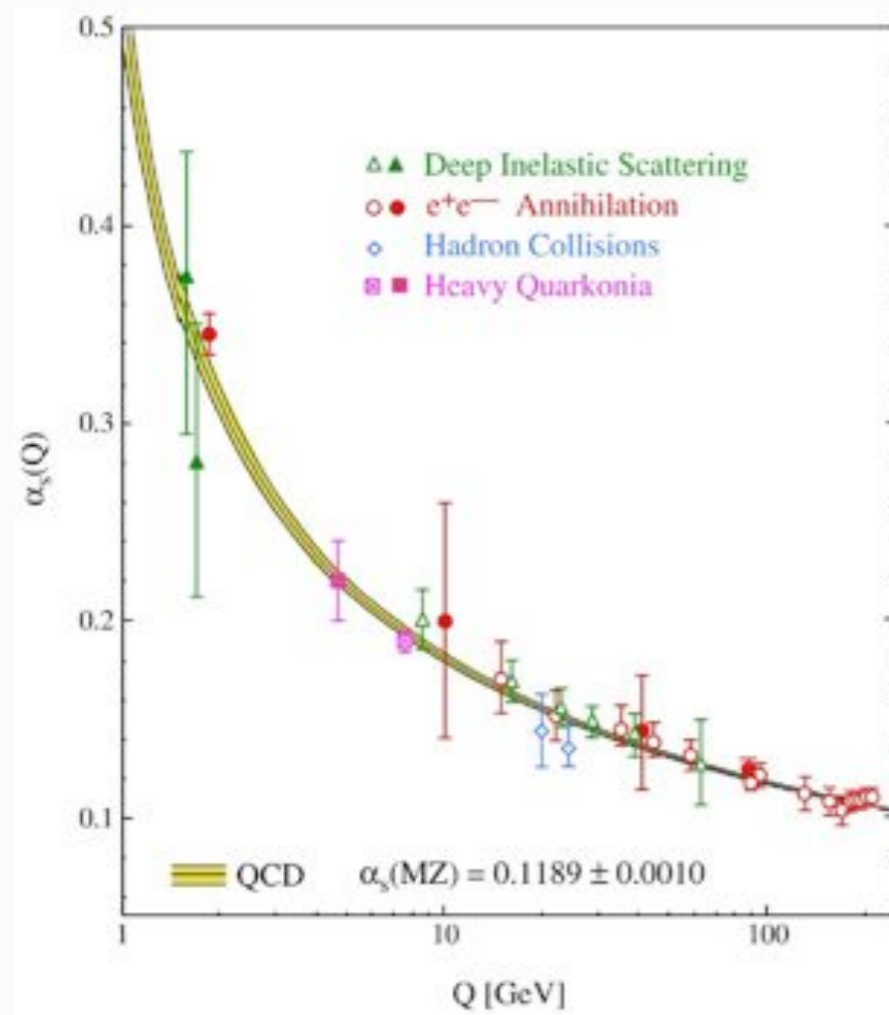
Los quarks no existen como partículas aisladas: sólo *confinados* en hadrones.

$$F \sim 10^5 \text{ N}$$

$$\sigma \approx (0.4 \text{ GeV})^2$$

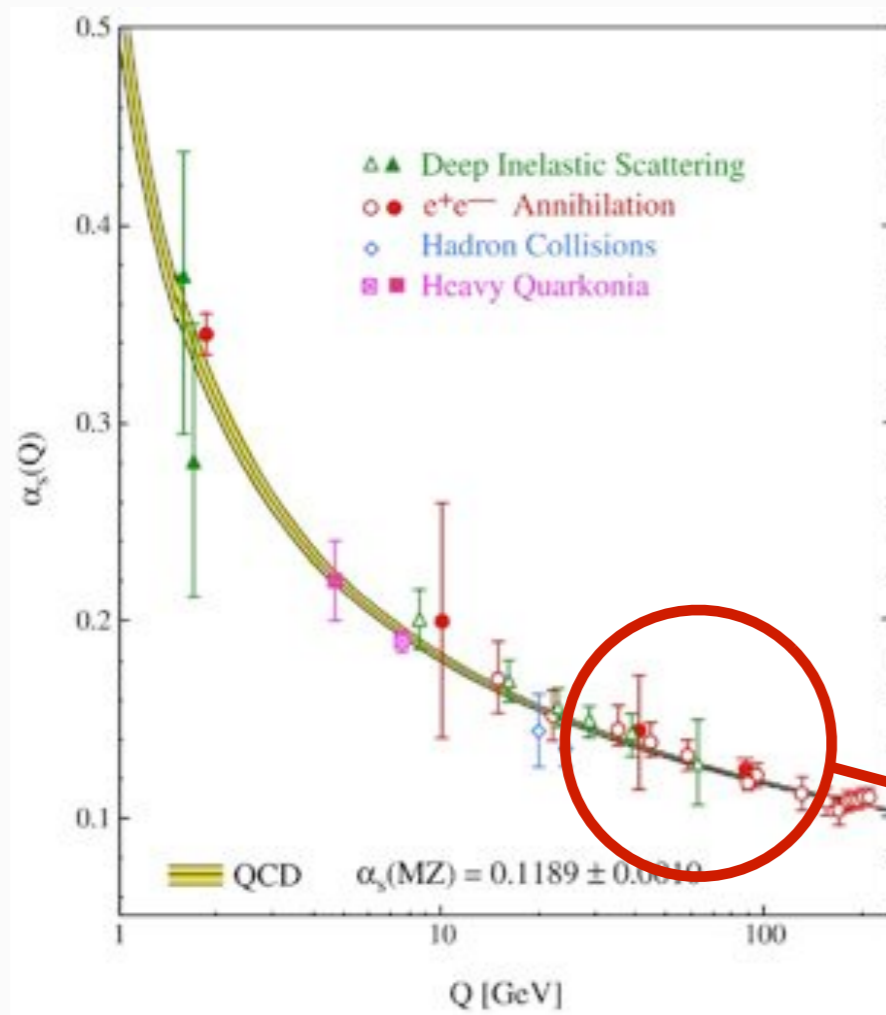


# Física de interacción fuerte a cortas distancias

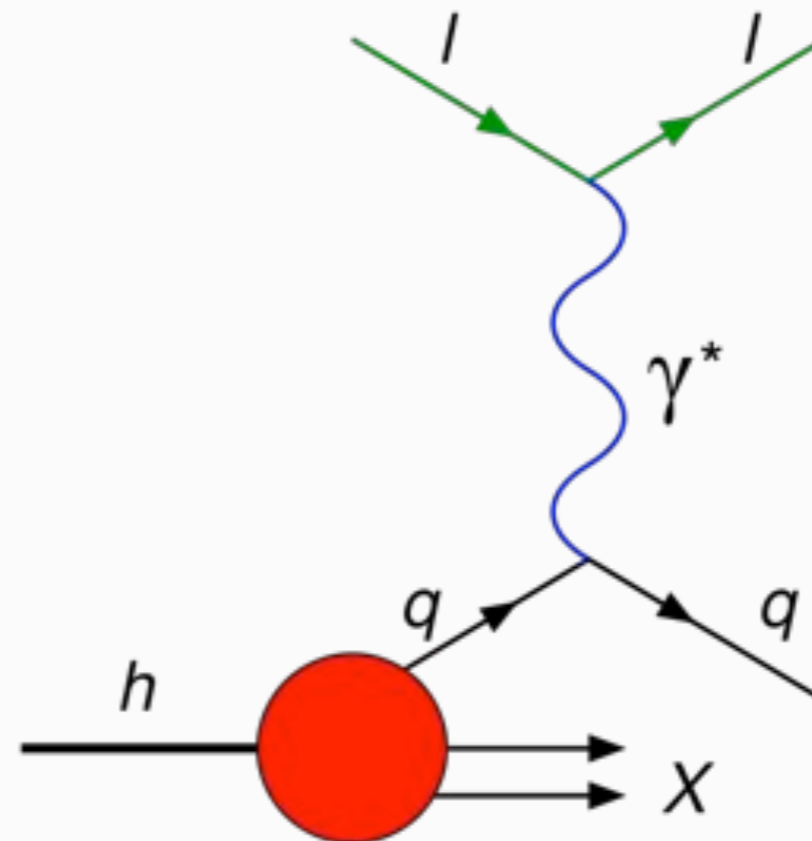
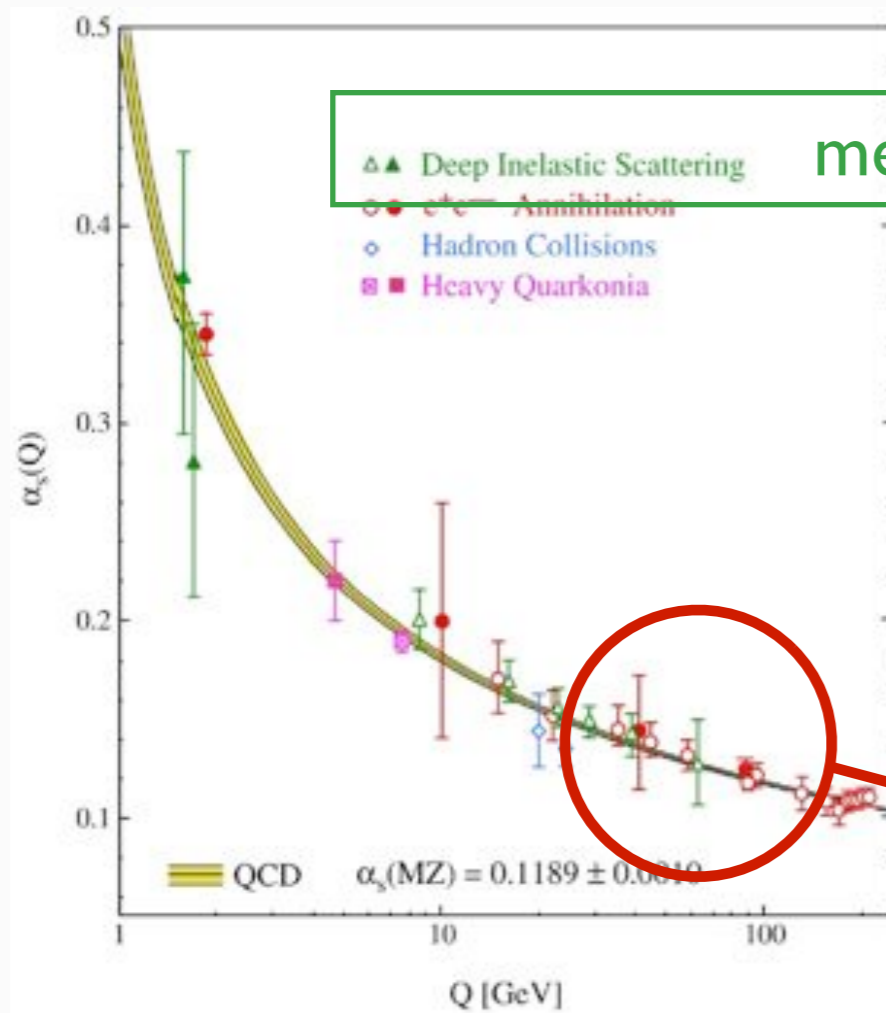




# Física de interacción fuerte a cortas distancias

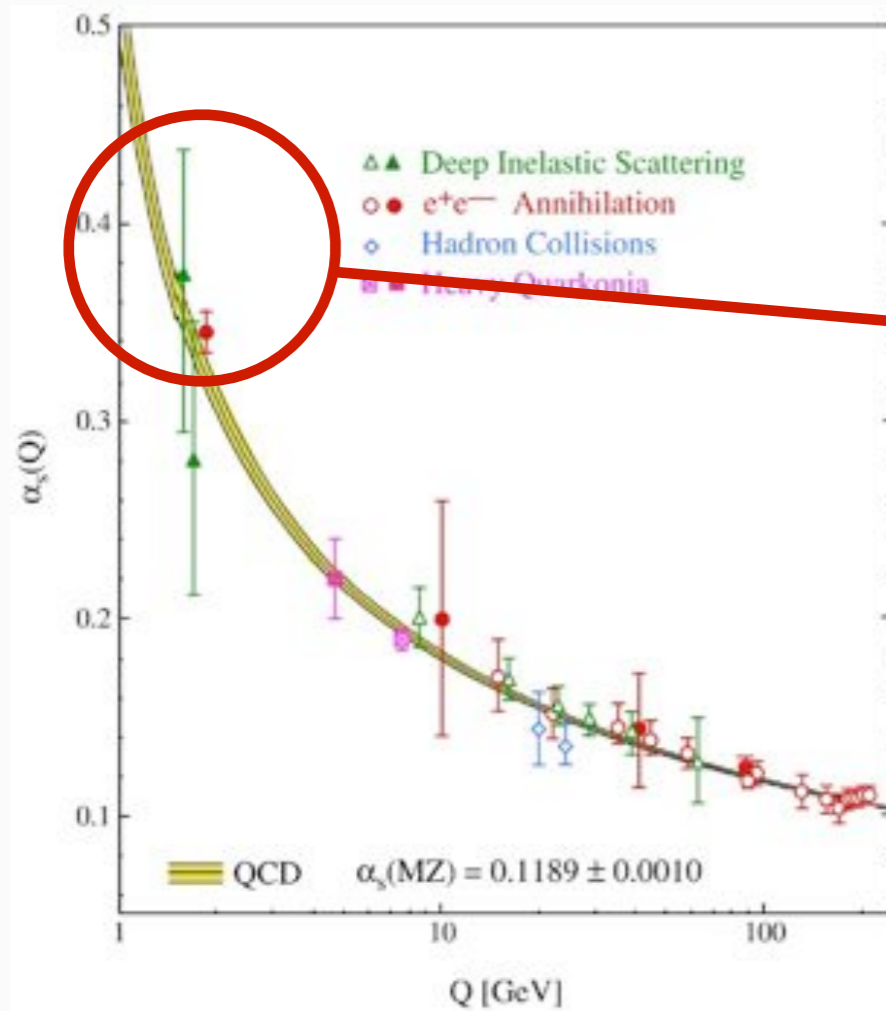


# Física de interacción fuerte a cortas distancias



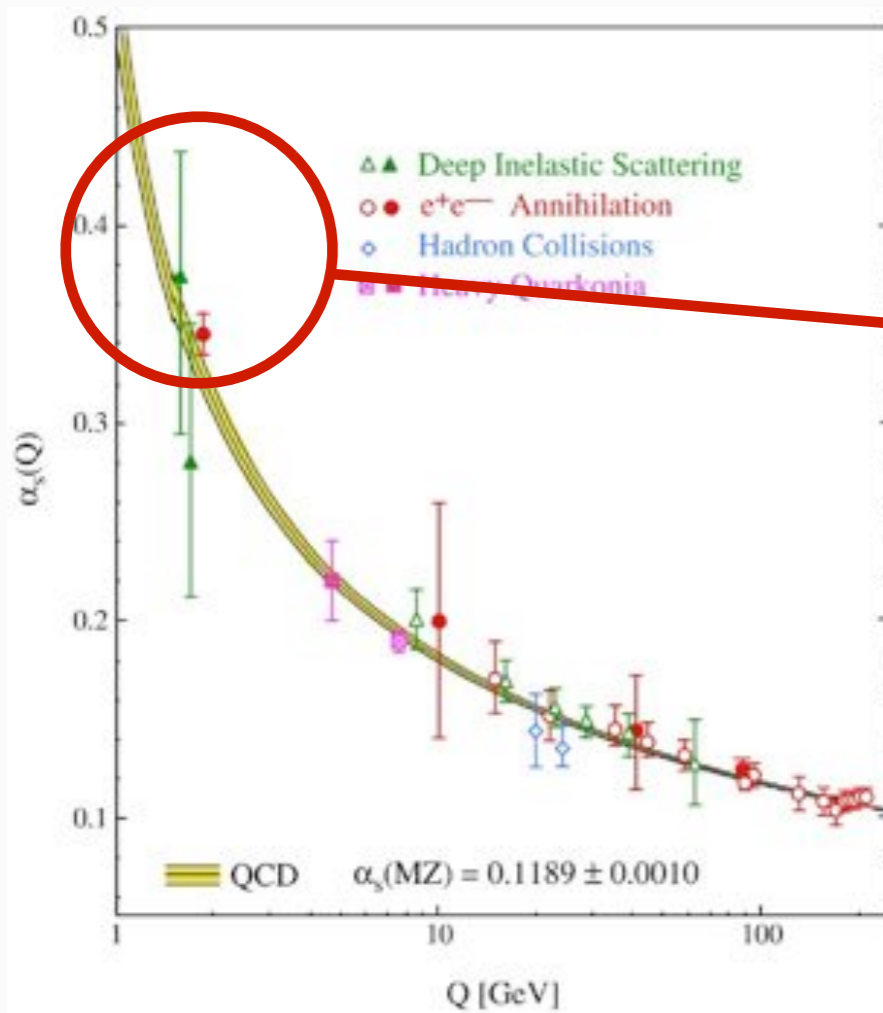
Un electrón de alta energía “ve” los quarks como partículas casi libres, constituyentes del protón (“partones”).

# Física de interacción fuerte a largas distancias

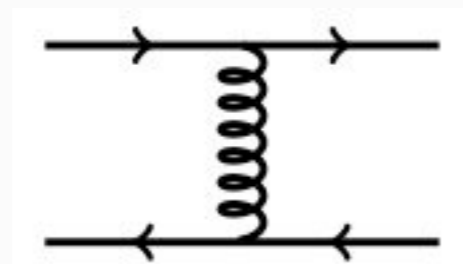


Los diagramas de Feynman (“teoría de perturbaciones”) son inútiles.

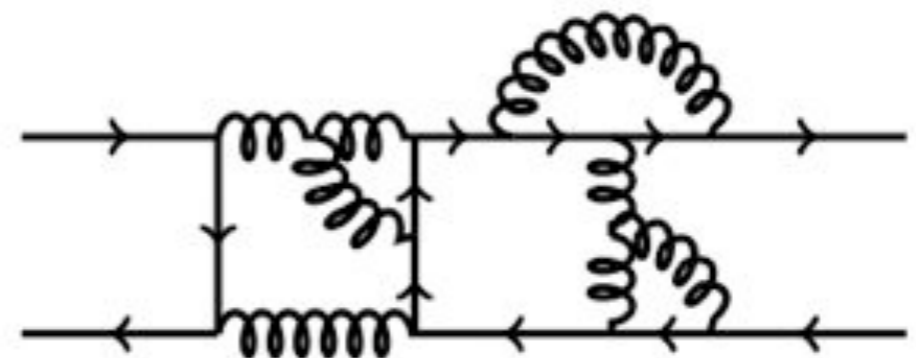
# Física de interacción fuerte a largas distancias



Los diagramas de Feynman (“teoría de perturbaciones”) son inútiles.



$\alpha_s$



$\alpha_s^6$

$$\alpha_s \sim 1, \quad \alpha_{em} \sim 0.01$$



# Física de interacción fuerte a largas distancias

---

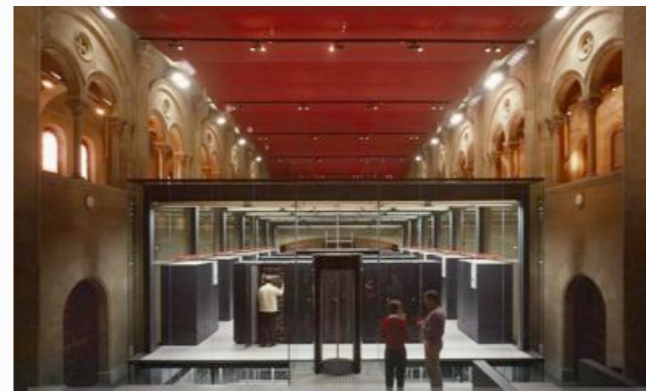
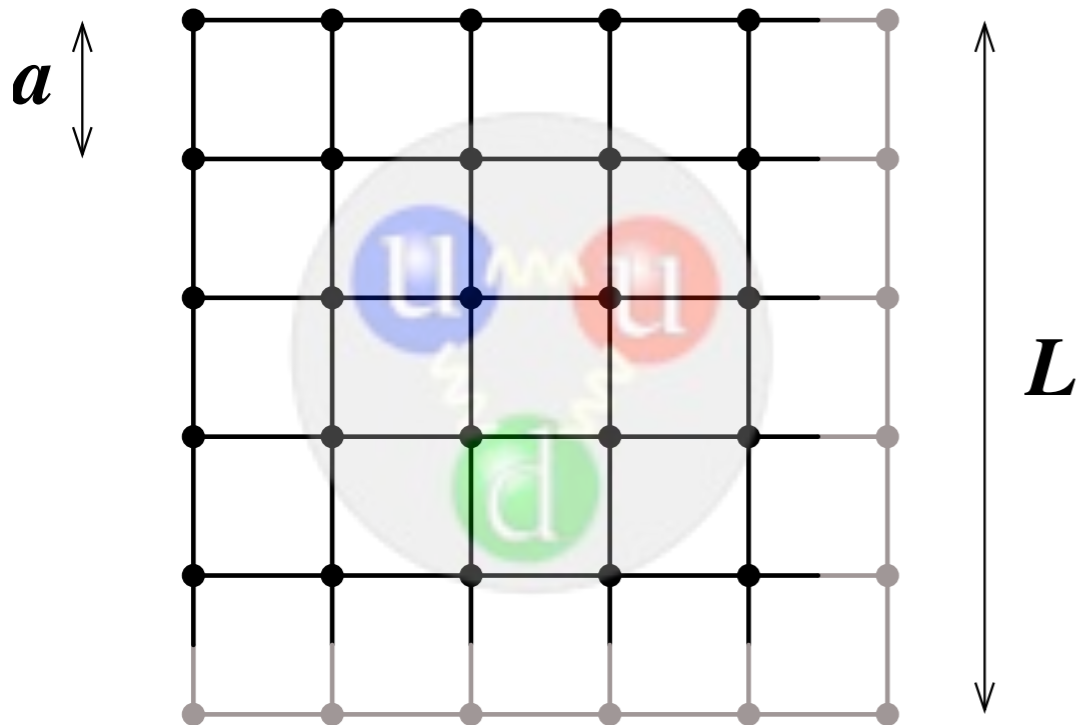
Estudiar las propiedades de los hadrones (protones, neutrones, ...) requiere una formulación nueva de la teoría cuántica de campos, capaz de afrontar el régimen de “acoplamiento fuerte”.

# Física de interacción fuerte a largas distancias

Estudiar las propiedades de los hadrones (protones, neutrones, ...) requiere una formulación nueva de la teoría cuántica de campos, capaz de afrontar el régimen de “acoplamiento fuerte”.

QCD en la red (“Lattice QCD”)

Wilson 1974



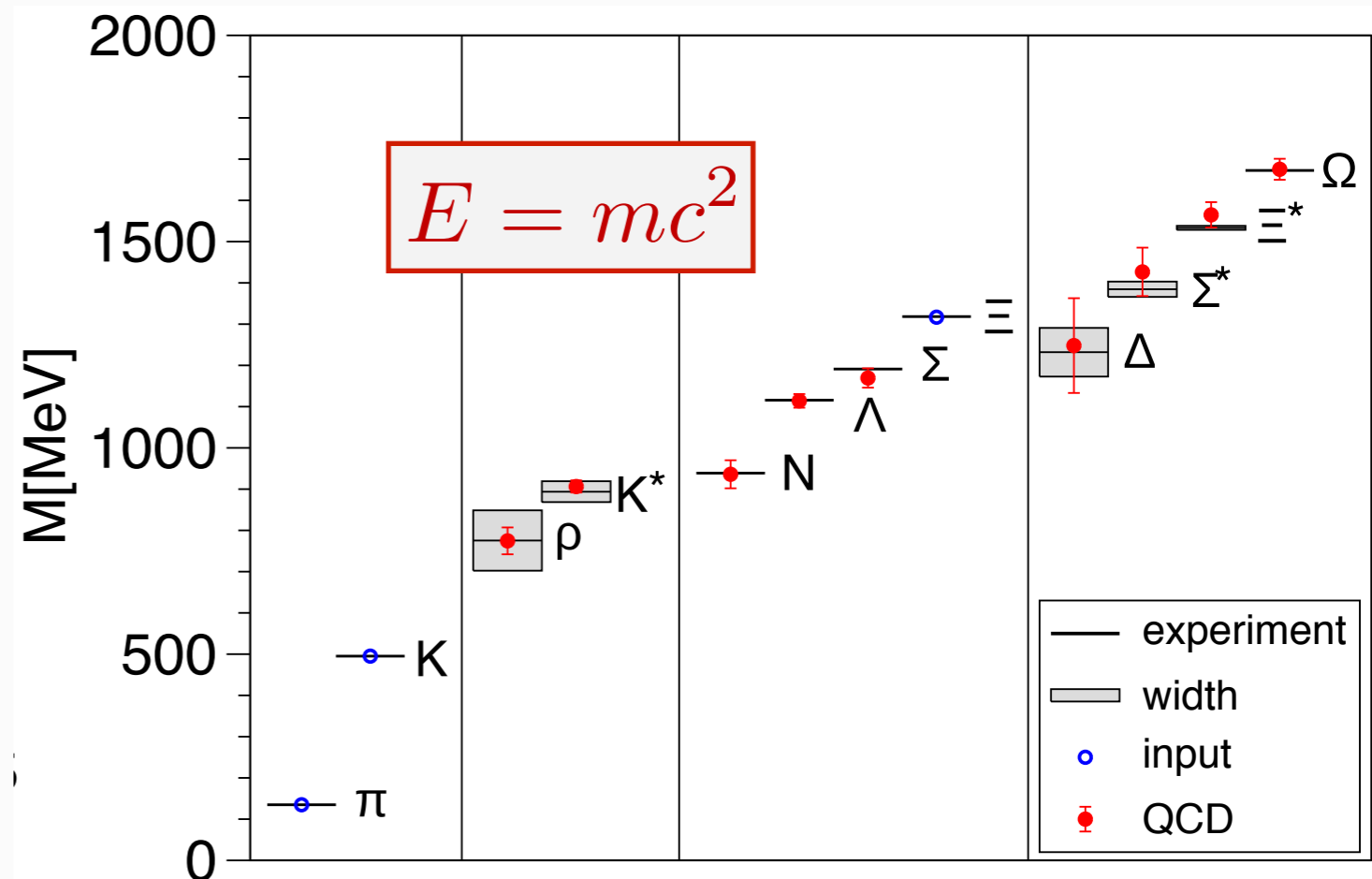
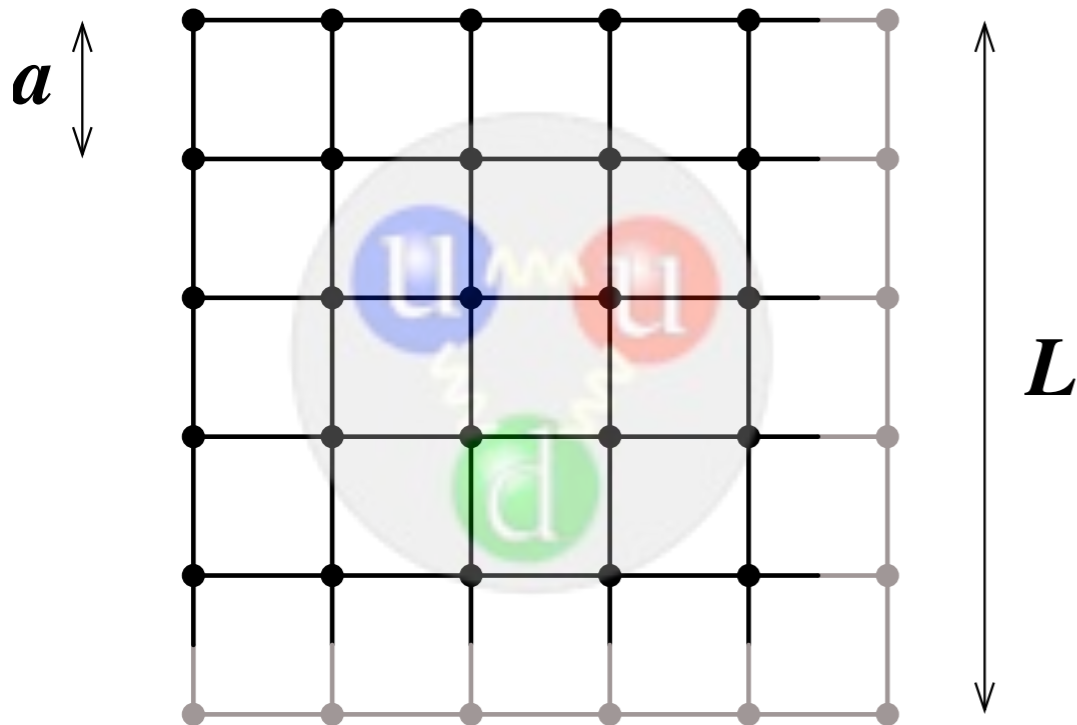
Permite resolver el problema mediante el uso de superordenadores.

# Física de interacción fuerte a largas distancias

Estudiar las propiedades de los hadrones (protones, neutrones, ...) requiere una formulación nueva de la teoría cuántica de campos, capaz de afrontar el régimen de “acoplamiento fuerte”.

QCD en la red (“Lattice QCD”)

Wilson 1974



# Plan

- La composición del Universo.
  - Materia ordinaria y componentes oscuros.
  - El interior del núcleo atómico: nucleones y quarks.
  - ¿Cuál es el origen de la masa?
- Cromodinámica cuántica.
  - Libertad asintótica y confinamiento.
  - Alta energía: el régimen perturbativo.
  - Baja energía: el régimen no perturbativo.
- La interacción fuerte en la Física de Altas Energías de nuestros días.
  - Temperatura y densidad altísimas: ¿plasma de quarks y gluones?
  - La interacción fuerte en LHC.



# El diagrama de fases de la interacción fuerte

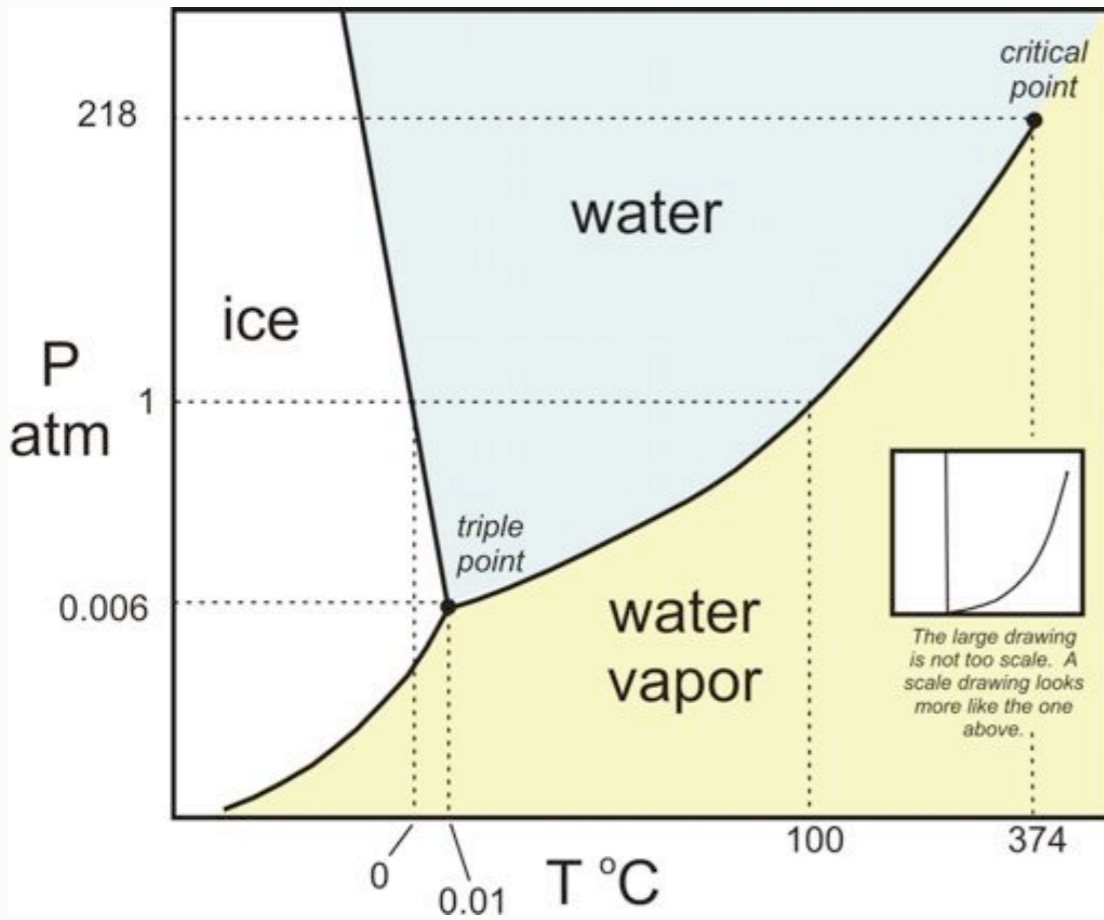


Diagrama de fases del agua

# El diagrama de fases de la interacción fuerte

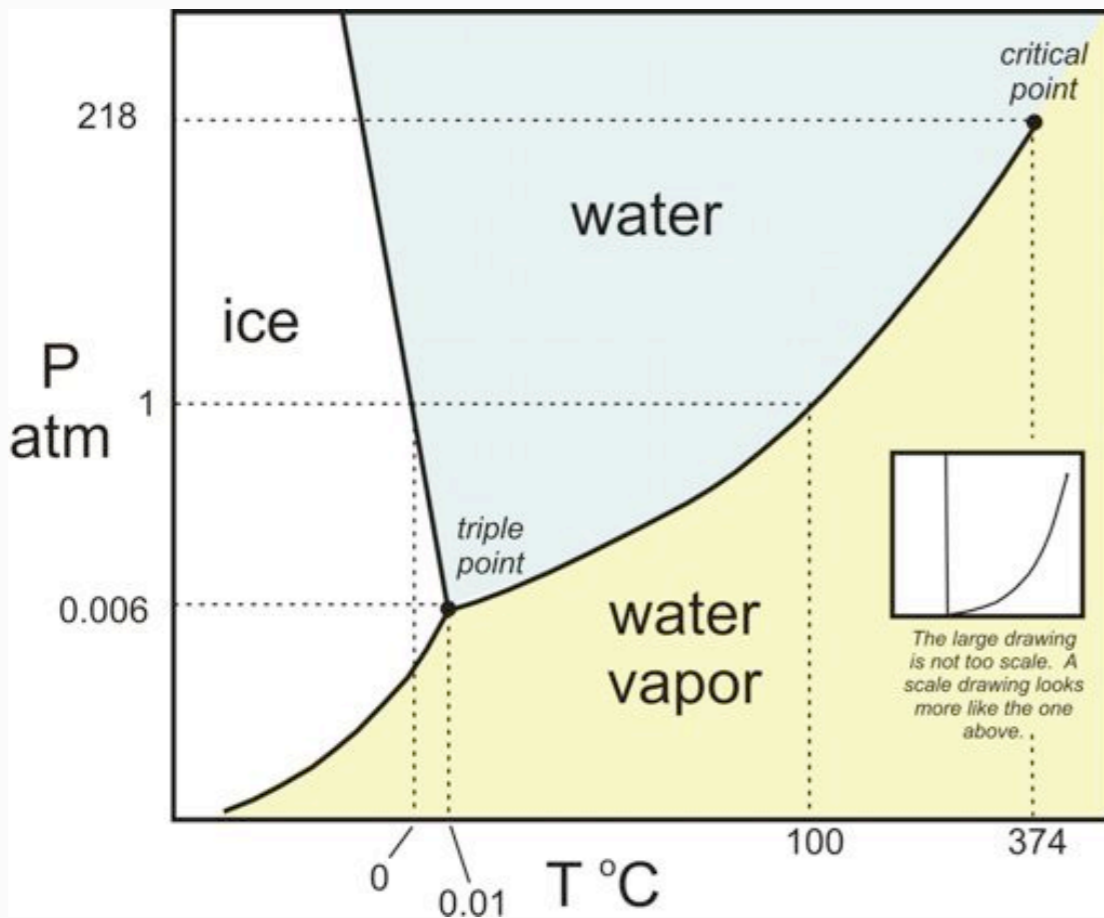
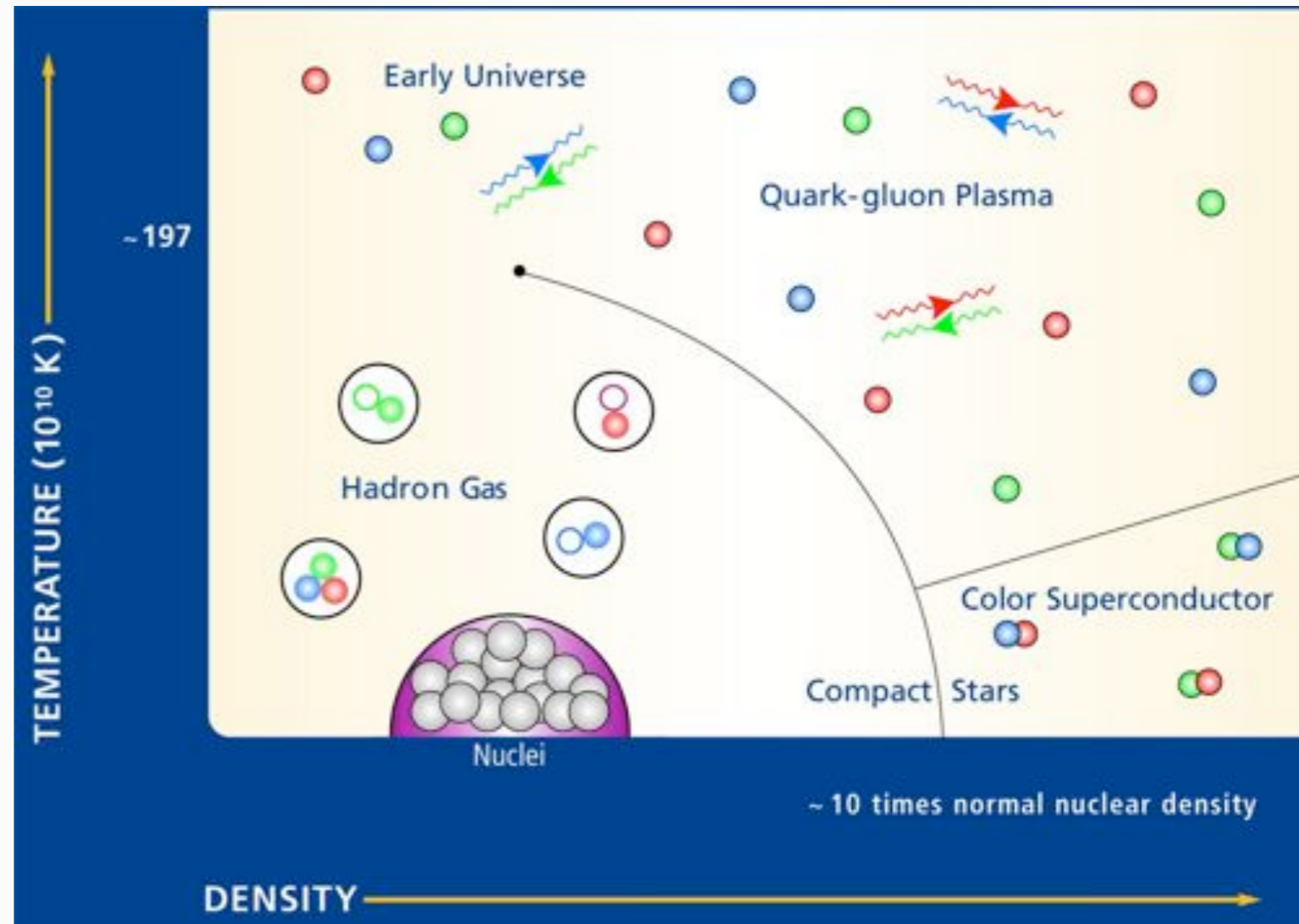


Diagrama de fases del agua

Diagrama de fases de la interacción fuerte



# El diagrama de fases de la interacción fuerte

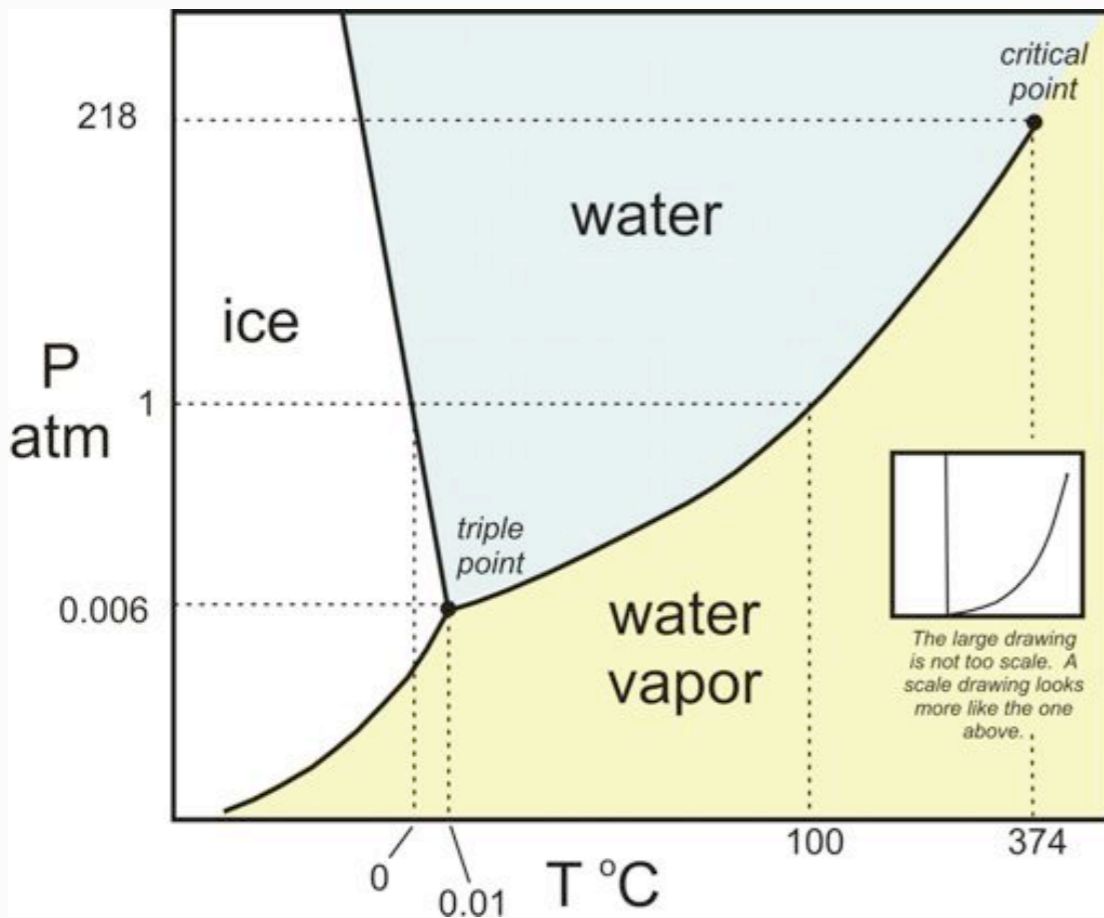


Diagrama de fases del agua

A alta temperatura/densidad los quarks y gluones dejan de estar confinados.

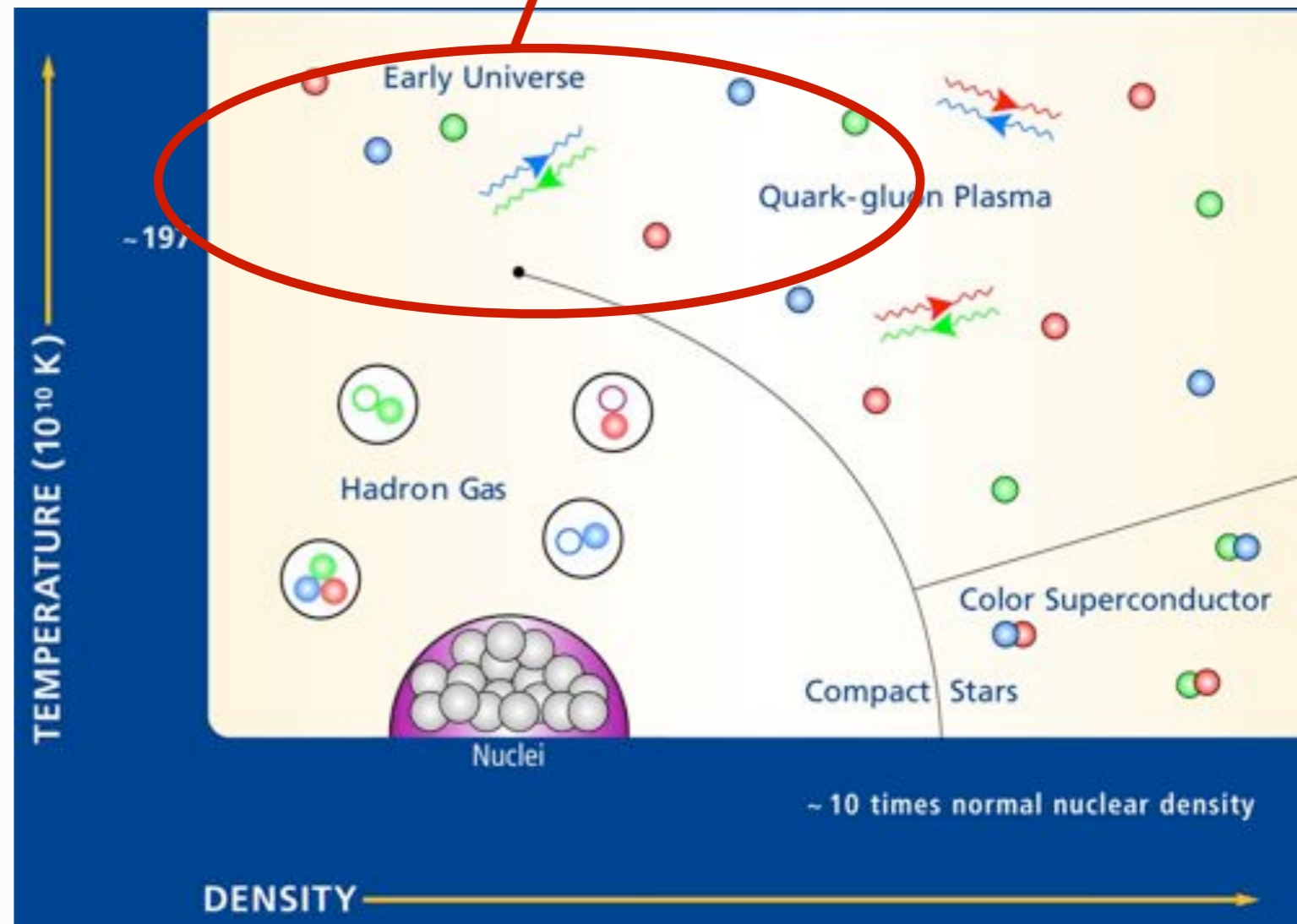


Diagrama de fases de la interacción fuerte



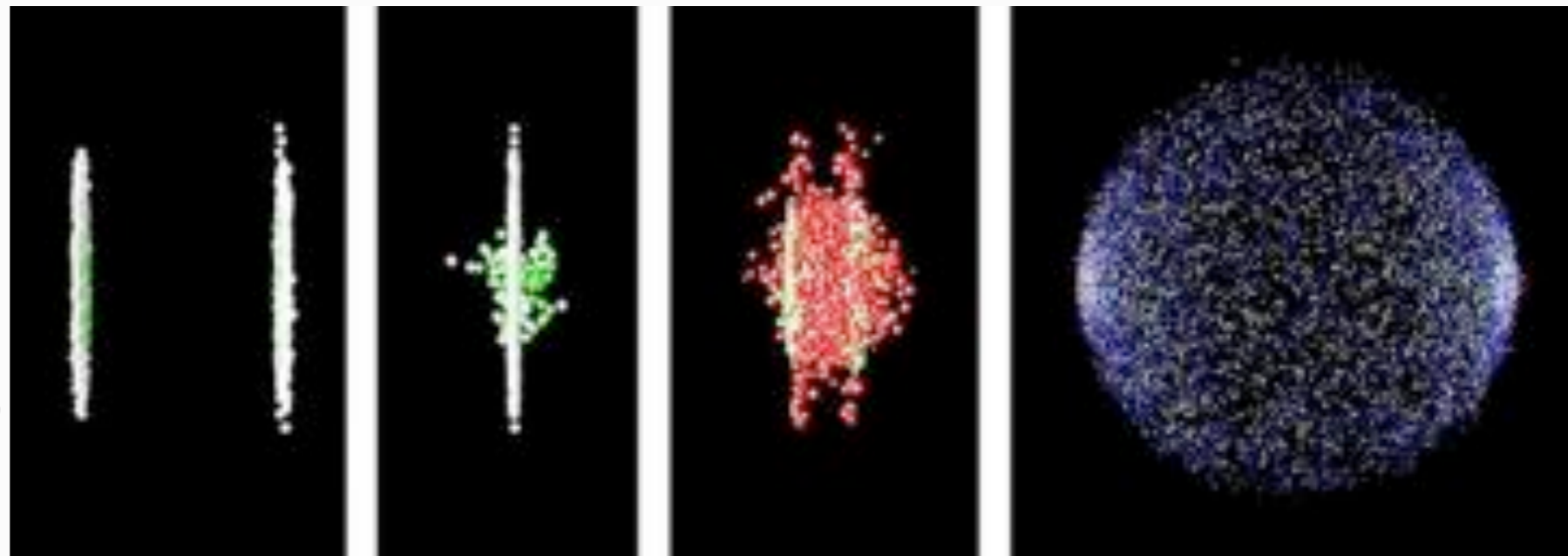
# Buscando el plasma de quarks y gluones



Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC).  
Brookhaven, New York.

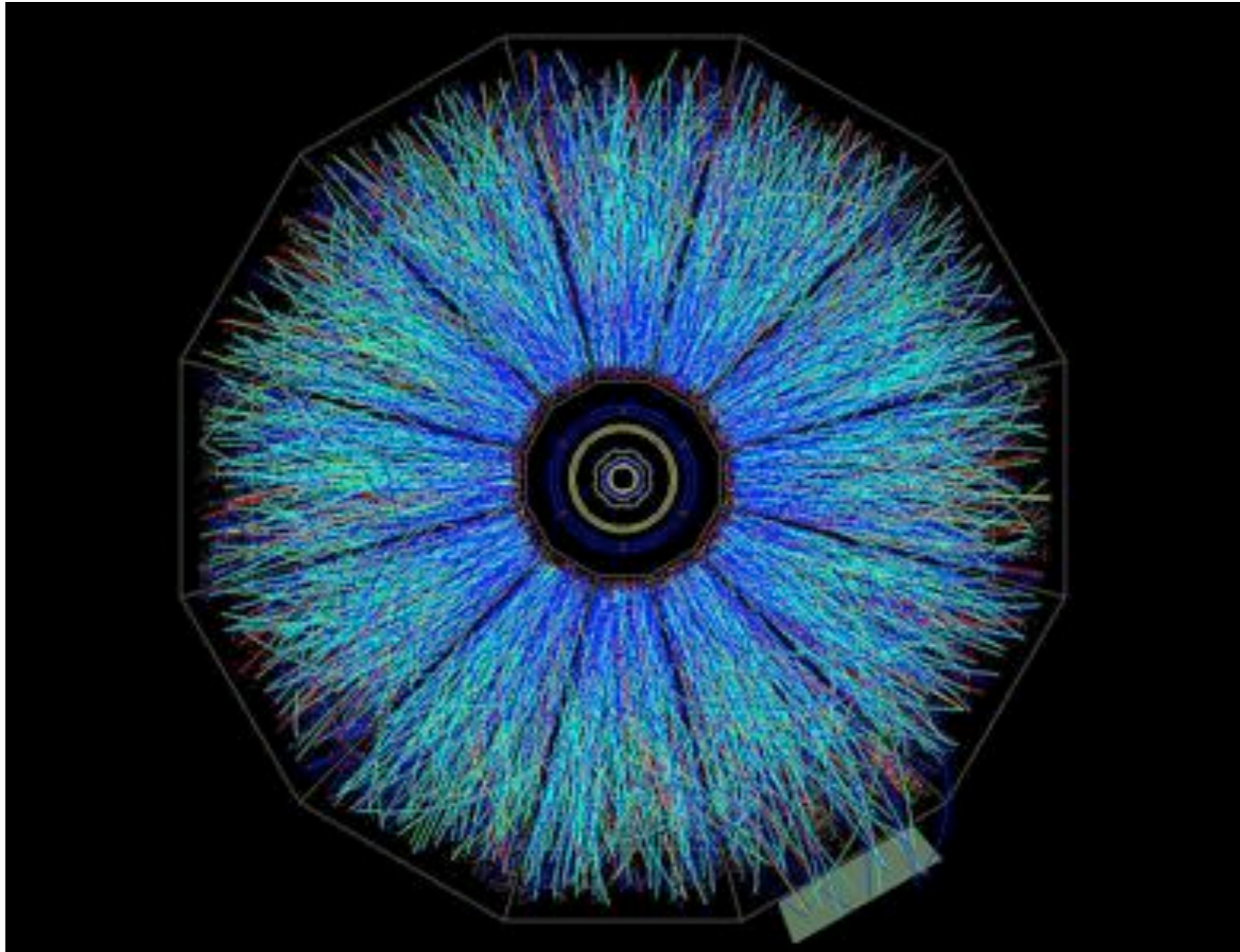
Colisiona núcleos de oro

(79 protones, 118 neutrones)





# Buscando el plasma de quarks y gluones



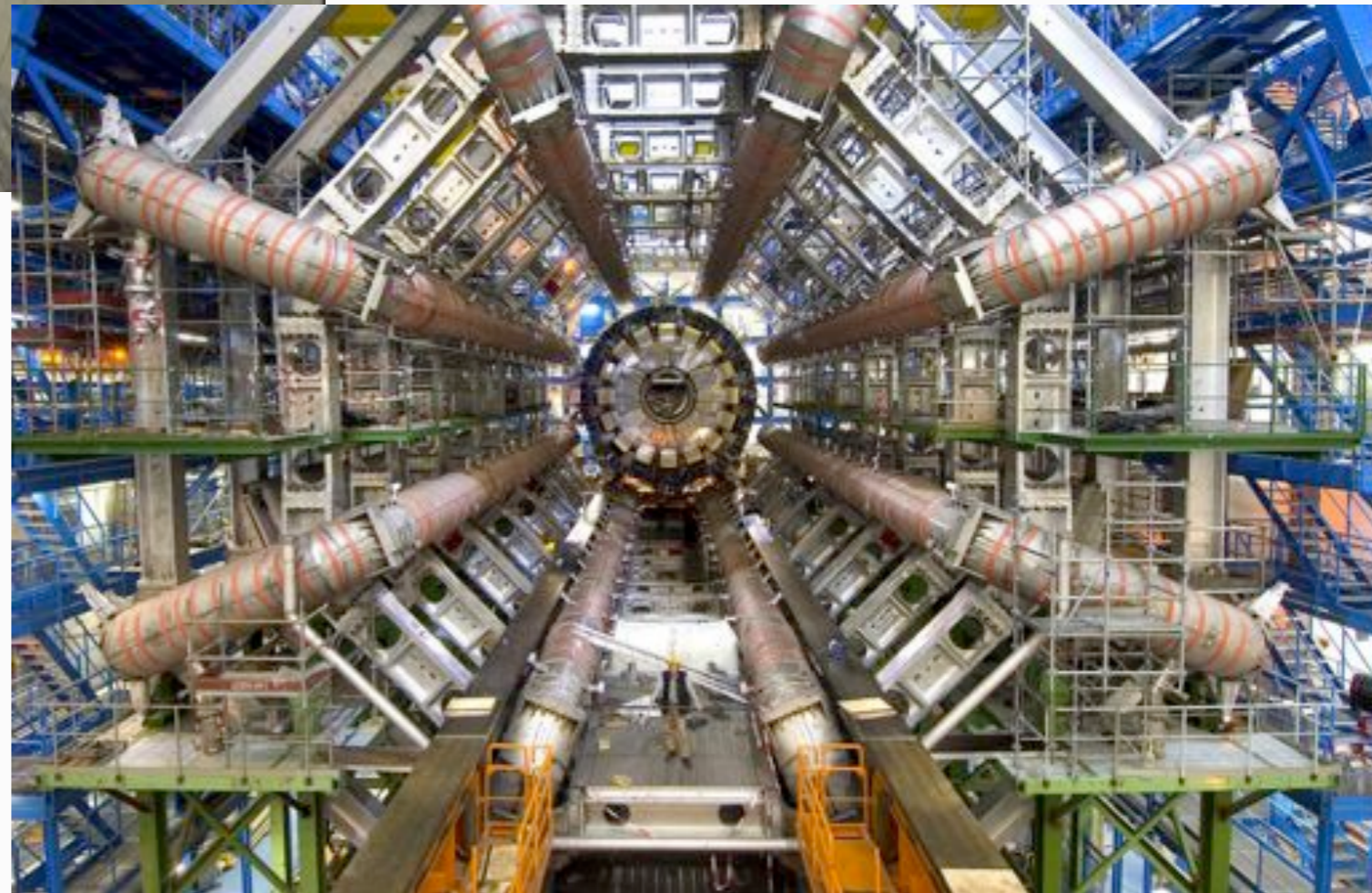


# La interacción fuerte en LHC





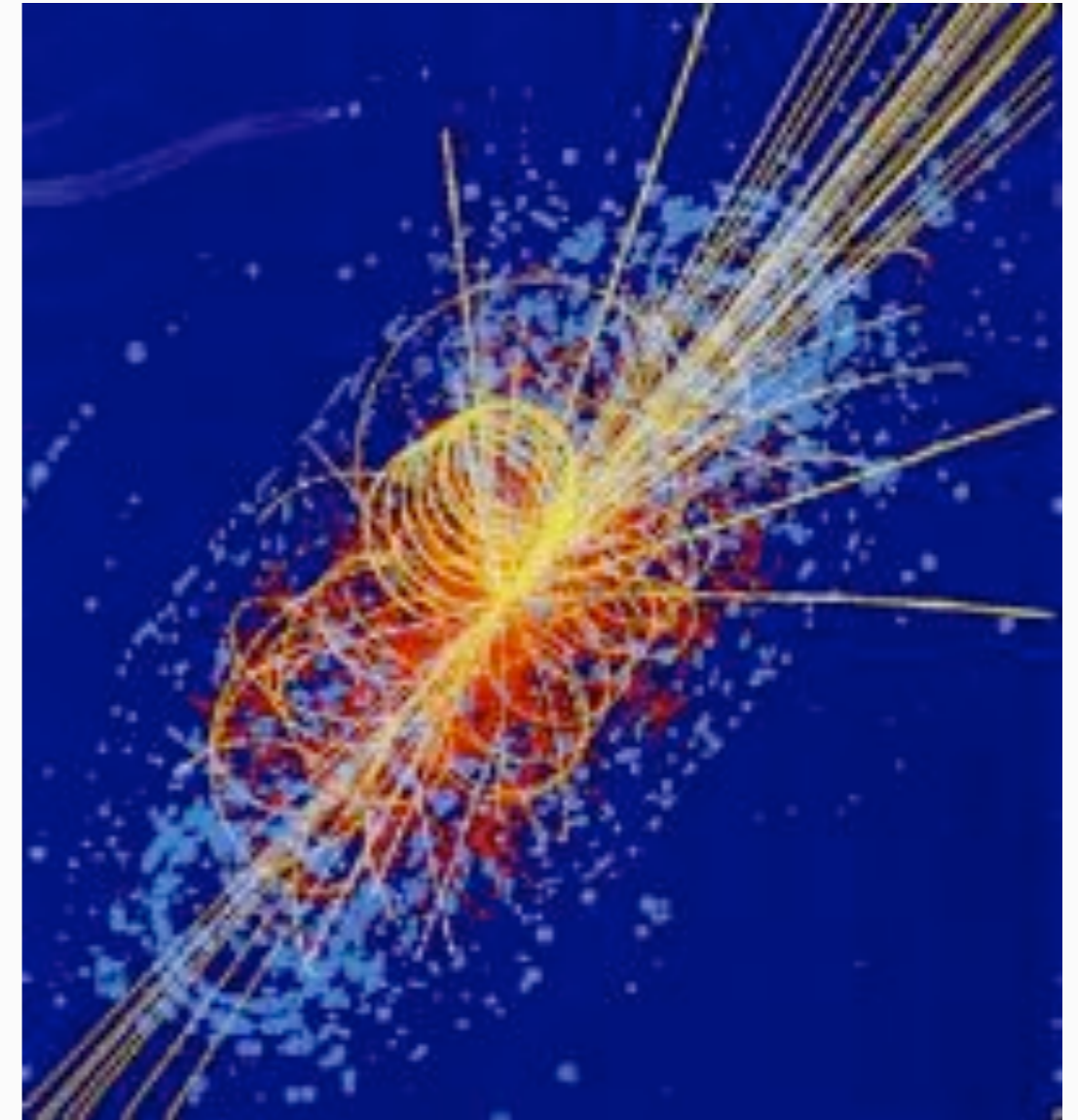
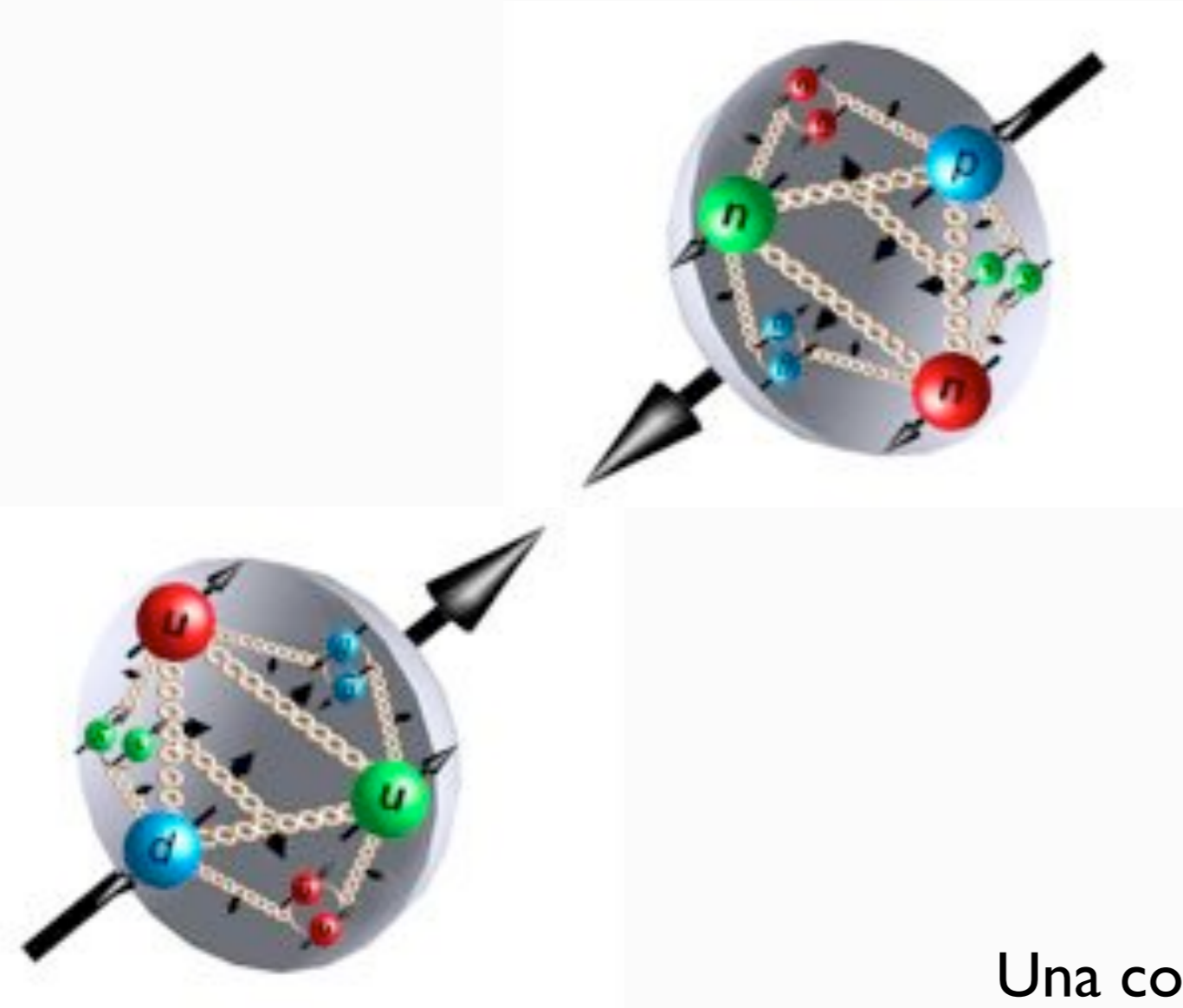
# La interacción fuerte en LHC





# La interacción fuerte en LHC

LHC acelera protones a altísimas energías



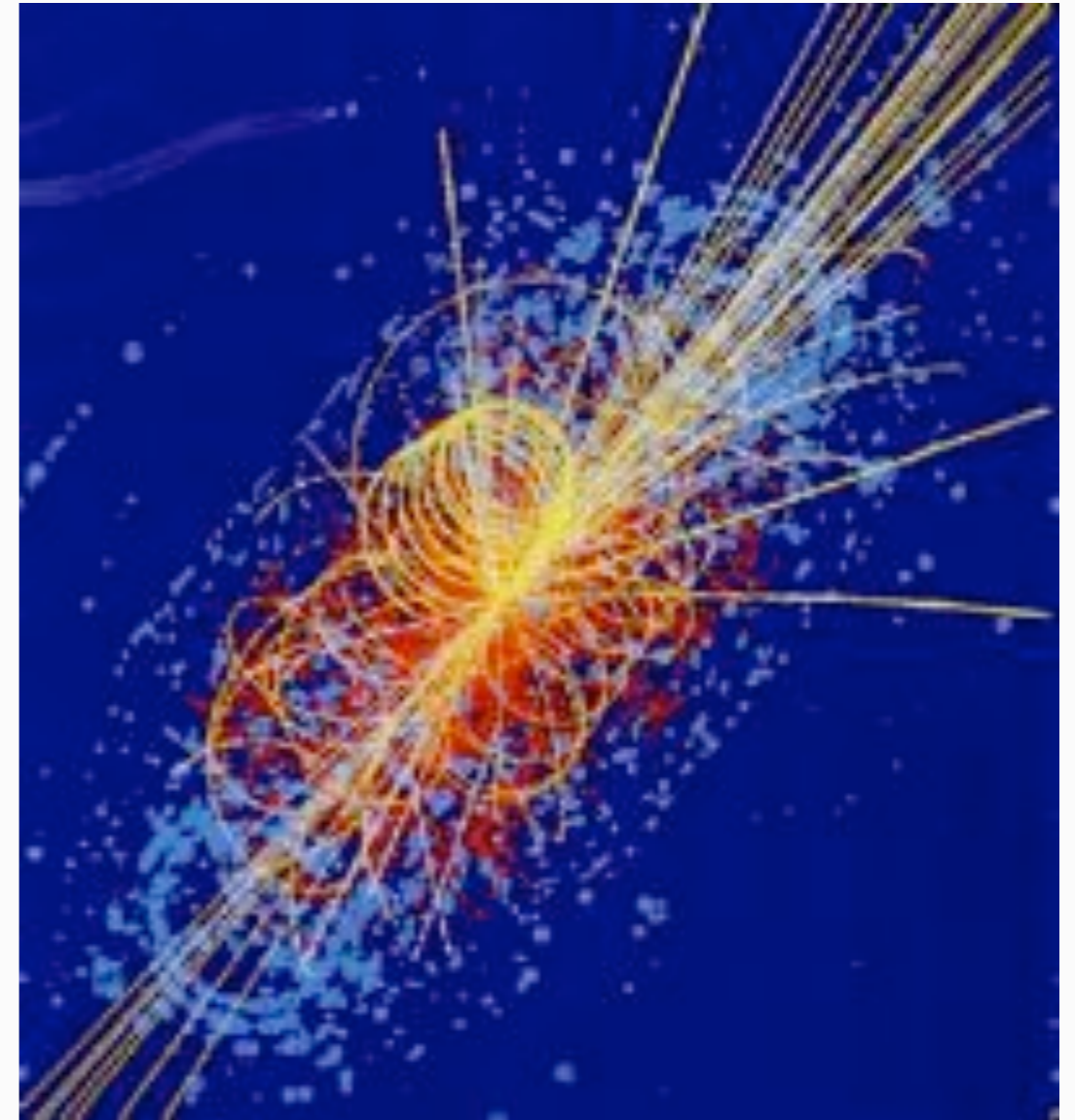
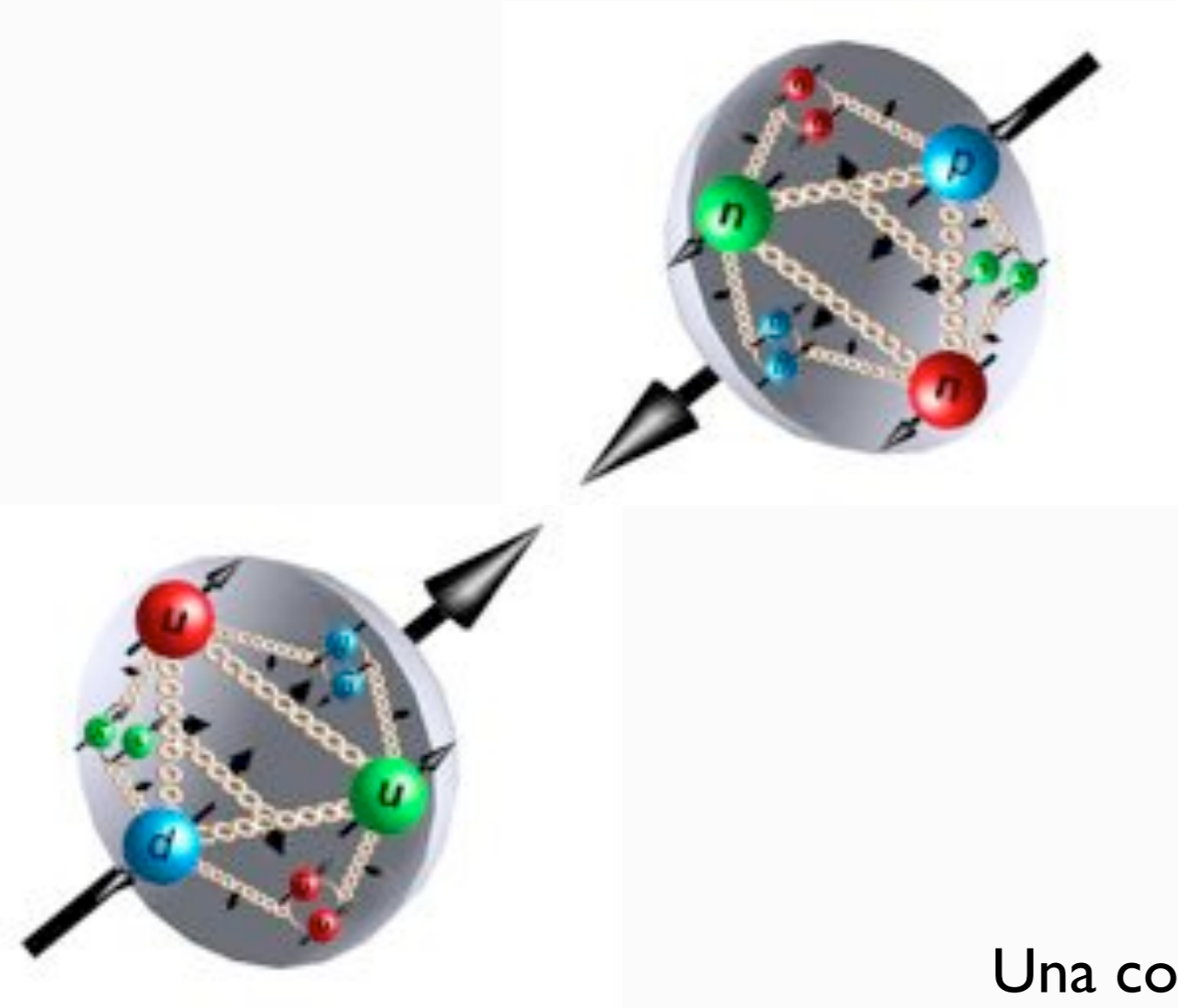
Una colisión típica produce cientos de partículas.

El objetivo de este experimento es entender la física más allá del Modelo Estándar. En particular, cuál es la estructura de simetría fundamental de la Naturaleza, y cómo las partículas elementales (quarks, electrones, ...) adquieren su masa.



# La interacción fuerte en LHC

LHC acelera protones a altísimas energías



Una colisión típica produce cientos de partículas.

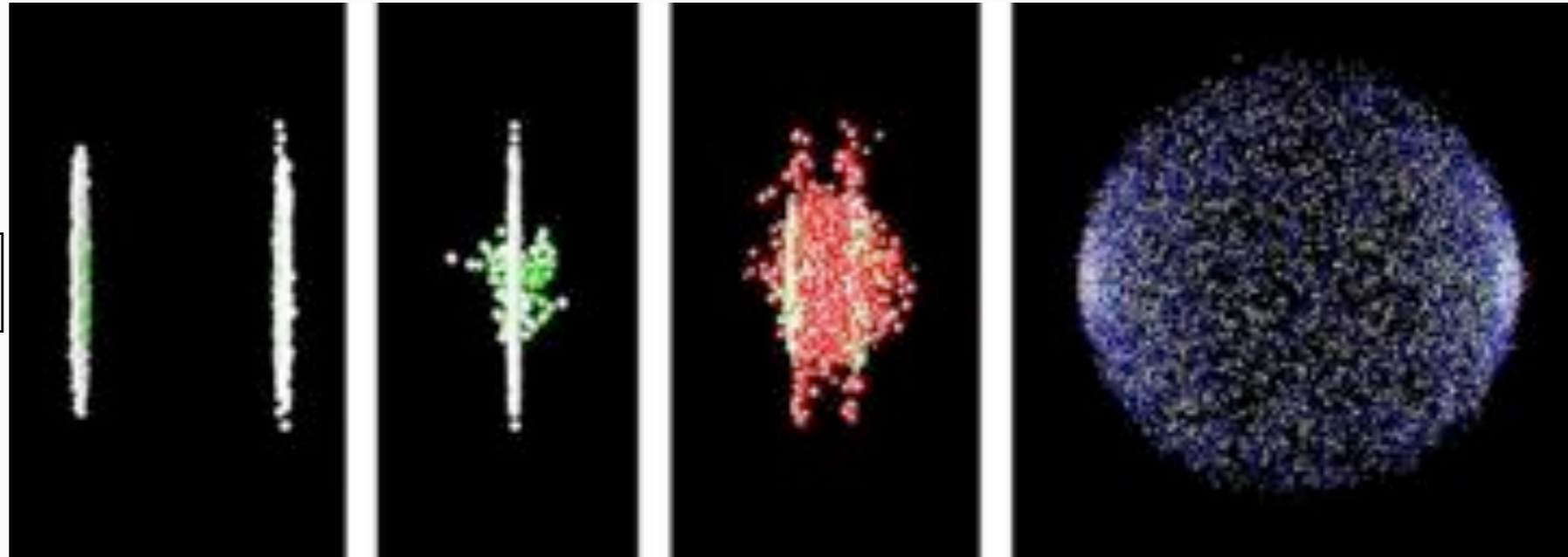
La interacción fuerte es la que domina estas colisiones. Es esencial controlar sus efectos con suficiente precisión para desentrañar la física que desconocemos.

# La interacción fuerte en LHC

Además, LHC también está explorando la física de las colisiones de iones pesados (plasma de quarks y gluones), a energías más altas que RHIC.

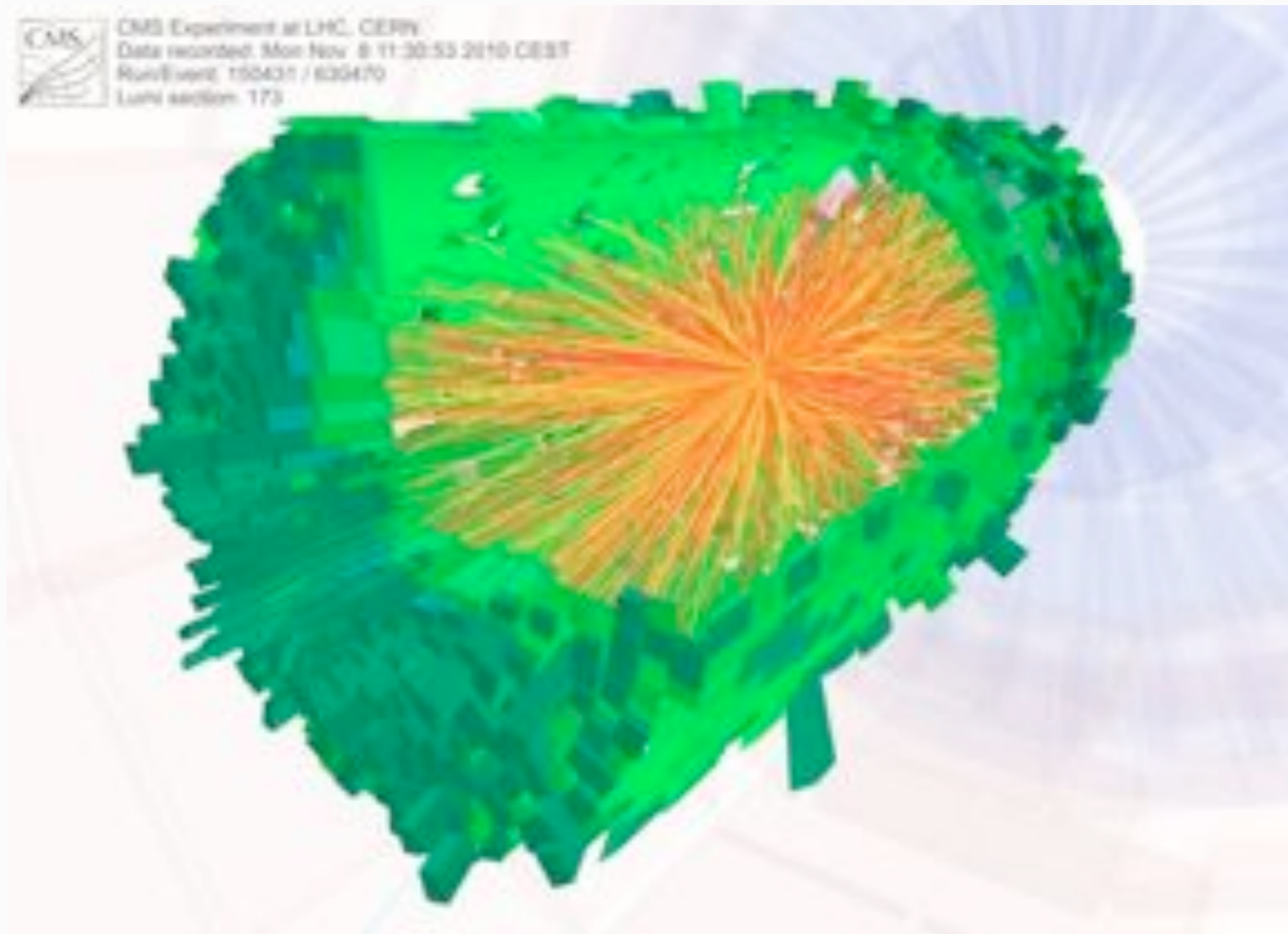
**Colisiona núcleos de plomo**

(82 protones,  
124-126 neutrones)



# La interacción fuerte en LHC

Además, LHC también está explorando la física de las colisiones de iones pesados (plasma de quarks y gluones), a energías más altas que RHIC.





# LHC

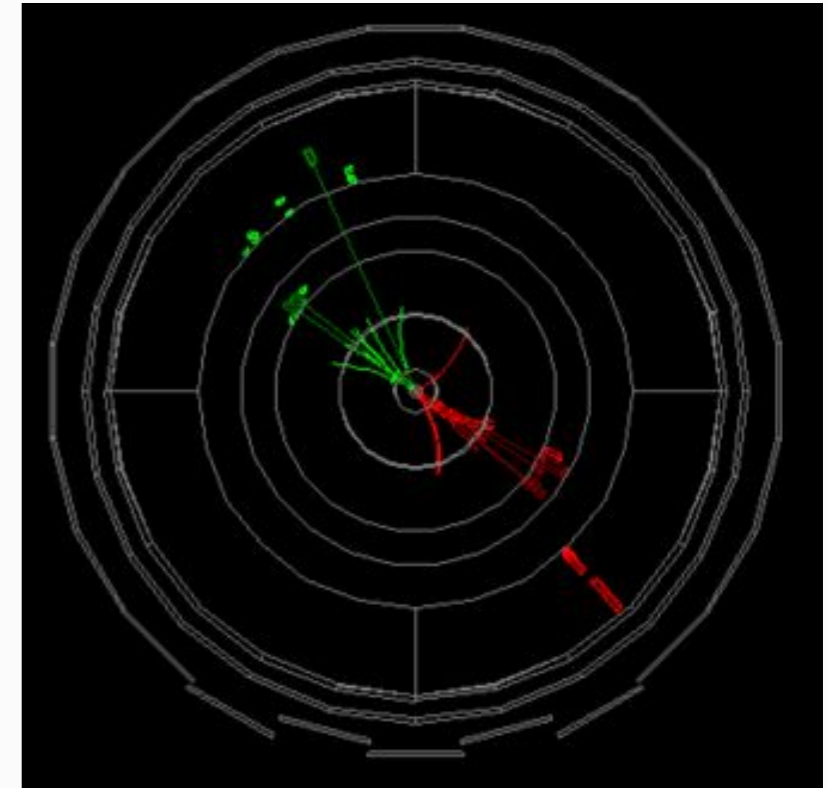


## Acelerador

acelera partículas subatómicas a velocidades comparables a  $c$

## Detectores

registra los productos de las colisiones en puntos concretos del acelerador



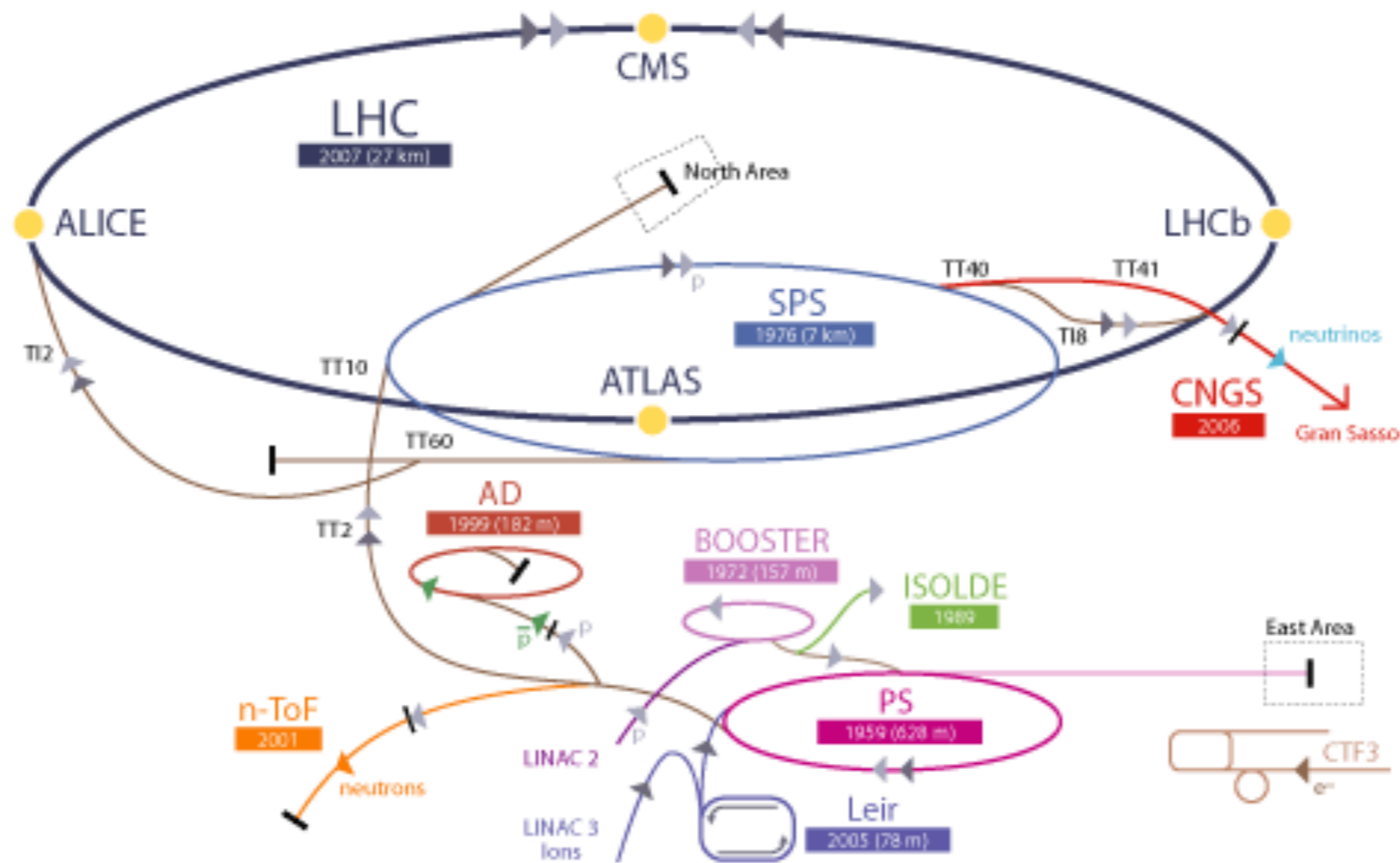
## Análisis

los datos de las colisiones son estudiados para desentrañar la estructura de las interacciones a nivel microscópico



# LHC

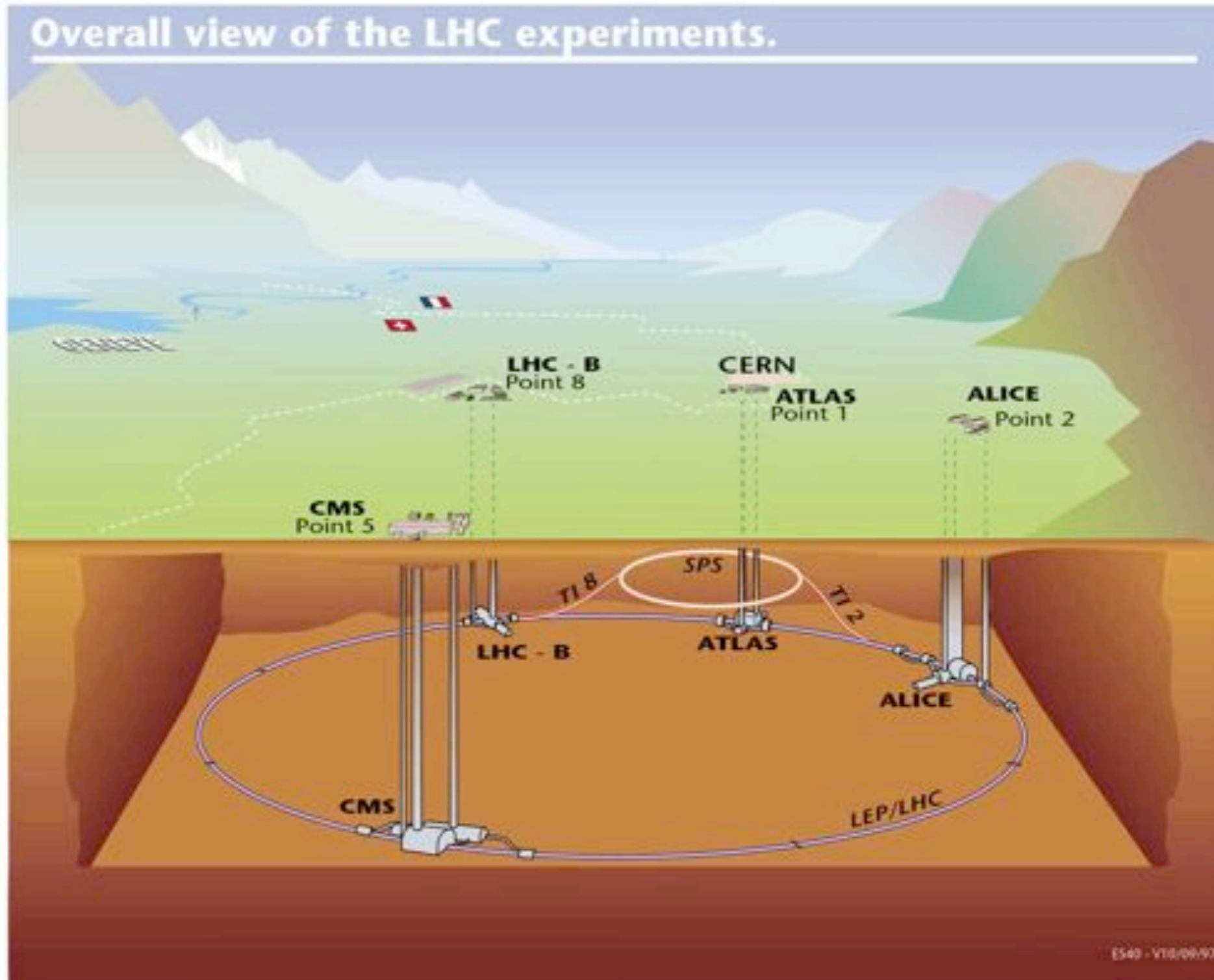
## CERN Accelerator Complex



▶ p (proton)   ▶ ion   ▶ neutrons   ▶  $\bar{p}$  (antiproton)   ▶ neutrinos   ▶ electron  
 ↔↔↔ proton/antiproton conversion

LHC Large Hadron Collider   SPS Super Proton Synchrotron   PS Proton Synchrotron  
 AD Antiproton Decelerator   CTF3 Clic Test Facility  
 CNGS Cern Neutrinos to Gran Sasso   ISOLDE Isotope Separator OnLine DEvice  
 LEIR Low Energy Ion Ring   LINAC LINEar ACcelerator   n-ToF Neutrons Time Of Flight

# LHC



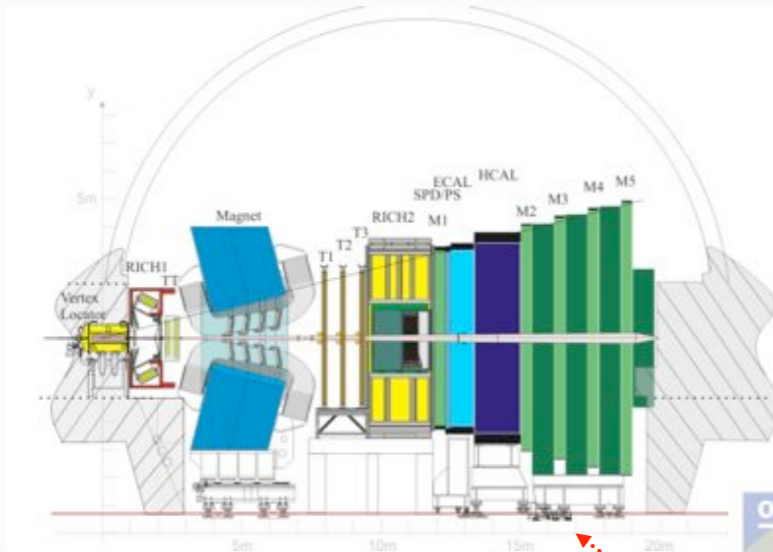
# LHC

Quantity	number
Circunferencia	26 659 m
Temperatura de los dipolos	1.9 K (-271.3°C)
Número de imanes	9593
Nº de dipolos principales	1232
Nº de cuadrupolos principales	392
Nº de cavidades de radiofrecuencia	8 per beam
Energía nominal (protones)	7 TeV
Energía nominal (iones)	2.76 TeV/u (*)
Intensidad campo magnético (dipolos)	8.33 T
Dist. Mínima entre paquetes	~7 m
Luminosidad nominal	$10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Nº de paquetes por haz de protones	2808
Nº de protones por paquete	$1.1 \times 10^{11}$
Nº de vueltas por segundo	11 245
Nº de colisiones por segundo	600 million

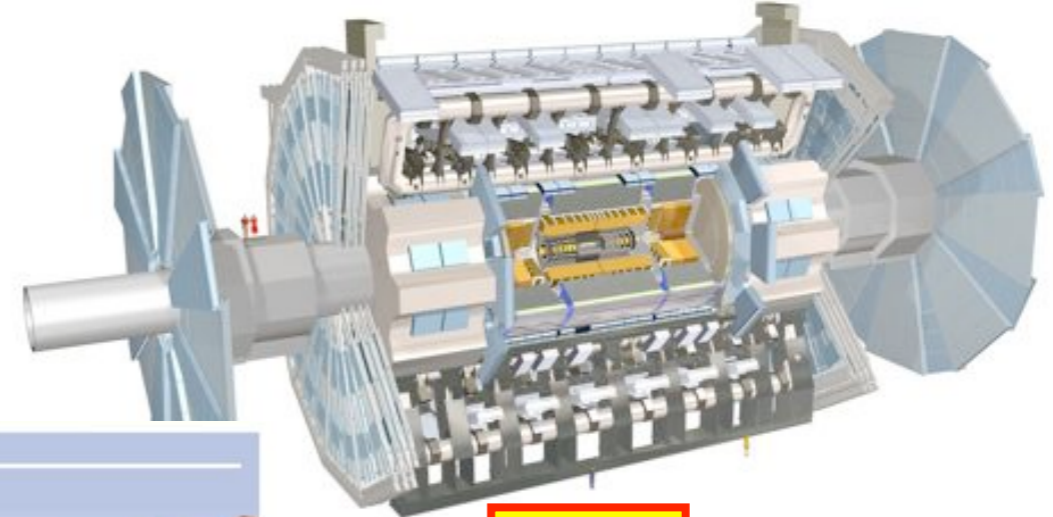
(\*) Energía por nucleón



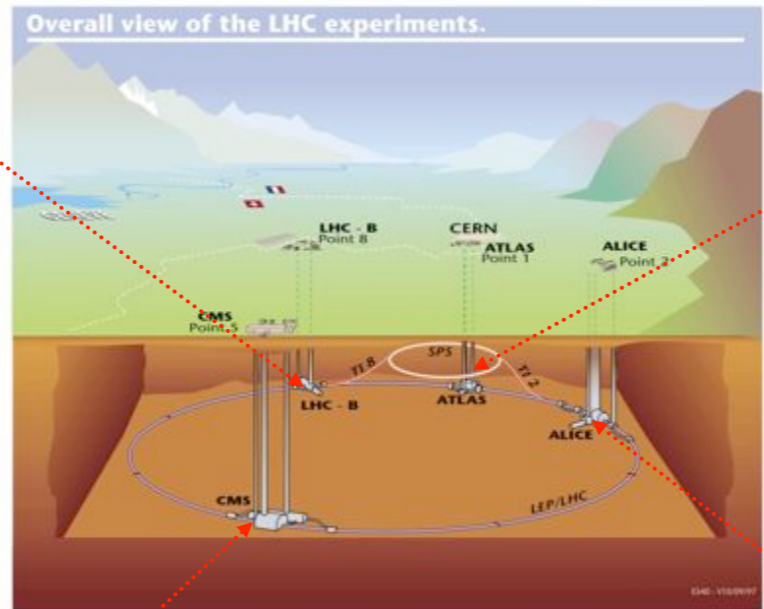
# LHC



LHCb

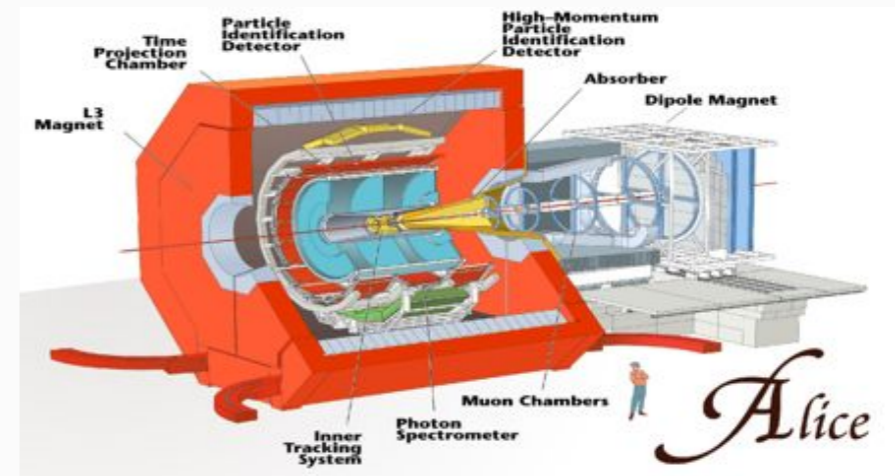
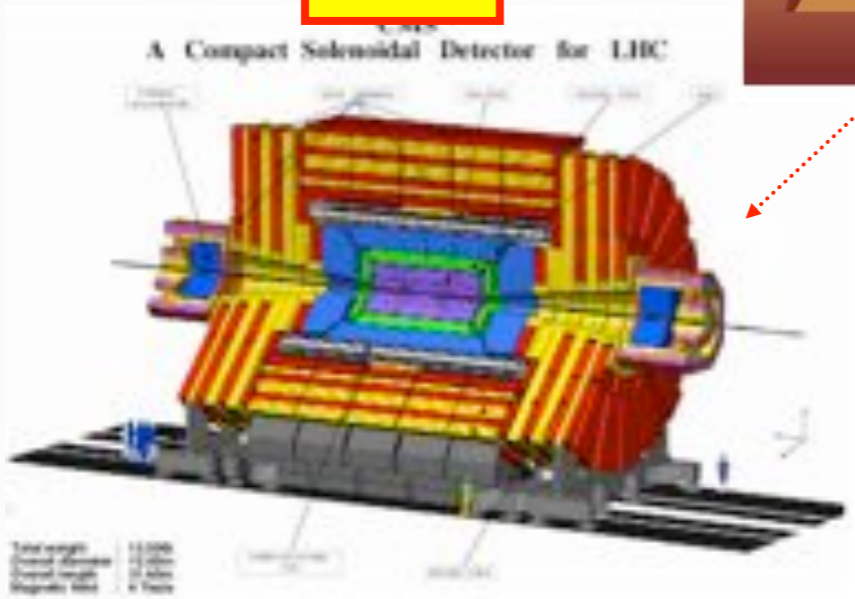


Atlas



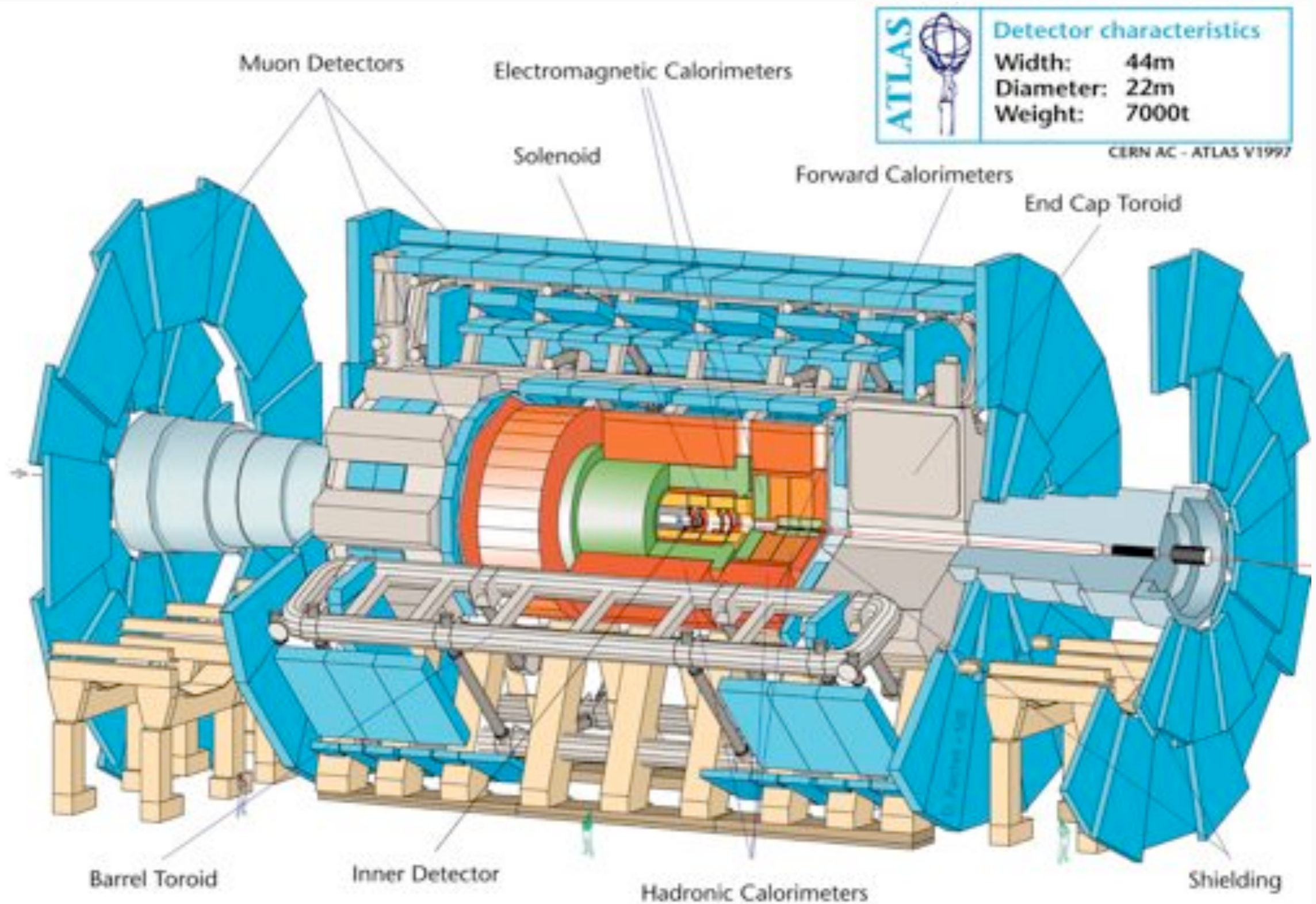
CMS

Alice



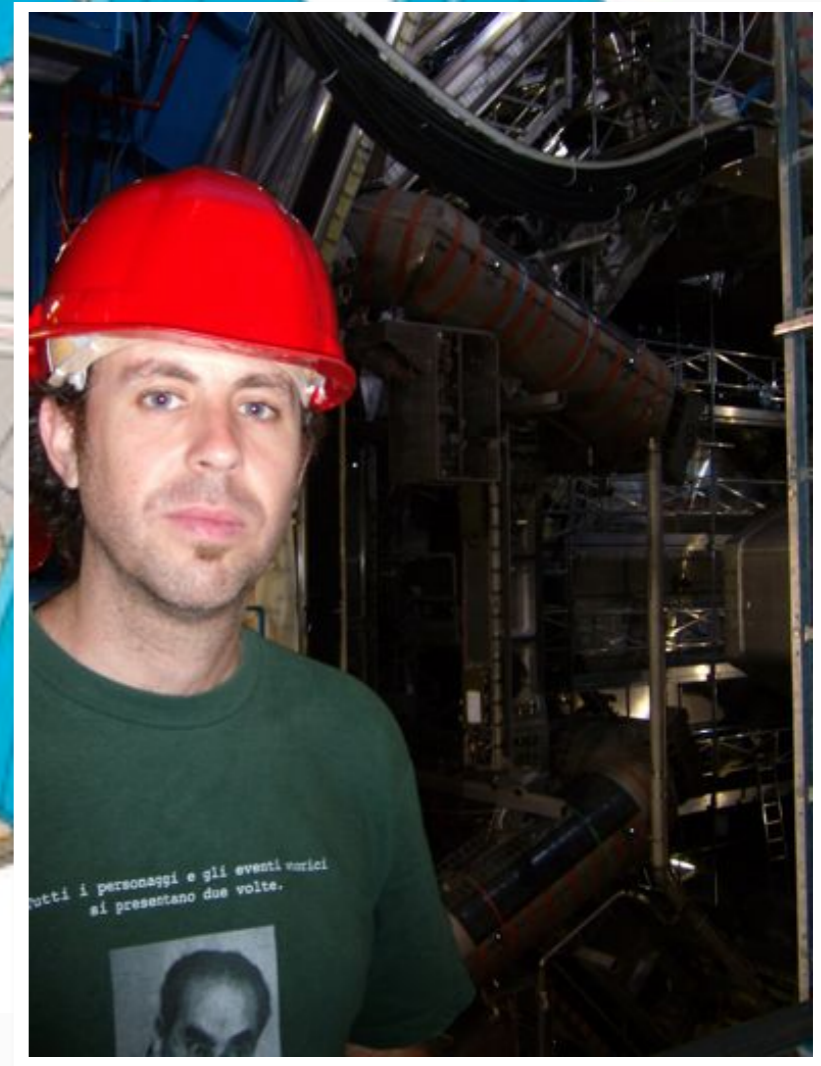
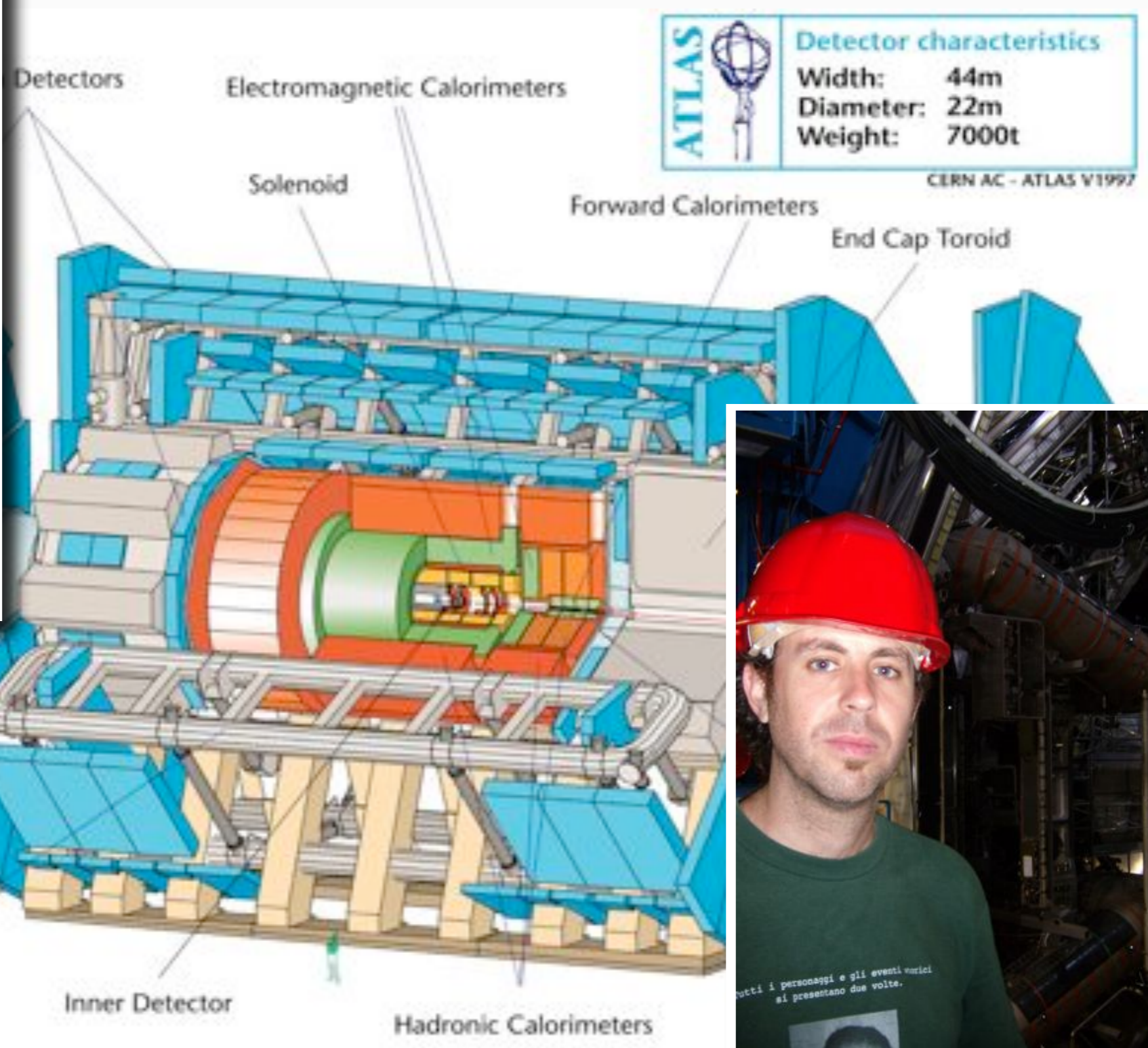
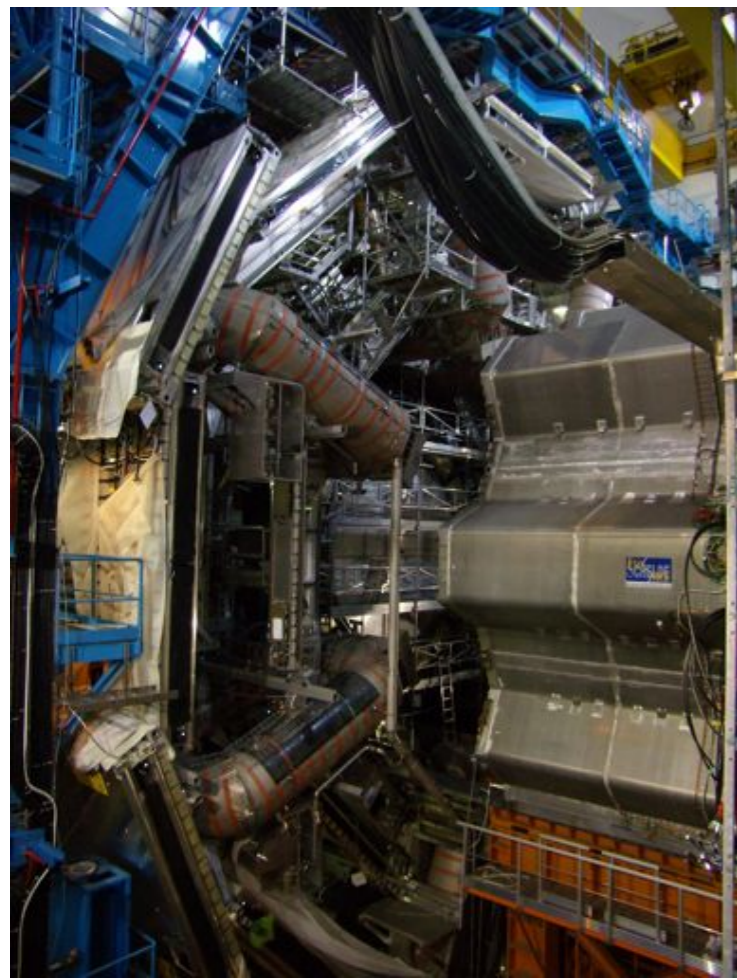


# LHC





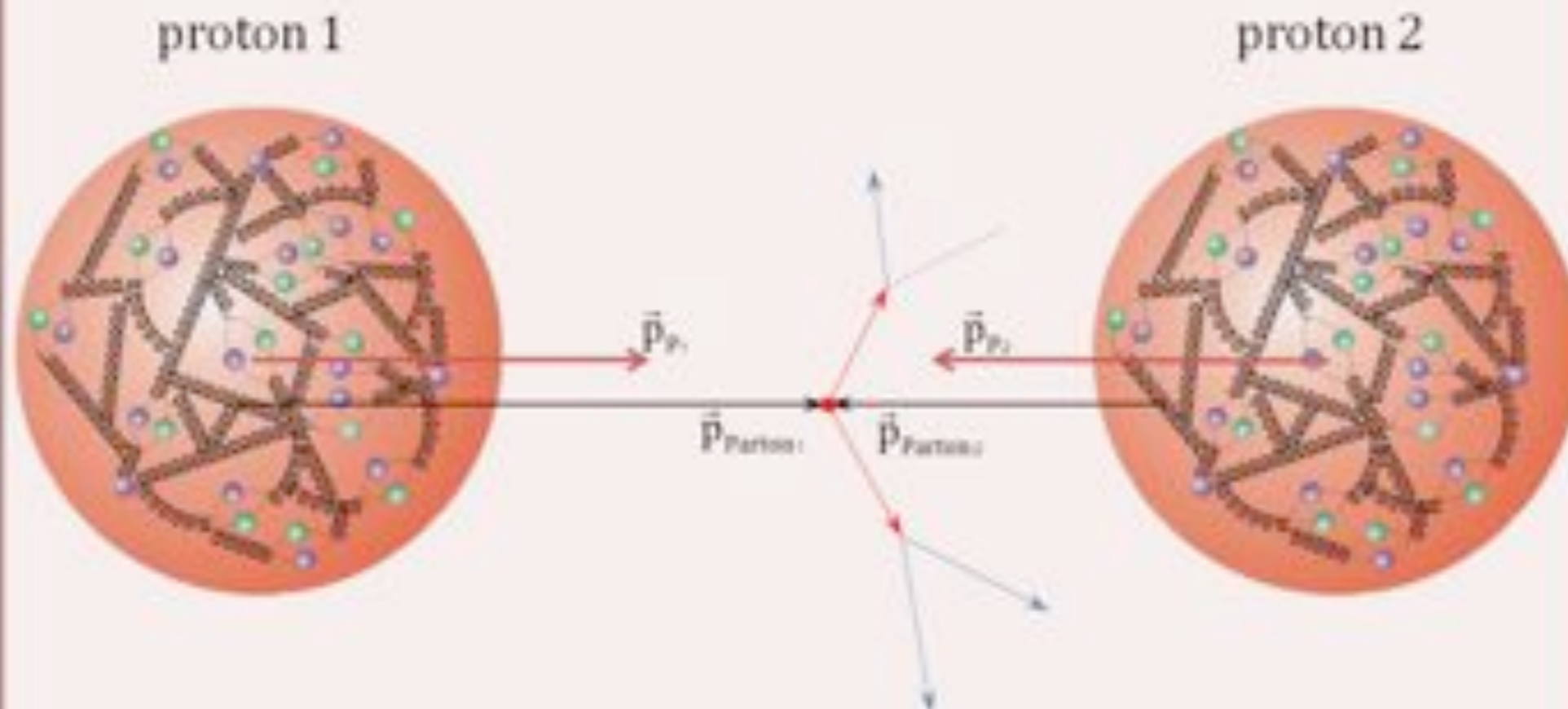
# LHC





# LHC

Interactions of constituents of the colliding protons, the so called partons (quarks, gluons)



$\vec{p}_{P_1}$  ... momentum proton 1

$\vec{p}_{P_2}$  ... momentum proton 2

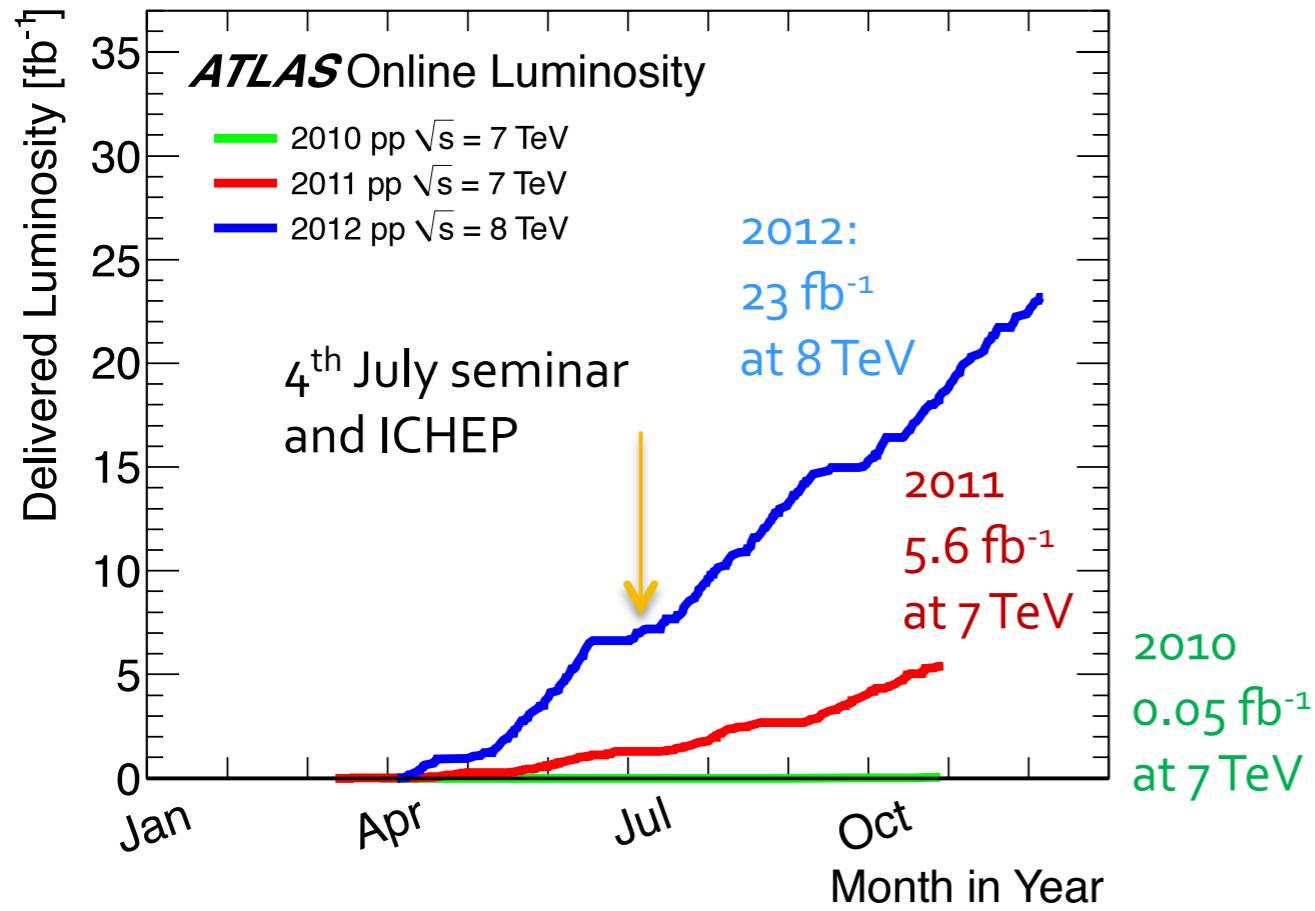
• interaction vertex

$\vec{p}_{Parton_1}$  ... momentum parton 1

$\vec{p}_{Parton_2}$  ... momentum parton 2



# LHC



**2010**  
O(2) Pile-up events

150 ns inter-bunch spacing



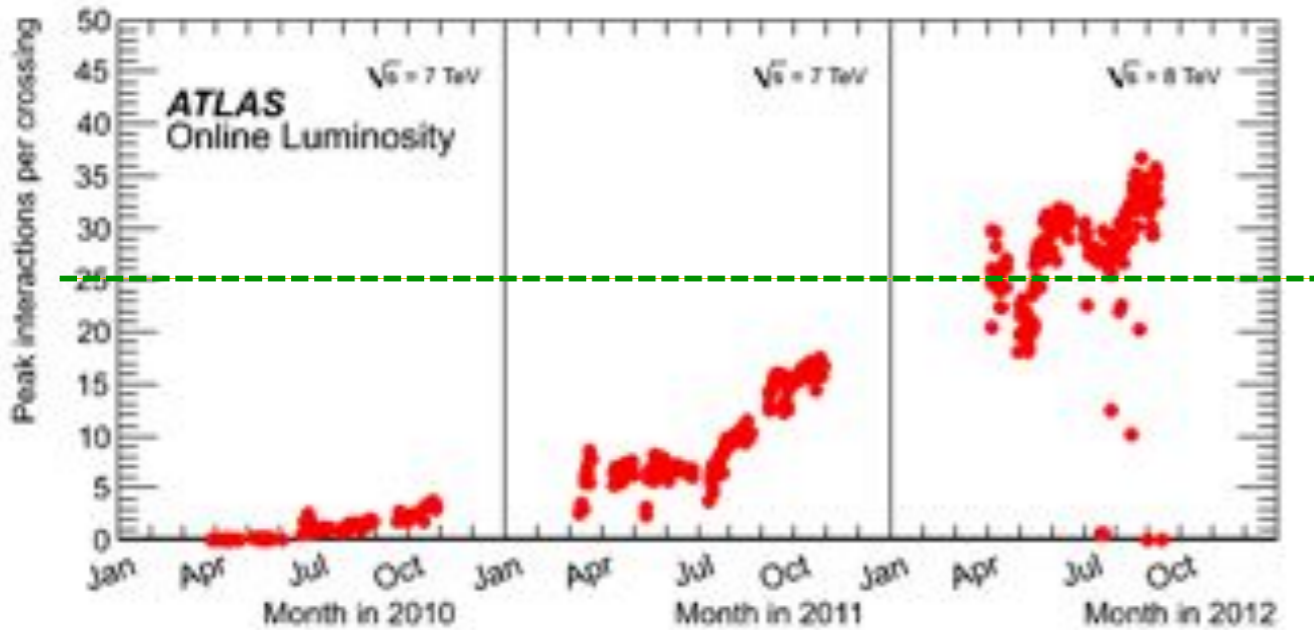
**2011**  
10) Pile-up events

50 ns inter-bunch spacing



**2012**  
(20) Pile-up events

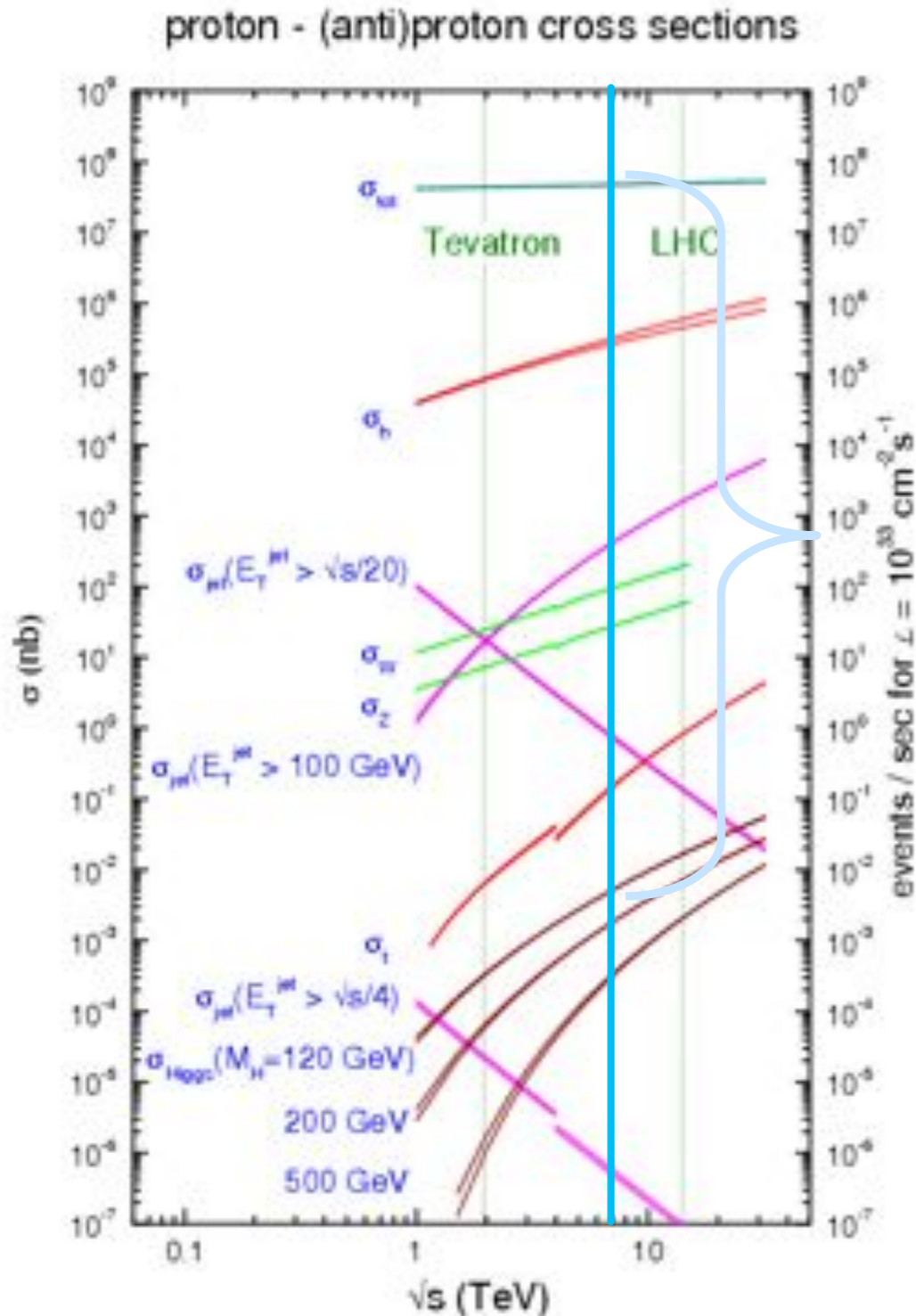
50 ns inter-bunch spacing



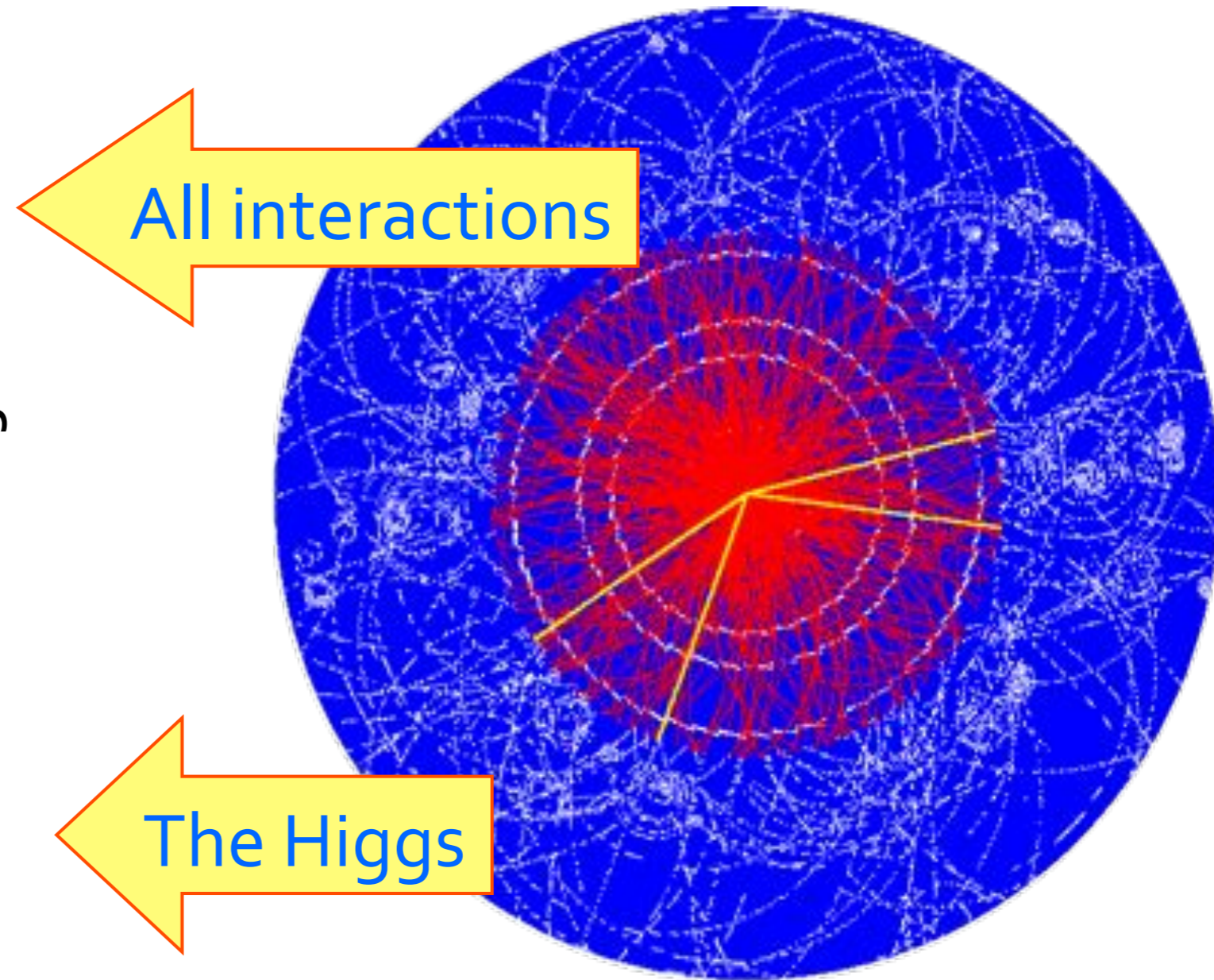


# LHC

## a. Rare Phenomena Huge Background



## b. Complexity



10 orders of magnitude

“one in 10 billion events”  
“90 million readout channels”

# LHC

