

Física de partículas elementales

David G. Cerdño



Basado en transparencias de Carlos Pena

Introducción a la Física de Partículas Elementales y Teoría de Cuerdas

CTIF 3 - 24 Febrero 2014

Plan

- Introducción: escalas de espacio y de energía en Física Fundamental.
- Física Cuántica y Relatividad Especial.
 - Las preguntas revolucionarias.
 - Dirac y la Mecánica Cuántica Relativista.
 - Las interacciones nucleares débil y fuerte: neutrinos y mesones.
- Interludio: diagramas de Feynman.
- Teoría Cuántica de Campos.
 - Efectos cuánticos y fuerzas fundamentales.
 - Infinitos y Guerras.
 - La Edad de Plata: Electrodinámica Cuántica y leyes fundamentales.
- Simetrías: la Edad de Oro.
 - El Camino Óctuple: Quarks.
 - La interacción electrodébil: corrientes neutras.
 - Más infinitos.
 - El Modelo Estándar de la Física de Partículas.

Plan

- Introducción: escalas de espacio y de energía en Física Fundamental.
- Física Cuántica y Relatividad Especial.
 - Las preguntas revolucionarias.
 - Dirac y la Mecánica Cuántica Relativista.
 - Las interacciones nucleares débil y fuerte: neutrinos y mesones.
- Interludio: diagramas de Feynman.
- Teoría Cuántica de Campos.
 - Efectos cuánticos y fuerzas fundamentales.
 - Infinitos y Guerras.
 - La Edad de Plata: Electrodinámica Cuántica y leyes fundamentales.
- Simetrías: la Edad de Oro.
 - El Camino Óctuple: Quarks.
 - La interacción electrodébil: corrientes neutras.
 - Más infinitos.
 - El Modelo Estándar de la Física de Partículas.

El sentido de la pregunta: escalas de longitud

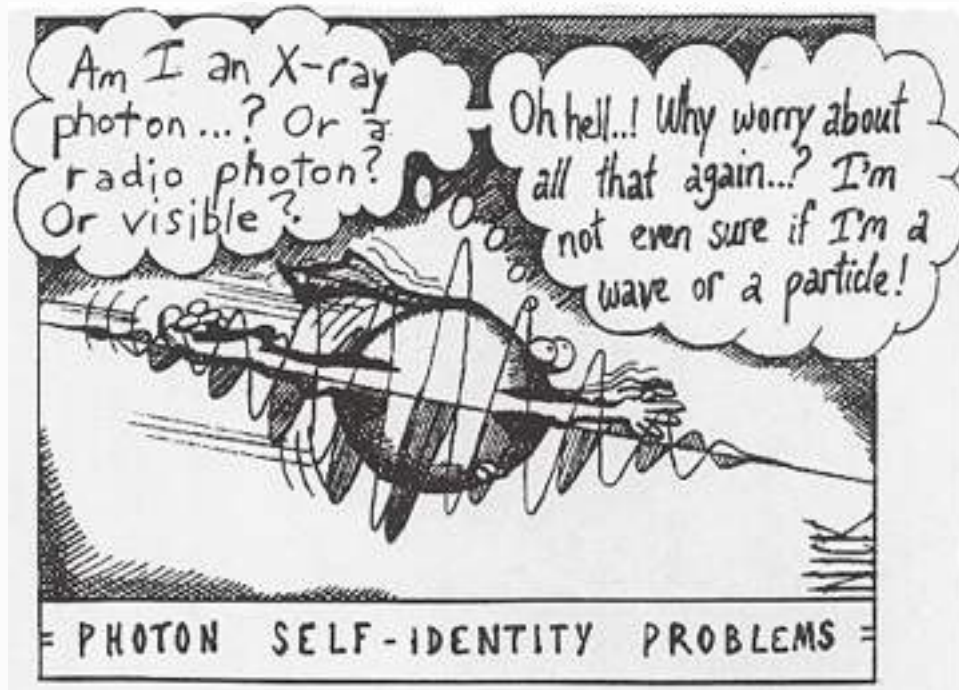
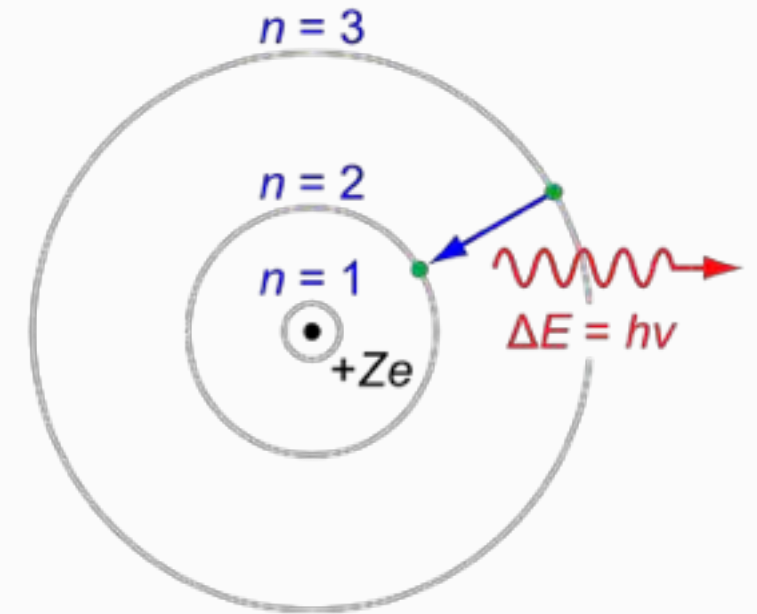


El sentido de la pregunta: escalas de energía



$$E_{\gamma} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

Planck / Einstein: cuantización de la luz



$$\lambda = \frac{h}{p}$$



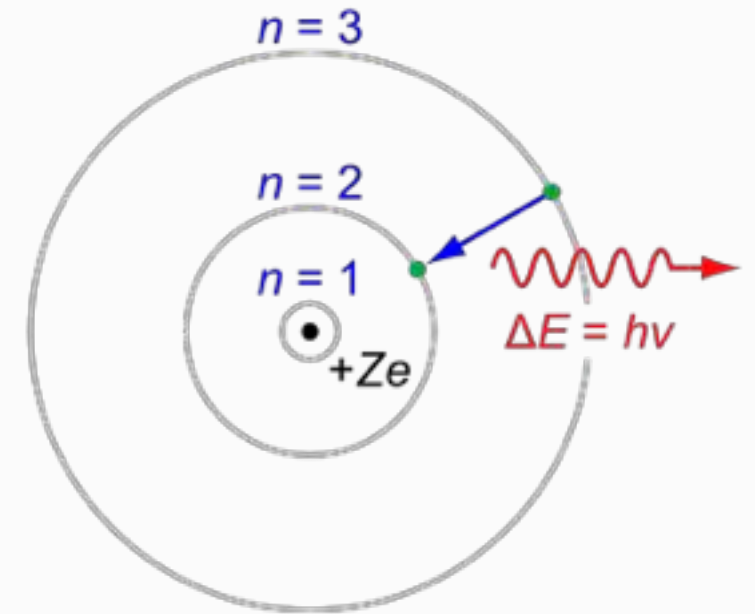
de Broglie: dualidad onda/partícula

El sentido de la pregunta: escalas de energía



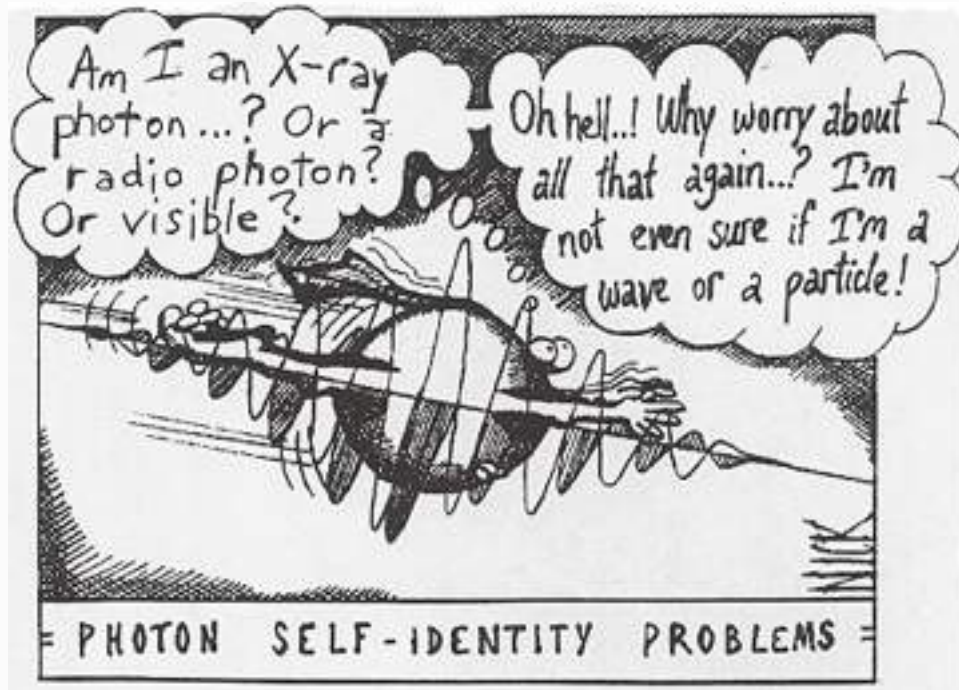
$$E_{\gamma} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

Planck / Einstein: cuantización de la luz



Energía $\Leftrightarrow$ 1/Longitud

$$(\Delta E) (\Delta x) \approx \hbar c$$



$$\lambda = \frac{h}{p}$$



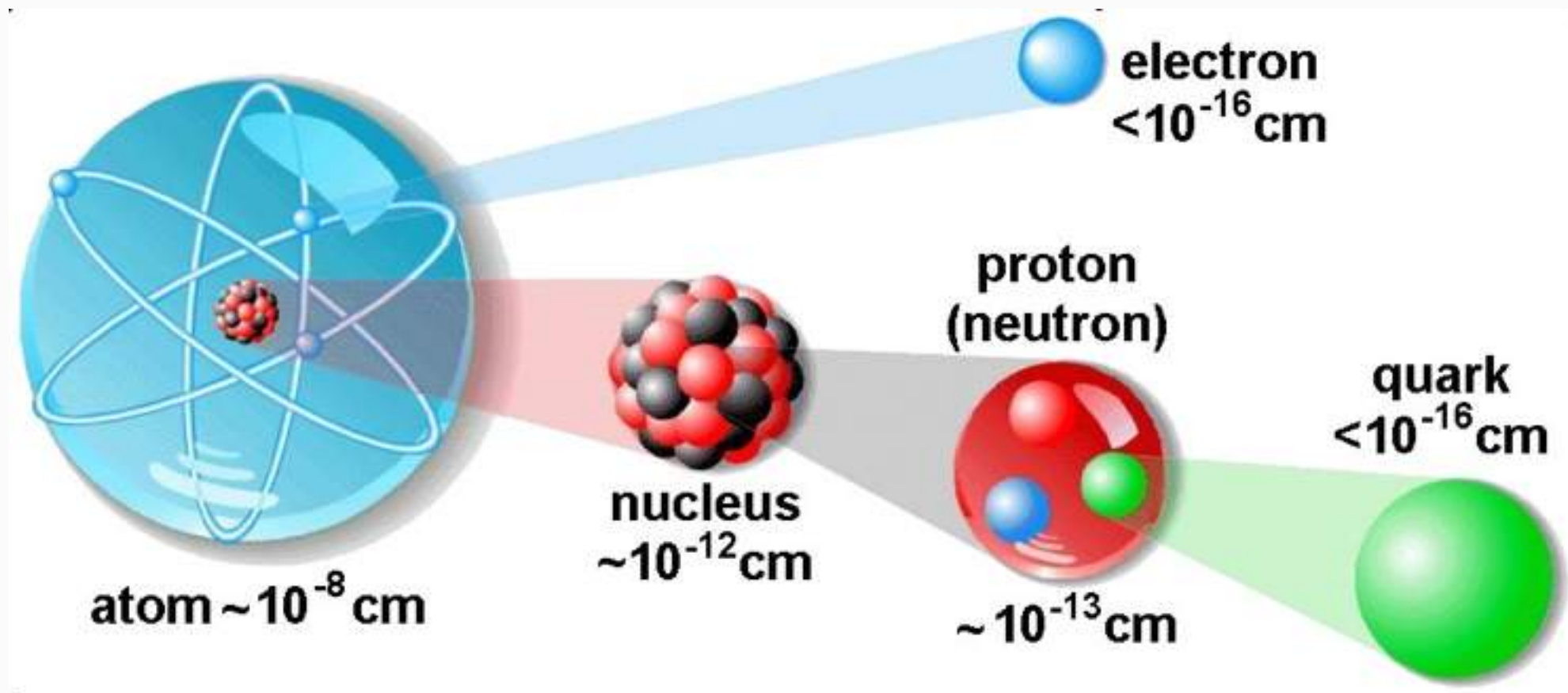
de Broglie: dualidad onda/partícula

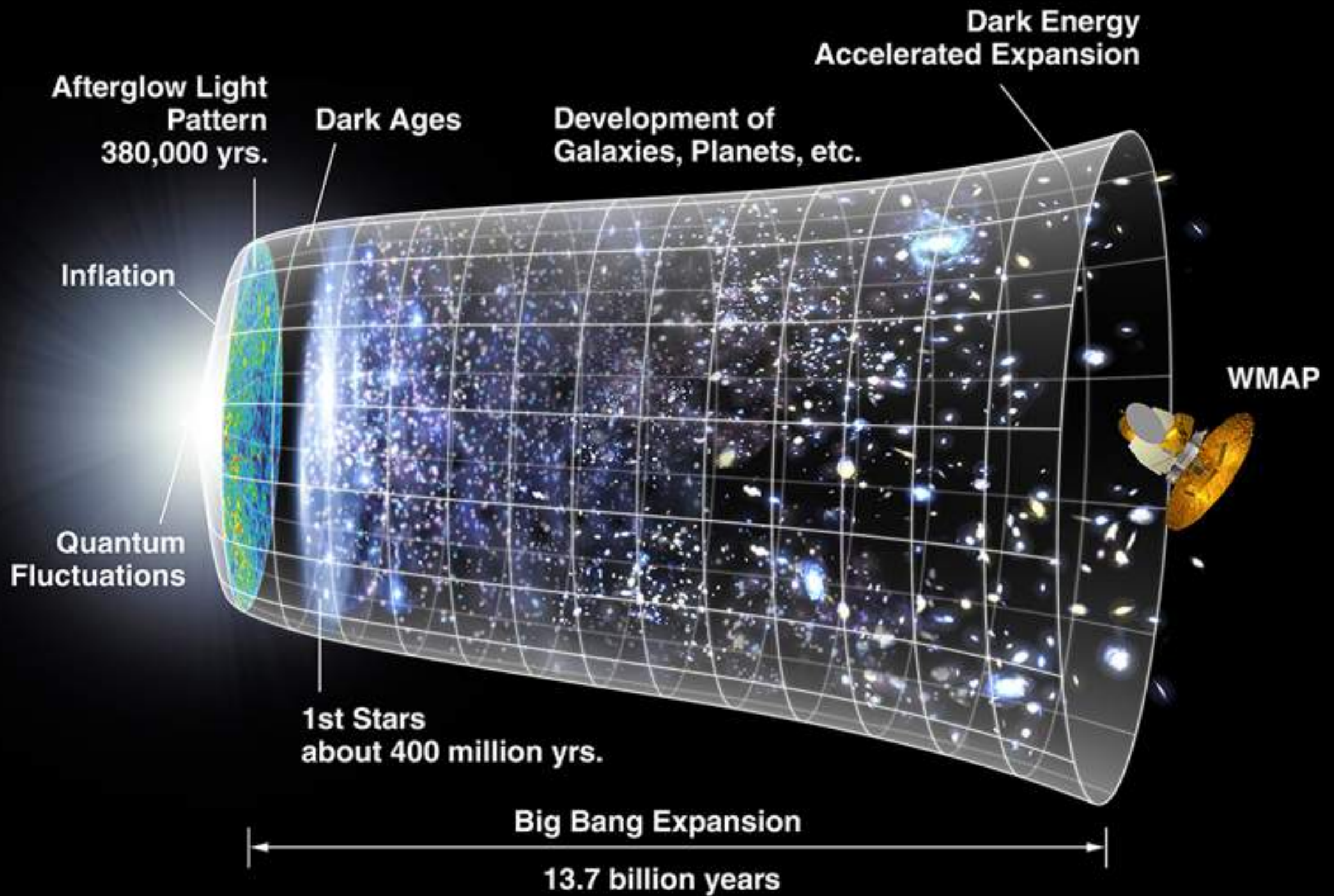
El sentido de la pregunta: escalas de longitud y energía

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

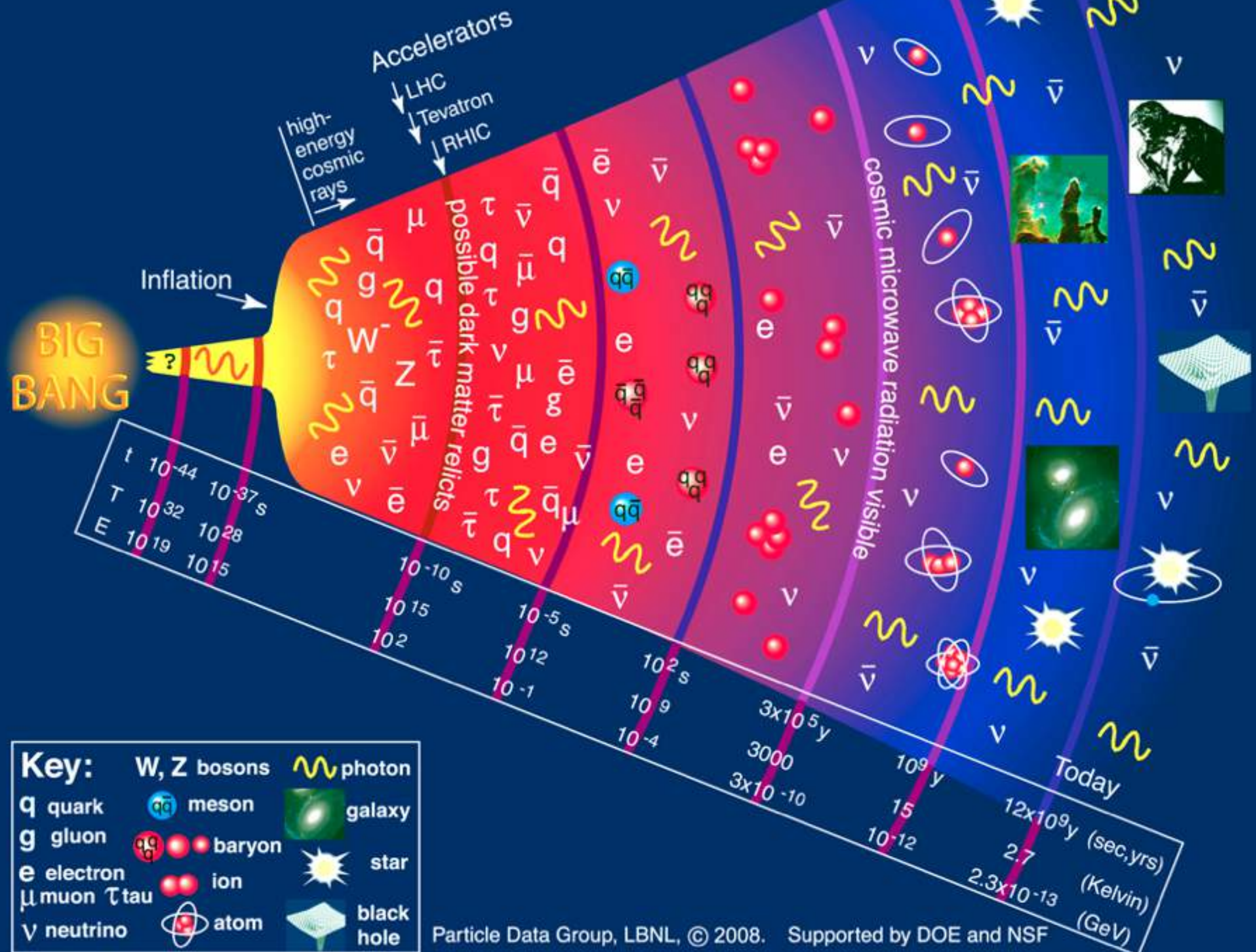
$$100 \text{ MeV}/(hc)$$

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

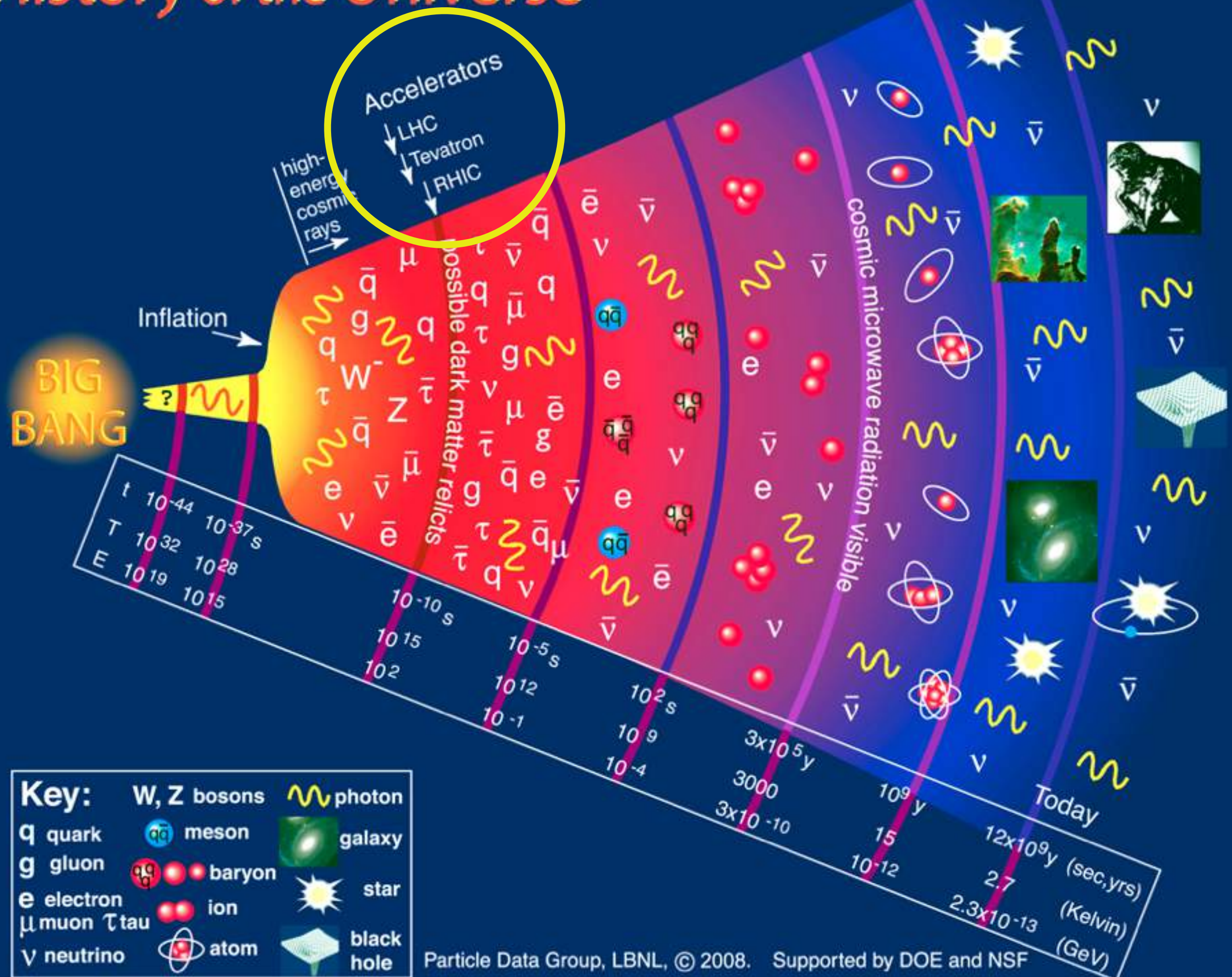




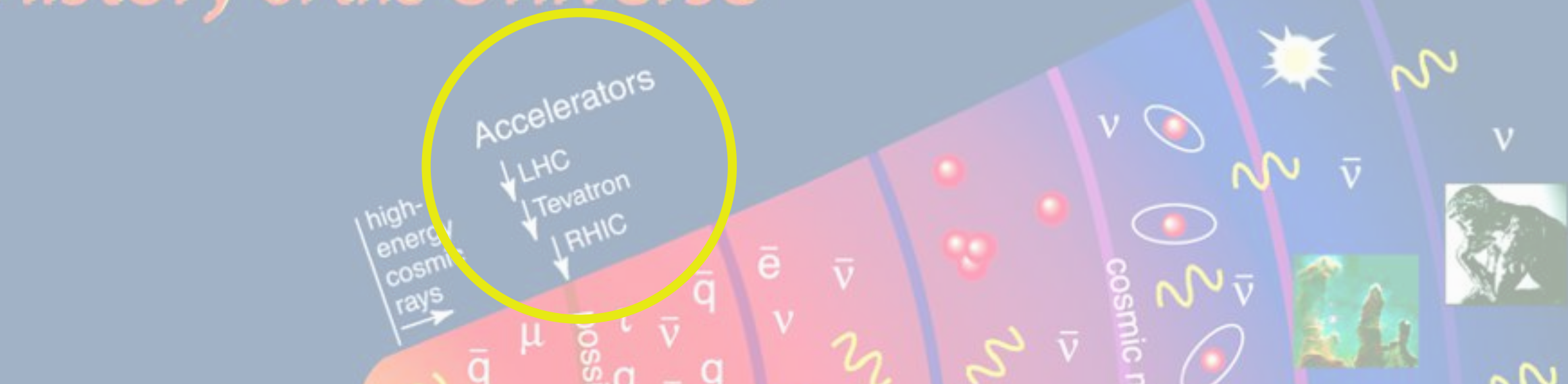
History of the Universe



History of the Universe

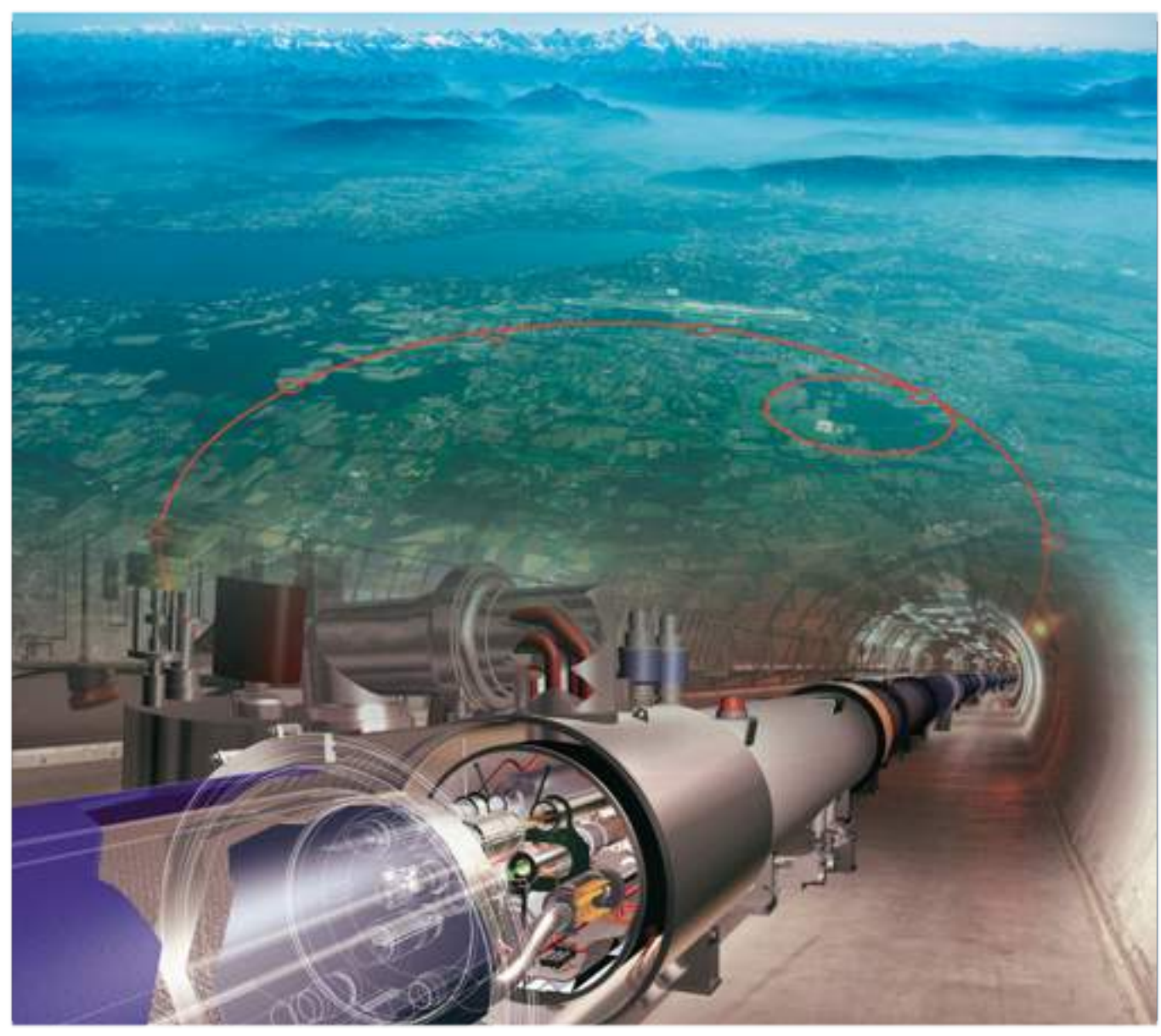


History of the Universe



t	10^{-44}	10^{-37} s
T	10^{32}	10^{28}
E	10^{19}	10^{15}
	10^{-10} s	10^{-5} s
	10^{15}	10^{12}
	10^2	10^{-1}

Key:	W, Z bosons	photon
q quark	meson	galaxy
g gluon	baryon	star
e electron	ion	black hole
μ muon τ tau	atom	
ν neutrino		



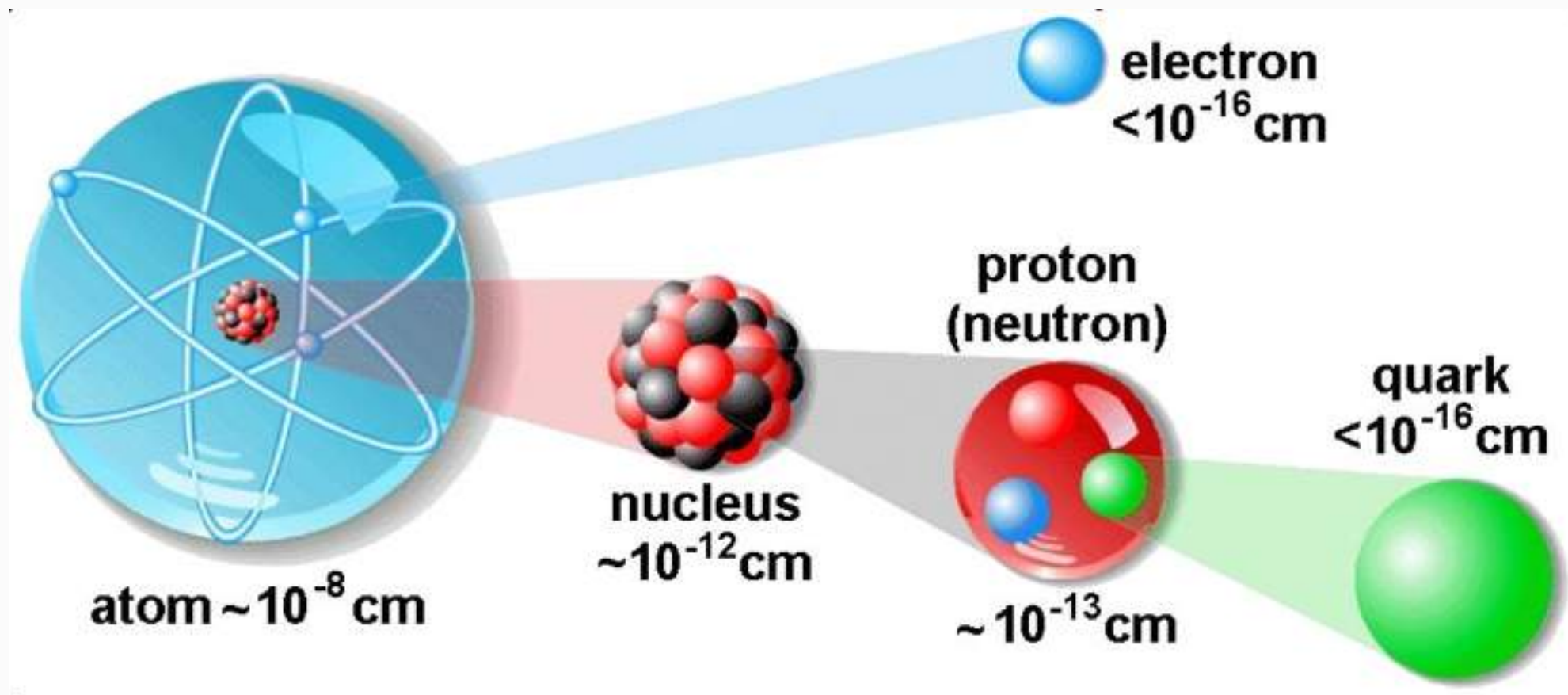
Particle Data Group, LBNL, © 2008. Supported by DOE and NSF

El sentido de la pregunta: escalas de longitud y energía

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

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

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

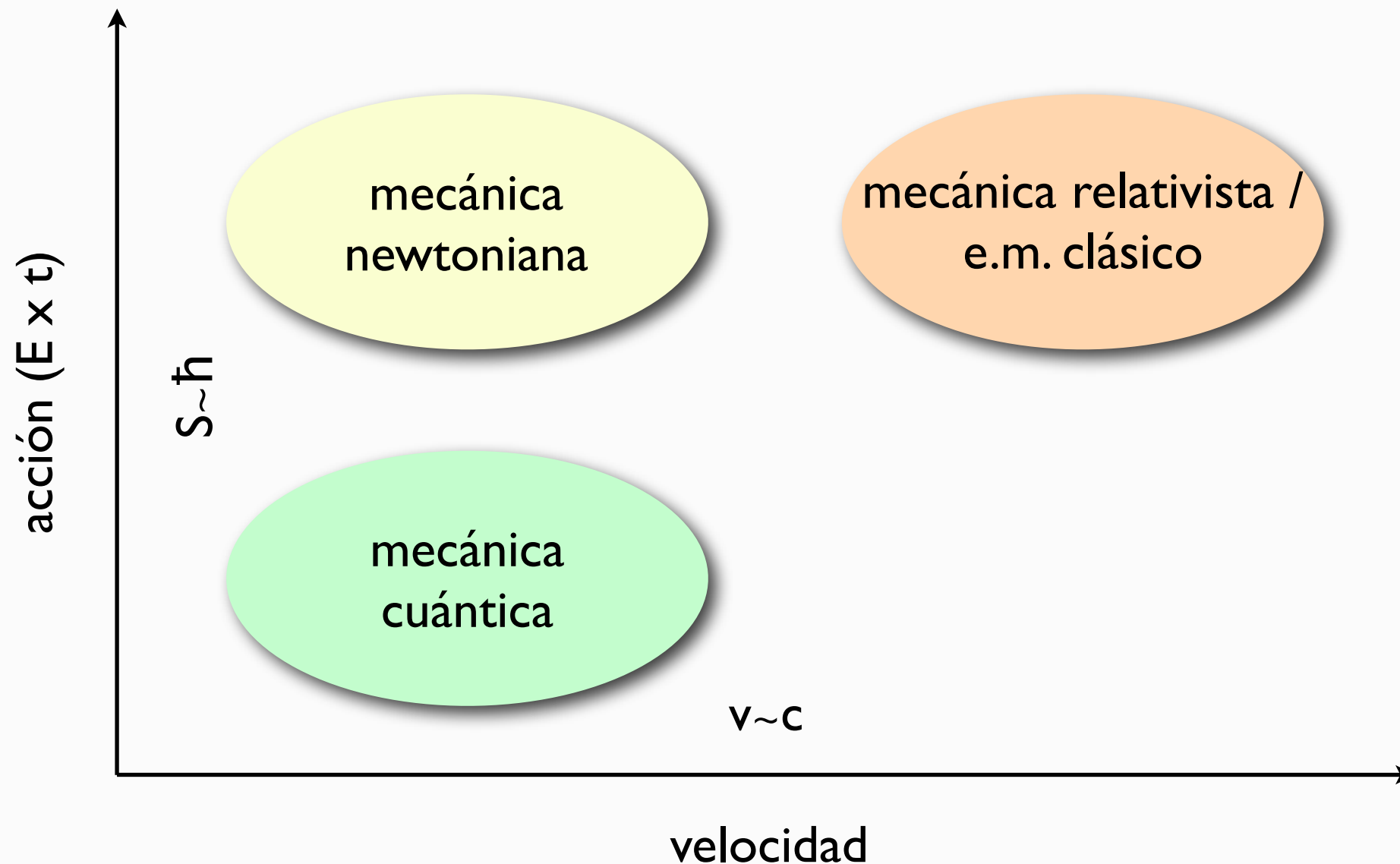


Electromagnetismo

Interacciones nucleares
débil y fuerte

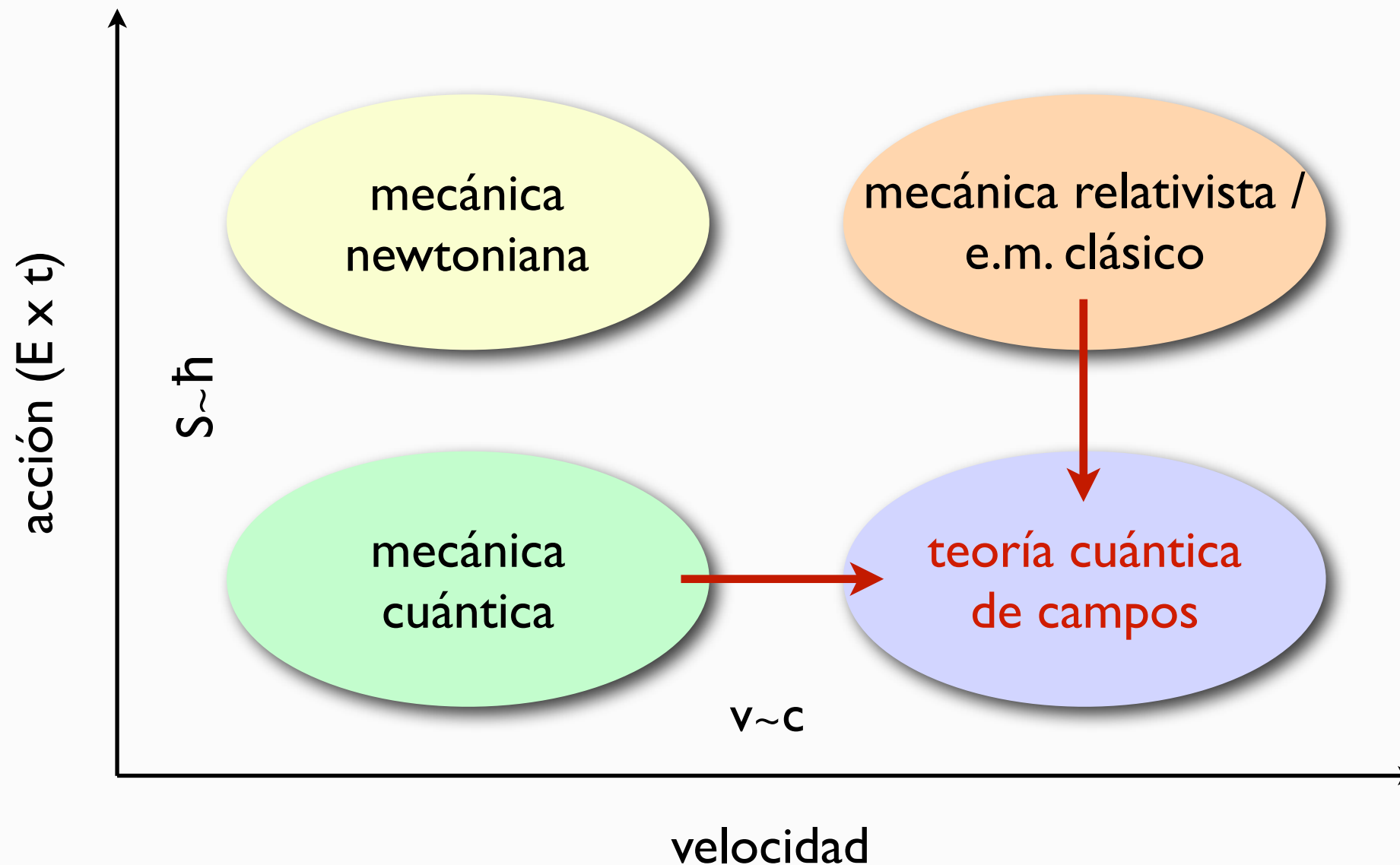
Mecánica Cuántica y Relatividad Especial

6. ¿Cómo hacer compatibles la mecánica cuántica y la relatividad especial?



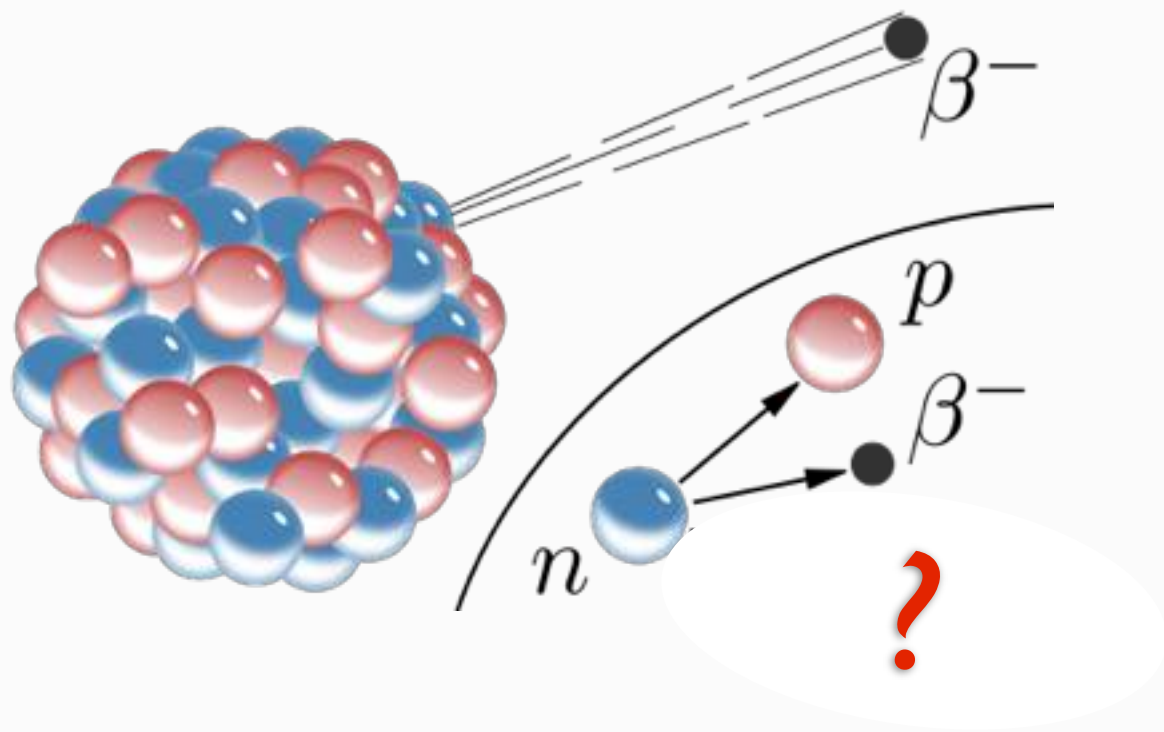
Mecánica Cuántica y Relatividad Especial

6. ¿Cómo hacer compatibles la mecánica cuántica y la relatividad especial?



Energía $\Leftrightarrow$ 1/Longitud:
Física Fundamental

La interacción nuclear débil: neutrinos



Is energy not conserved in the process?

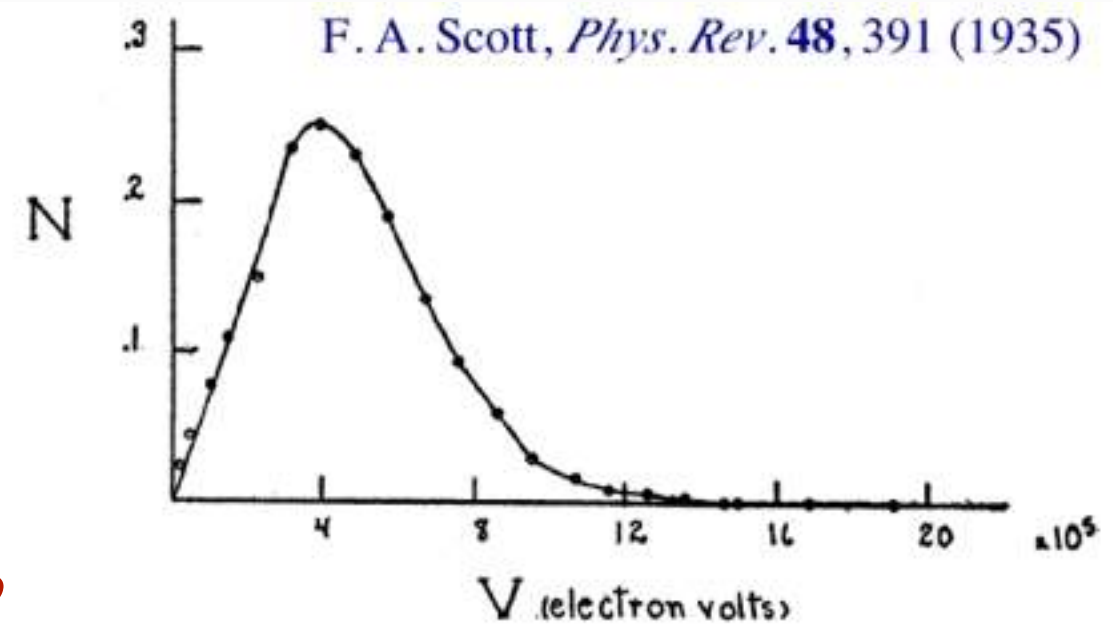


FIG. 5. Energy distribution curve of the beta-rays.

"I have hit upon a desperate remedy to save the "exchange theorem" of statistics and the law of conservation of energy. Namely, the possibility that there could exist in the nuclei electrically neutral particles, that I wish to call neutrons, which have spin 1/2 and obey the exclusion principle and which further differ from light quanta in that they do not travel with the velocity of light. The mass of the neutrons should be of the same order of magnitude as the electron mass and in any event not larger than 0.01 proton masses. The continuous beta spectrum would then become understandable by the assumption that in beta decay a neutron is emitted in addition to the electron such that the sum of the energies of the neutron and the electron is constant..."

Pauli 1930

La interacción nuclear débil: neutrinos

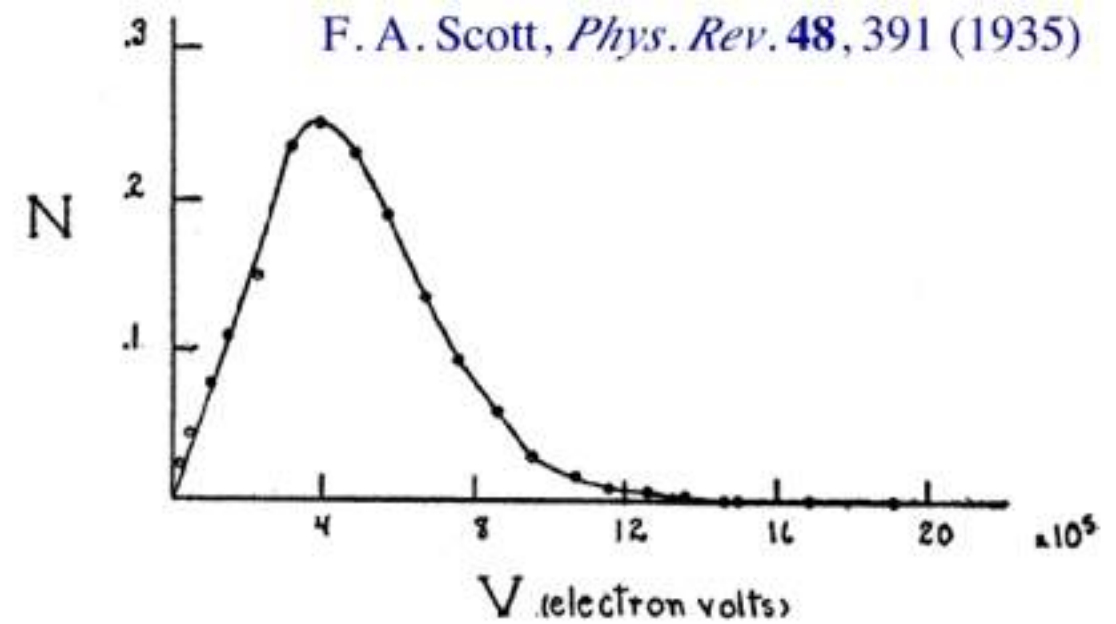
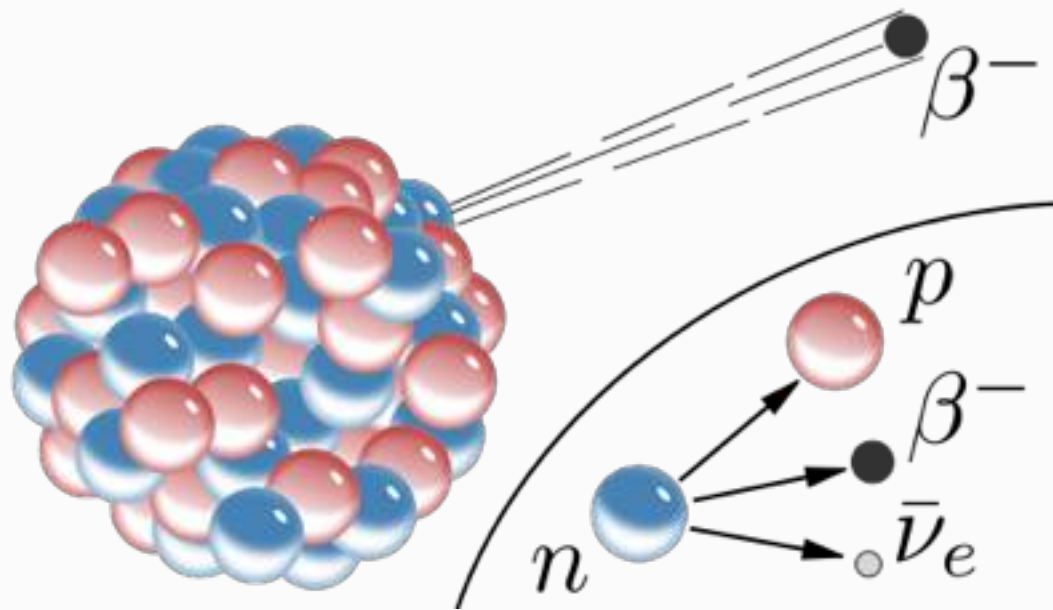


FIG. 5. Energy distribution curve of the beta-rays.

Neutrino: partícula de masa muy pequeña que se lleva la energía sobrante.

Detectado directamente sólo en 1956.



Pauli 1930

Fermi 1934

La interacción nuclear débil: neutrinos

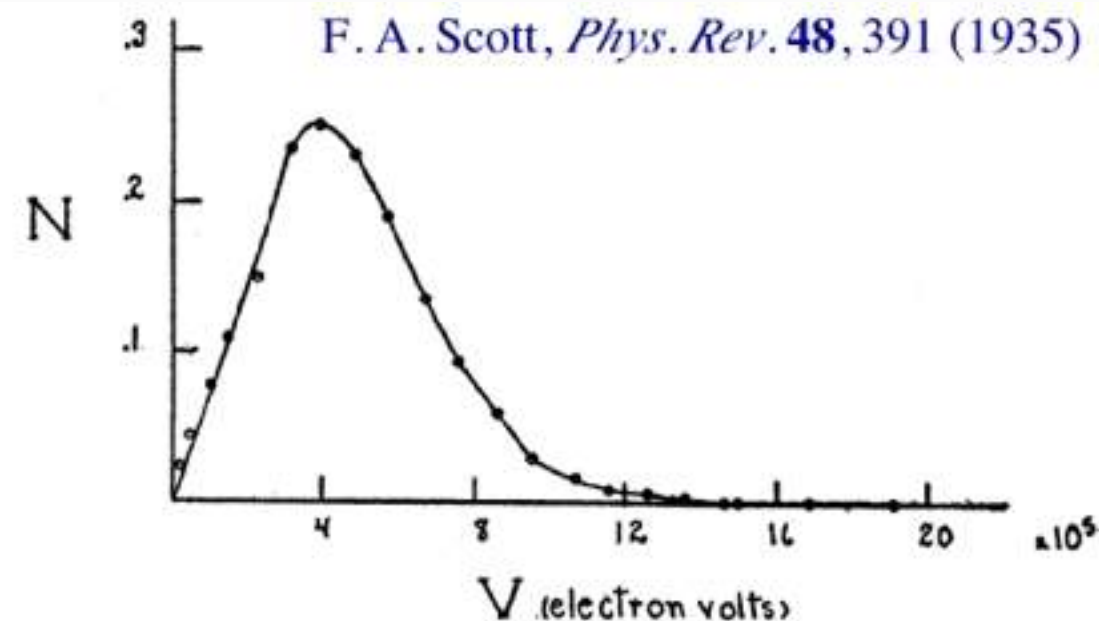
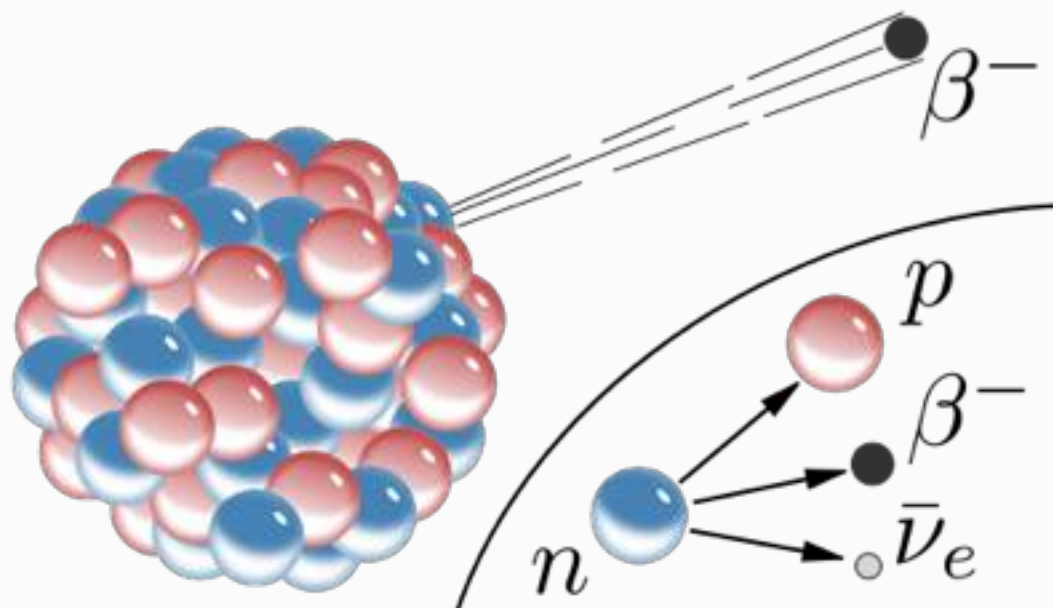
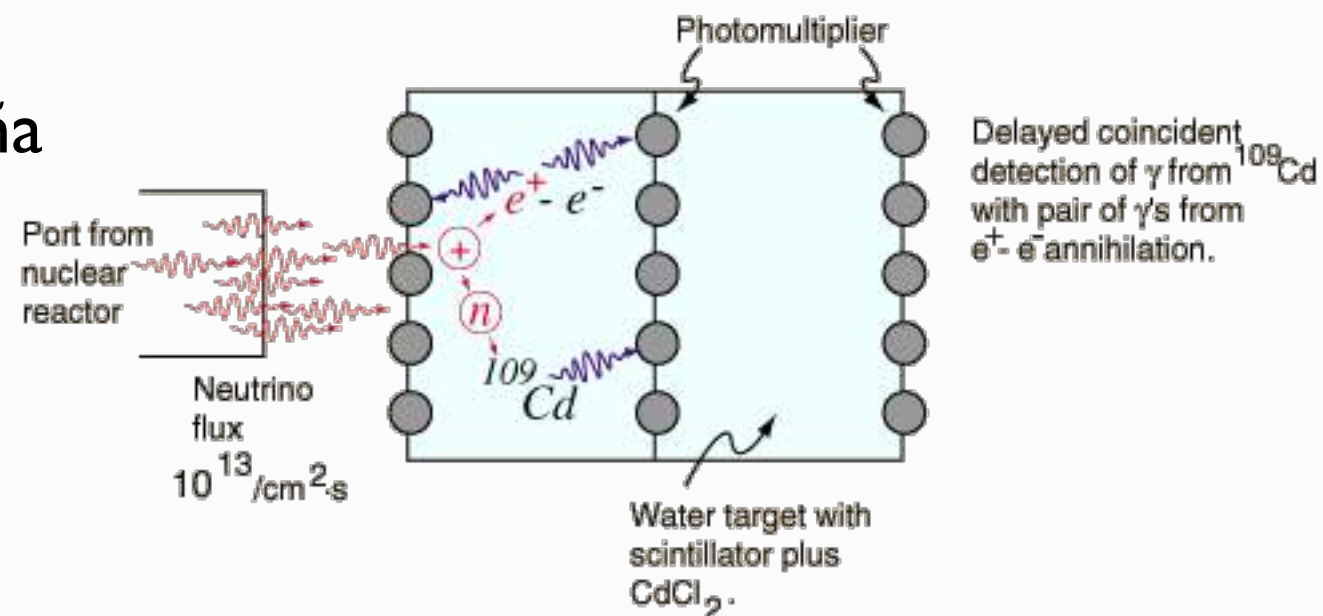


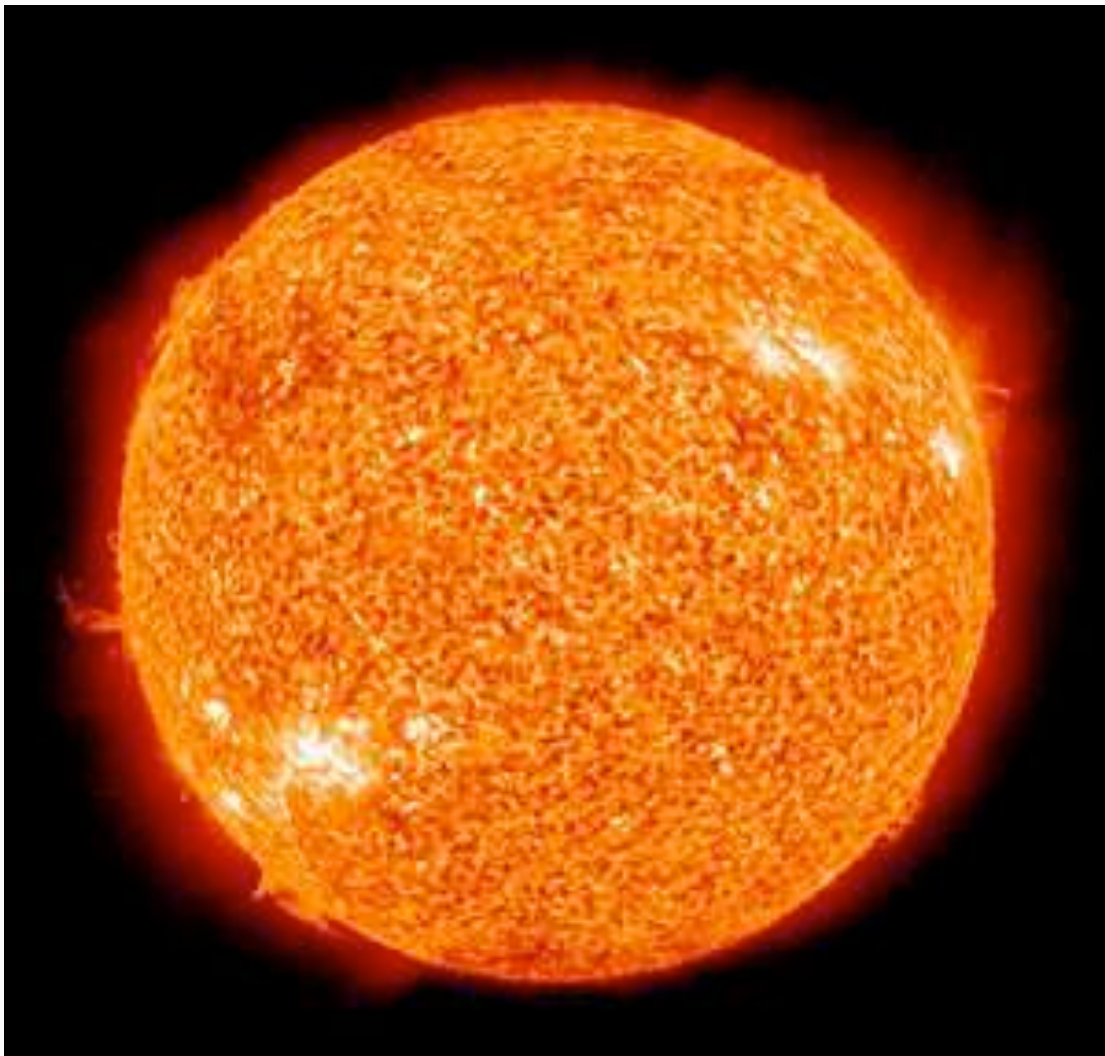
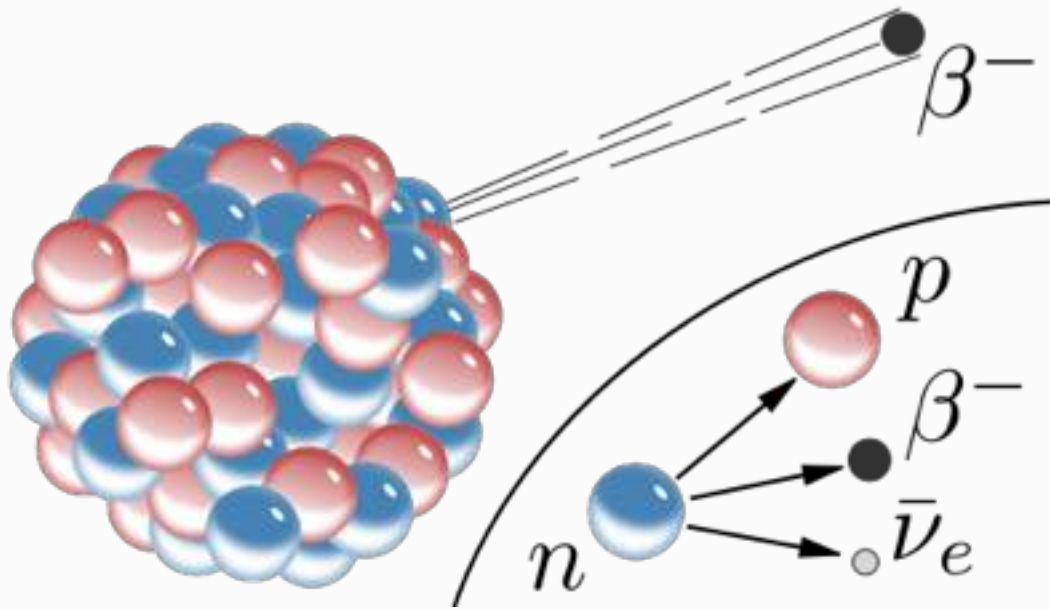
FIG. 5. Energy distribution curve of the beta-rays.

Neutrino: partícula de masa muy pequeña que se lleva la energía sobrante.

Detectado directamente sólo en 1956.



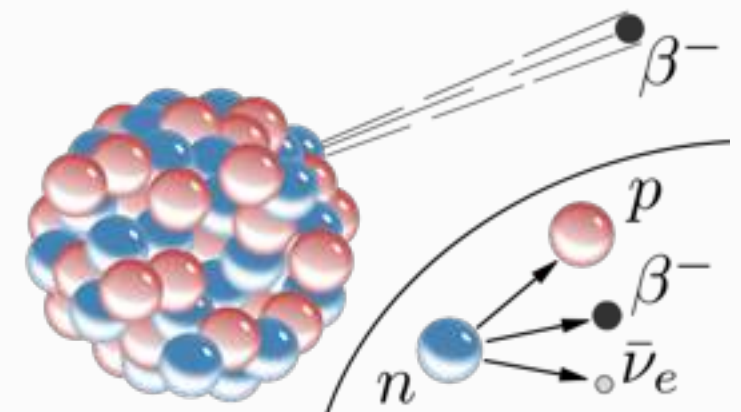
La interacción nuclear débil: neutrinos



La interacción nuclear fuerte: mesones de Yukawa

Interacción electromagnética: fuerza mediada por fotones (luz).

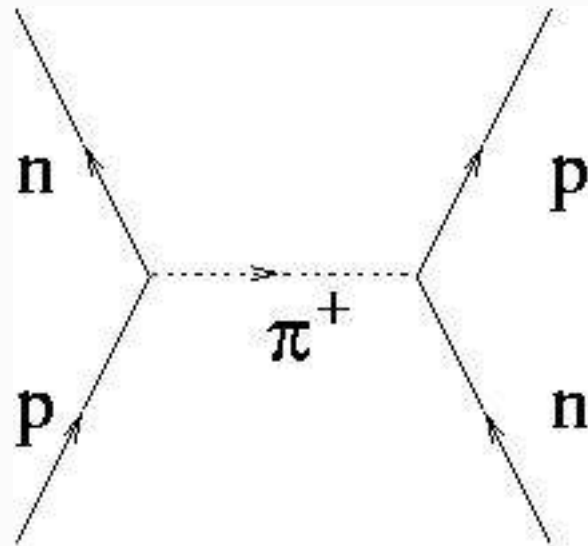
Interacción nuclear débil: teoría de Fermi.



Interacción nuclear fuerte: ¿cómo permanecen unidos los protones y los neutrones, venciendo la repulsión electromagnética?

La interacción nuclear fuerte: mesones de Yukawa

Fuerza nuclear mediada por una partícula hipotética (“mesón”).

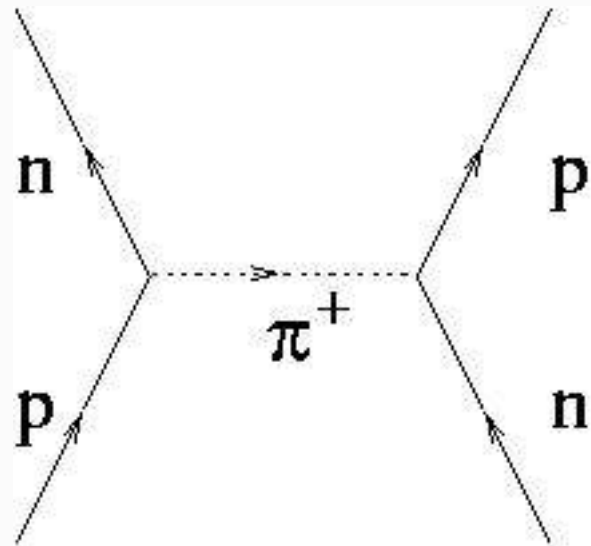


Yukawa 1934

Interacción nuclear fuerte: ¿cómo permanecen unidos los protones y los neutrones, venciendo la repulsión electromagnética?

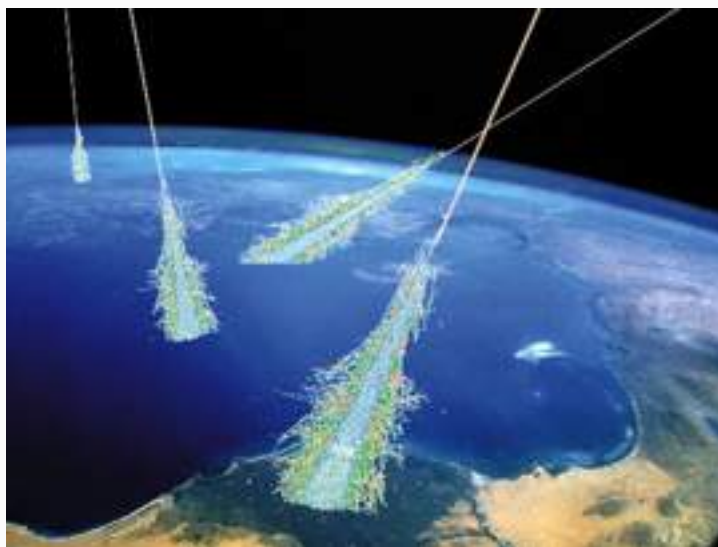
La interacción nuclear fuerte: mesones de Yukawa

Fuerza nuclear mediada por una partícula hipotética (“mesón”).



Yukawa 1934

¿Es posible detectar estos mesones fuera del medio nuclear?



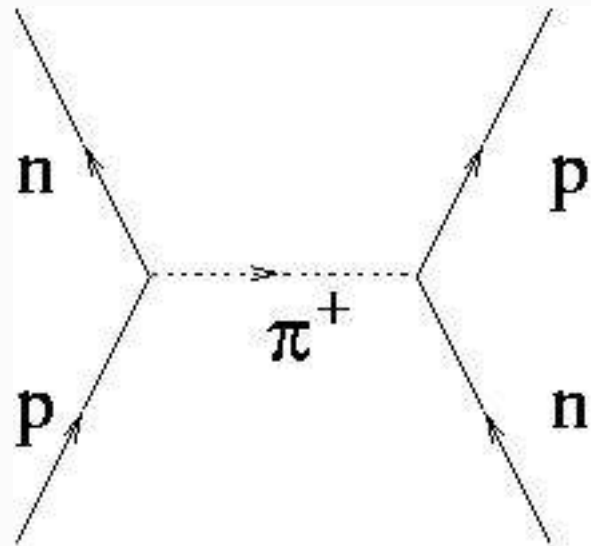
¿Muones?



Anderson, Neddermeyer 1936

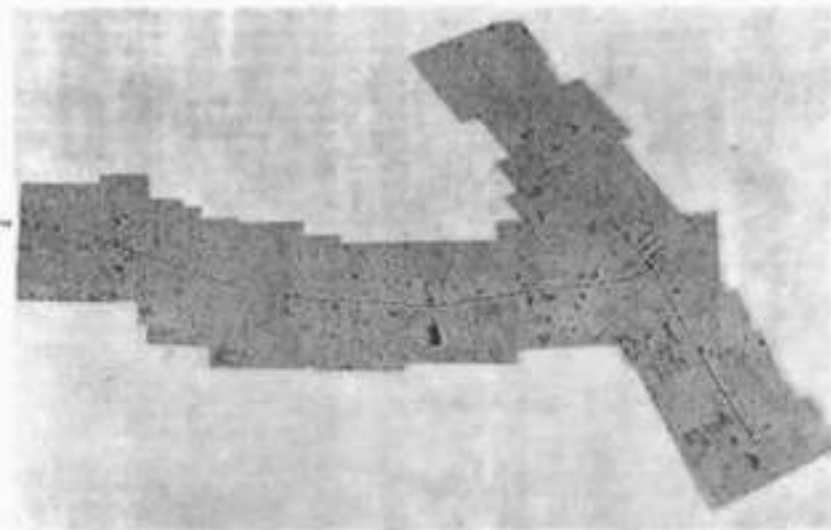
La interacción nuclear fuerte: mesones de Yukawa

Fuerza nuclear mediada por una partícula hipotética (“mesón”).



Yukawa 1934

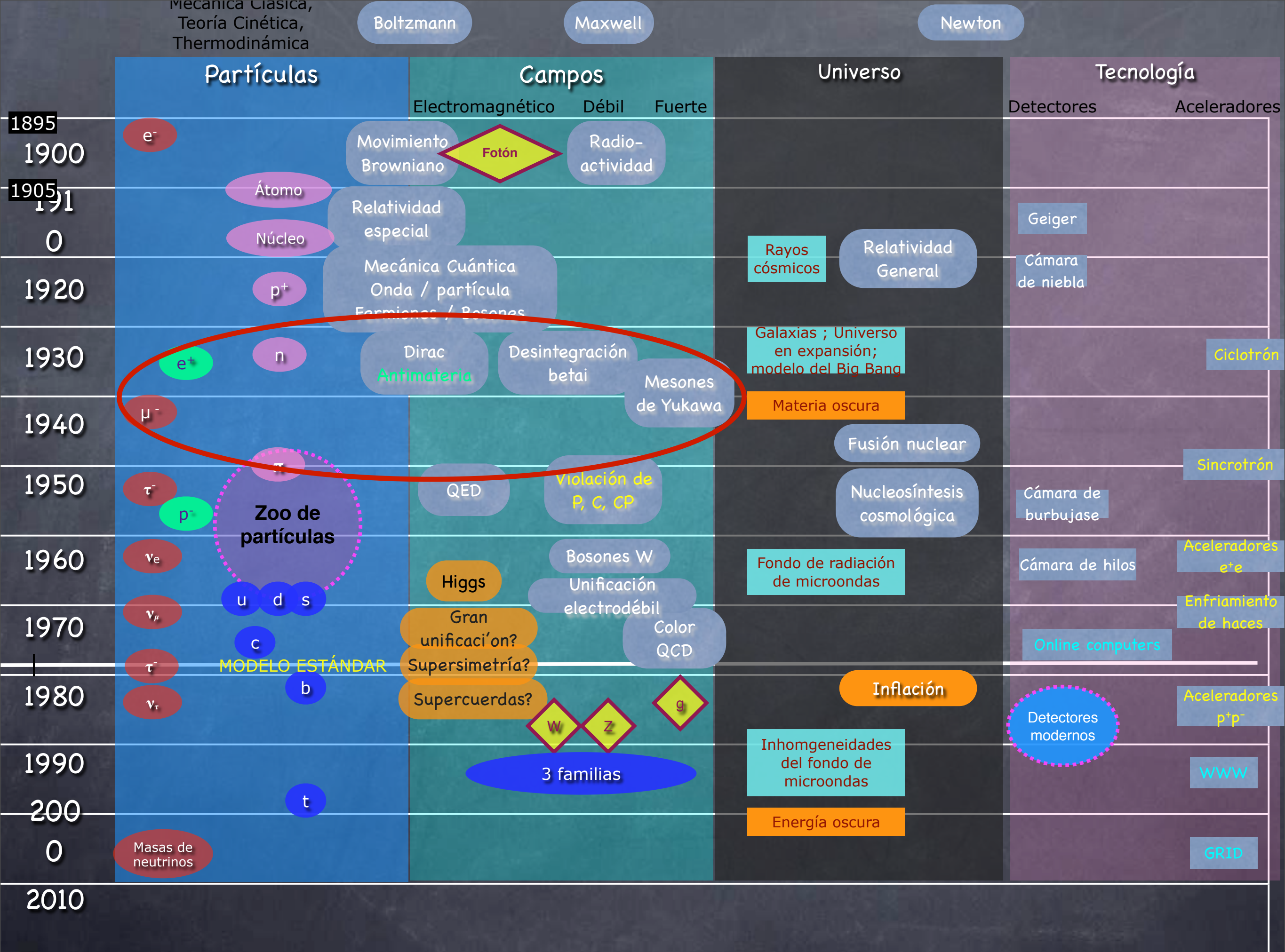
¿Es posible detectar estos mesones fuera del medio nuclear?



¿Piones?



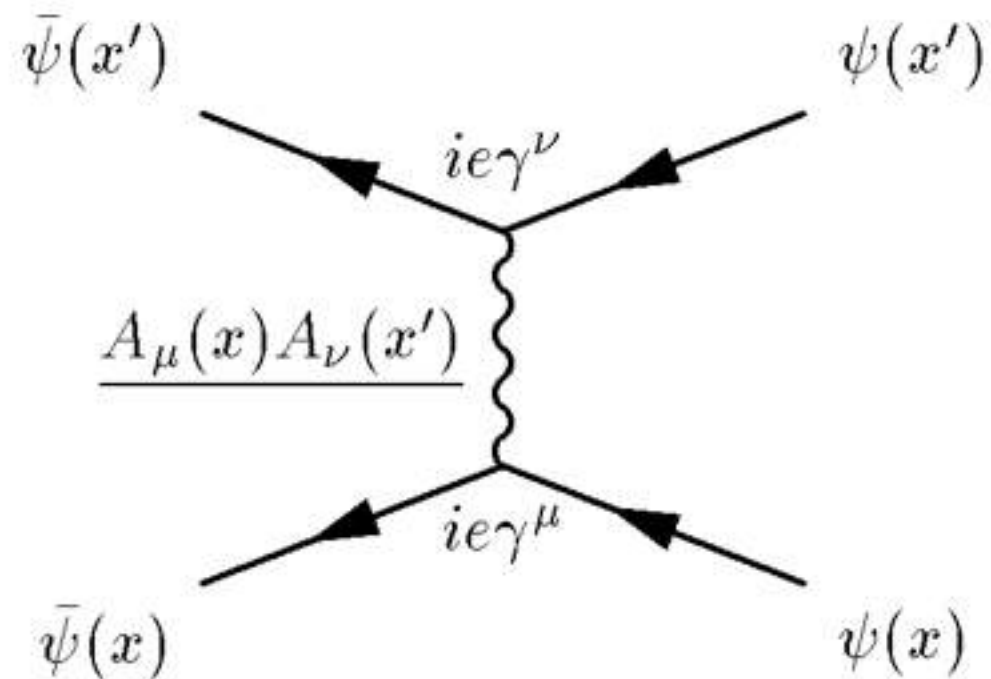
Powell, Lattes, Occhialini et al. 1947



Plan

- Introducción: escalas de espacio y de energía en Física Fundamental.
- Física Cuántica y Relatividad Especial.
 - Las preguntas revolucionarias.
 - Dirac y la Mecánica Cuántica Relativista.
 - Las interacciones nucleares débil y fuerte: neutrinos y mesones.
- Interludio: diagramas de Feynman.
- Teoría Cuántica de Campos.
 - Efectos cuánticos y fuerzas fundamentales.
 - Infinitos y Guerras.
 - La Edad de Plata: Electrodinámica Cuántica y leyes fundamentales.
- Simetrías: la Edad de Oro.
 - El Camino Óctuple: Quarks.
 - La interacción electrodébil: corrientes neutras.
 - Más infinitos.
 - El Modelo Estándar de la Física de Partículas.

Interludio: diagramas de Feynman



Instrumento gráfico para entender interacciones (suficientemente débiles) como intercambio de partículas virtuales.

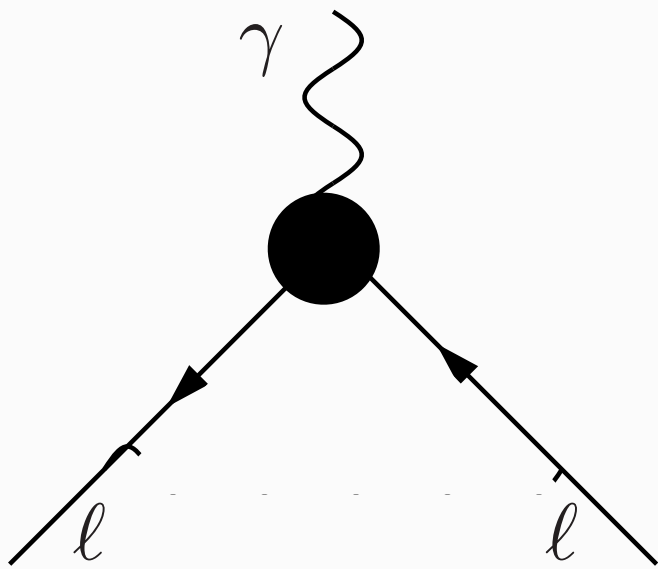
$$\Delta E \Delta t \geq \hbar$$
$$E = mc^2$$

Feynman, c. 1944
(Manhattan Project)



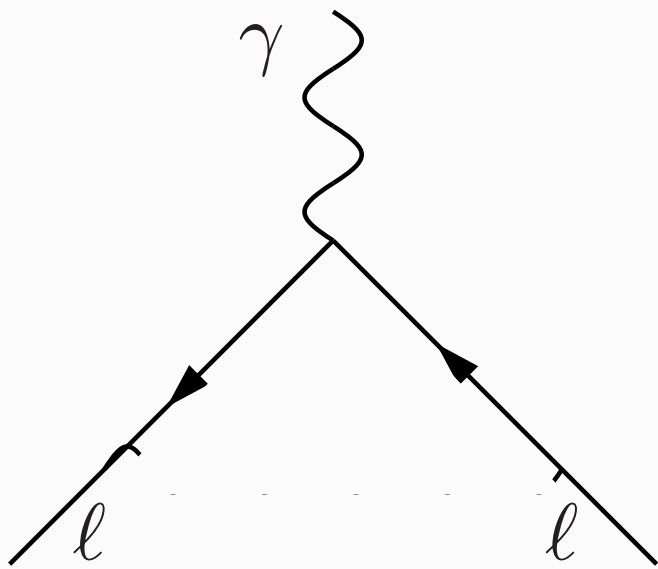
Interludio: diagramas de Feynman

Cualquier proceso se puede escribir como suma de todos los diagramas posibles, en una expansión en que cada orden es proporcional a g^{2n} : serie de potencias.



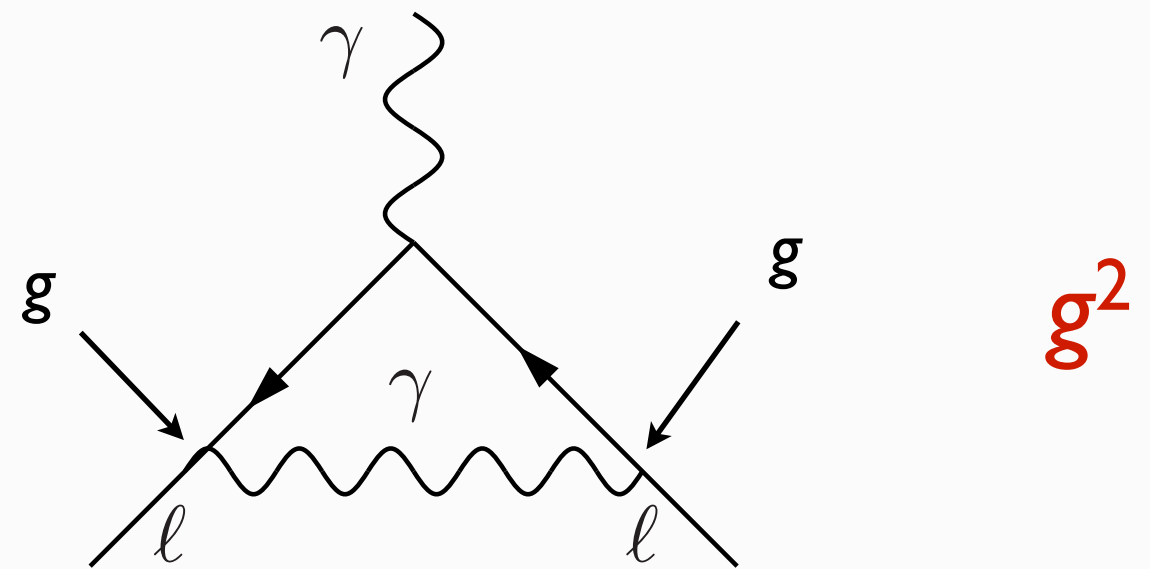
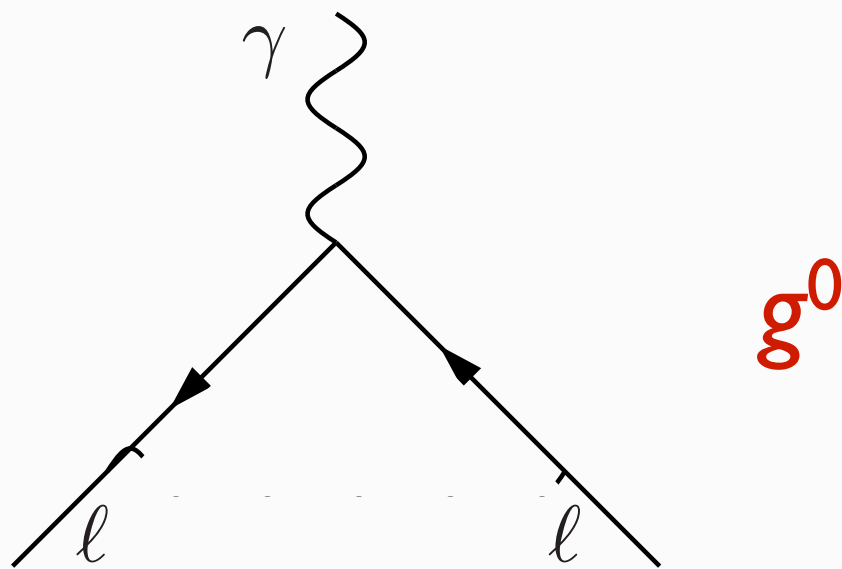
Interludio: diagramas de Feynman

Cualquier proceso se puede escribir como suma de todos los diagramas posibles, en una expansión en que cada orden es proporcional a g^{2n} : serie de potencias.



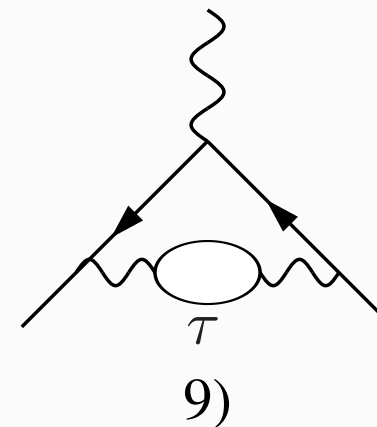
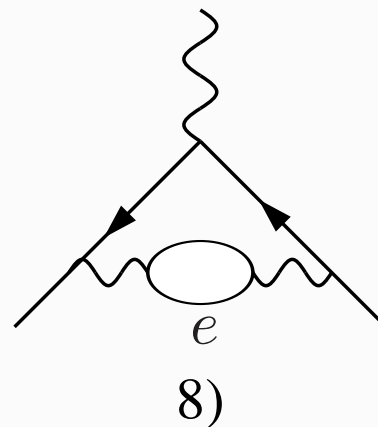
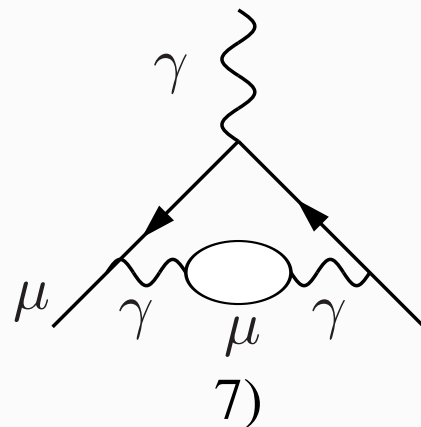
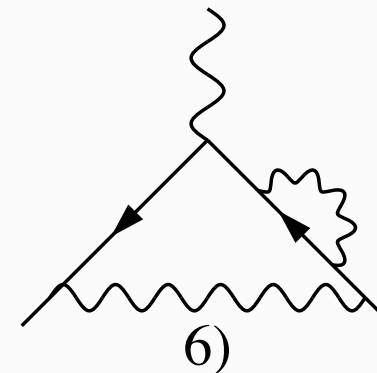
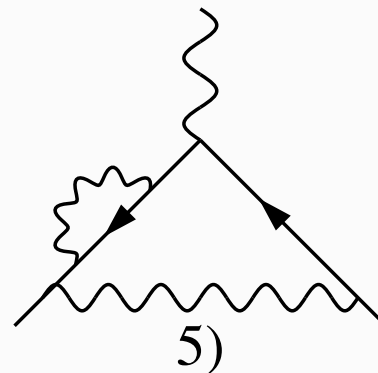
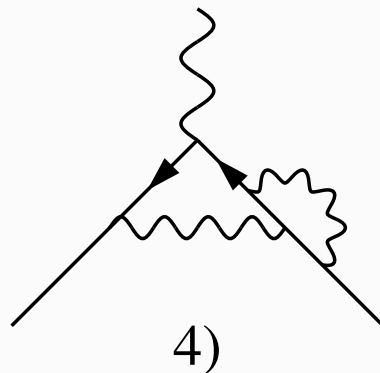
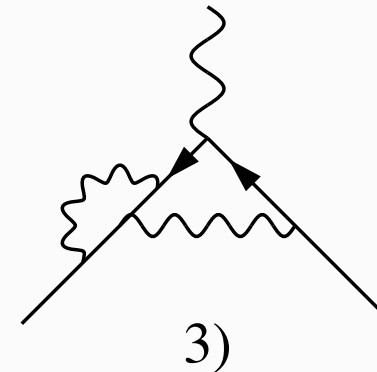
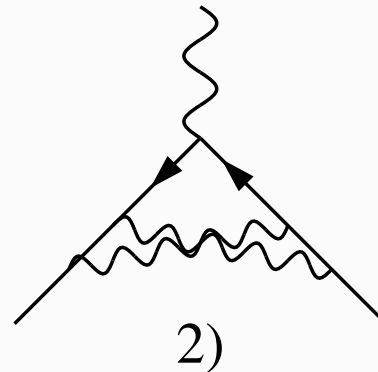
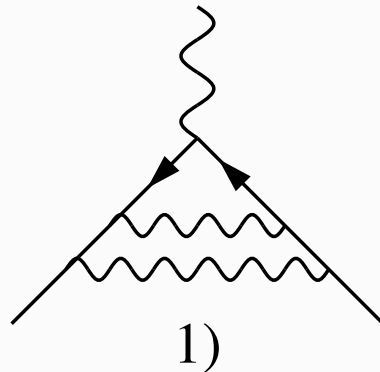
Interludio: diagramas de Feynman

Cualquier proceso se puede escribir como suma de todos los diagramas posibles, en una expansión en que cada orden es proporcional a g^{2n} : serie de potencias.



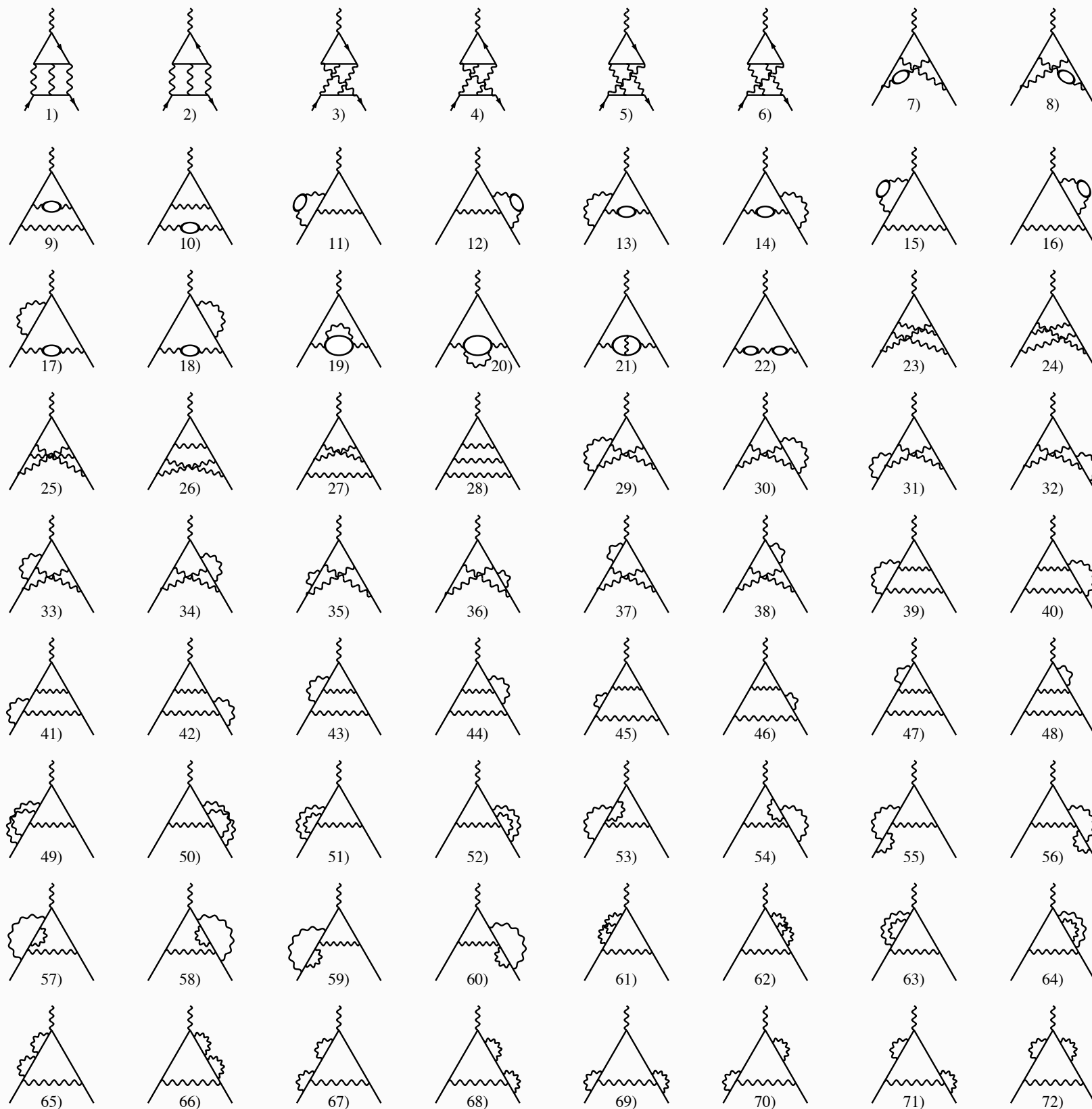
$$A = A_0 + A_1 g^2 + A_2 g^4 + A_3 g^6 + \dots$$

Interludio: diagramas de Feynman



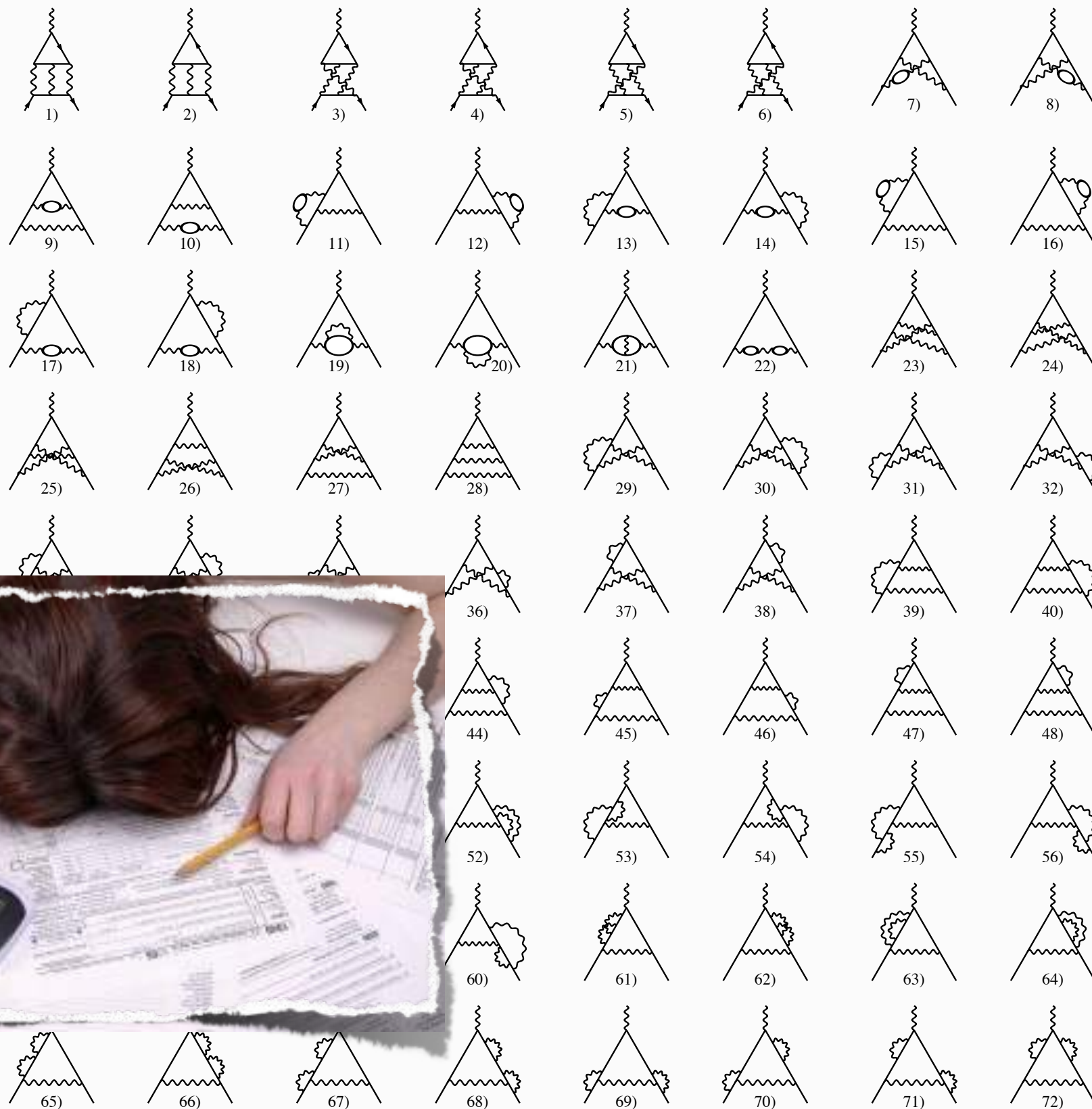
g^4

Interludio: diagramas de Feynman



gg⁶

Interludio: diagramas de Feynman



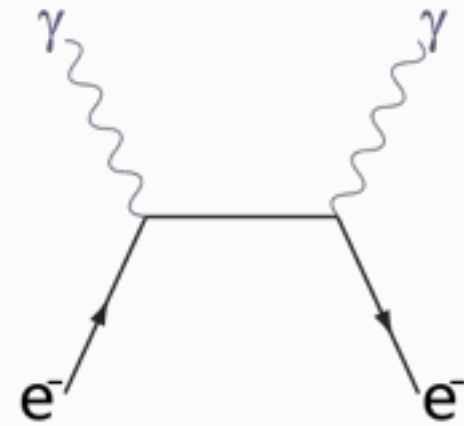
gg⁶

Plan

- Introducción: escalas de espacio y de energía en Física Fundamental.
- Física Cuántica y Relatividad Especial.
 - Las preguntas revolucionarias.
 - Dirac y la Mecánica Cuántica Relativista.
 - Las interacciones nucleares débil y fuerte: neutrinos y mesones.
- Interludio: diagramas de Feynman.
- Teoría Cuántica de Campos.
 - Efectos cuánticos y fuerzas fundamentales.
 - Infinitos y Guerras.
 - La Edad de Plata: Electrodinámica Cuántica y leyes fundamentales.
- Simetrías: la Edad de Oro.
 - El Camino Óctuple: Quarks.
 - La interacción electrodébil: corrientes neutras.
 - Más infinitos.
 - El Modelo Estándar de la Física de Partículas.

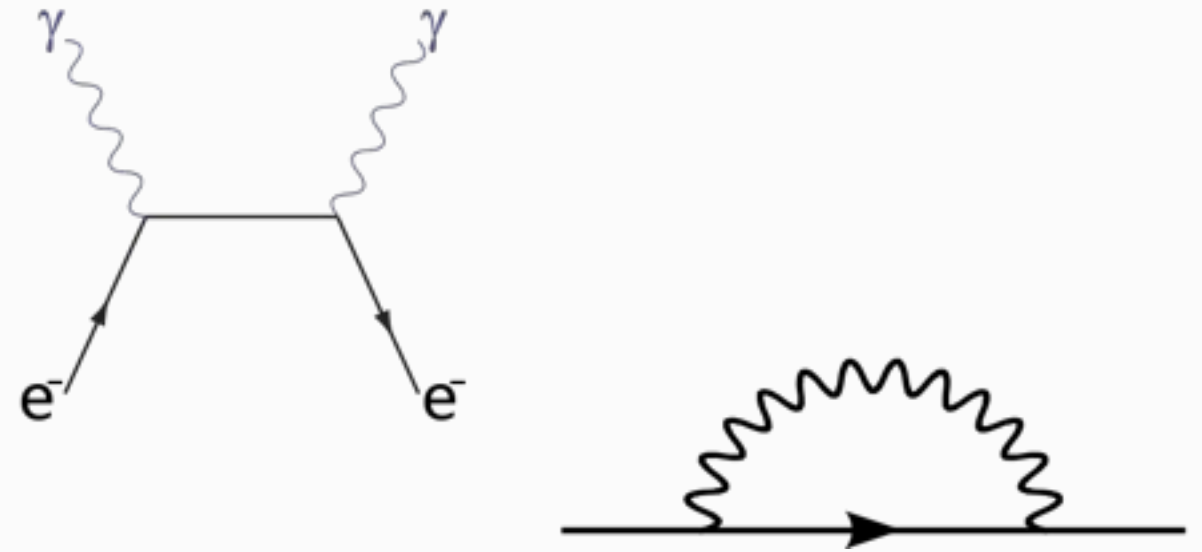
Efectos cuánticos y fuerzas a larga distancia

Una carga, al propagarse en un campo e.m., absorbe y reemite fotones continuamente.

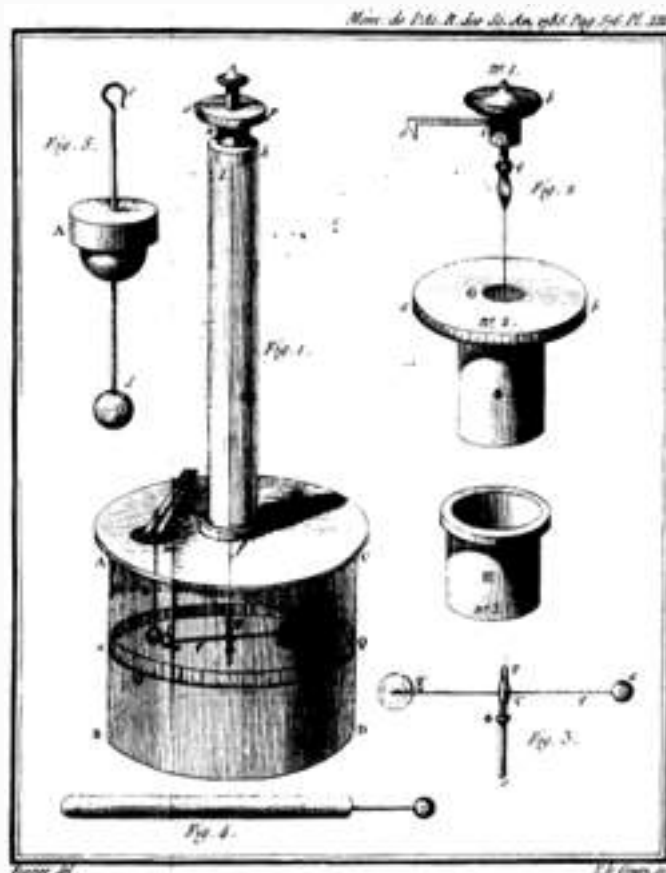


Efectos cuánticos y fuerzas a larga distancia

Una carga, al propagarse en un campo e.m., absorbe y reemite fotones continuamente.



El cálculo de todos los diagramas posibles da la probabilidad de que un fotón emitido por una carga sea absorbido por otra carga a una distancia r .

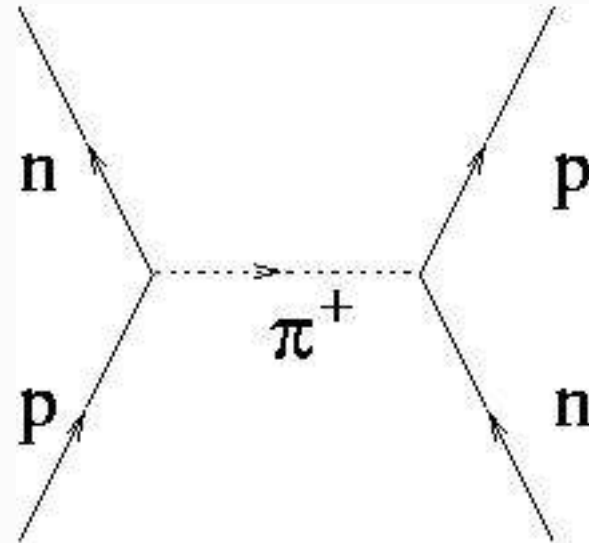


$$V(r) = c \frac{qq'}{r^2}$$

Ley de Coulomb

Efectos cuánticos y fuerzas a larga distancia

Idem para otras fuerzas



El cálculo de todos los diagramas posibles da la probabilidad de que un fotón emitido por una carga sea absorbido por otra carga a una distancia r .



Yukawa 1934

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

Potencial de Yukawa

Infinitos y Guerras

La ecuación de Dirac no proporciona una descripción completa de la electrodinámica: la reacción del campo electromagnético sobre las cargas eléctricas genera divergencias (efectos no físicos).

Infinitos y Guerras

La ecuación de Dirac no proporciona una descripción completa de la electrodinámica: la reacción del campo electromagnético sobre las cargas eléctricas genera divergencias (efectos no físicos).

No es un problema nuevo: **autointeracciones** en electrodinámica clásica.

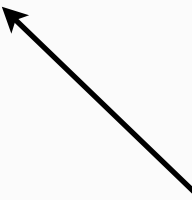
$$m_{\text{em}} = \int dV \frac{E^2}{2} = \frac{q^2}{8\pi r_e}$$

La contribución a la masa del electrón asociada a su interacción con un campo electrostático diverge si el electrón es puntual.

$$m_{\text{em}} = m_e^{\text{phys}} \Rightarrow r_e \approx 2.8 \times 10^{-15} \text{ m}$$

Abraham, Lorentz c. 1900

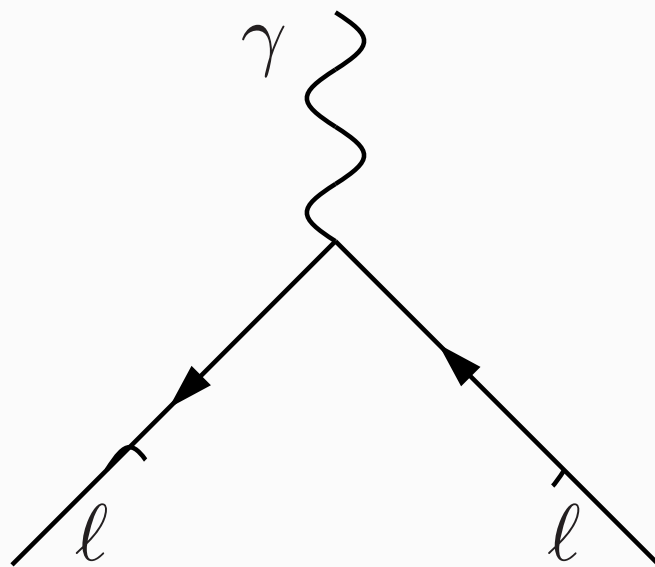
Tamaño típico de un núcleo atómico



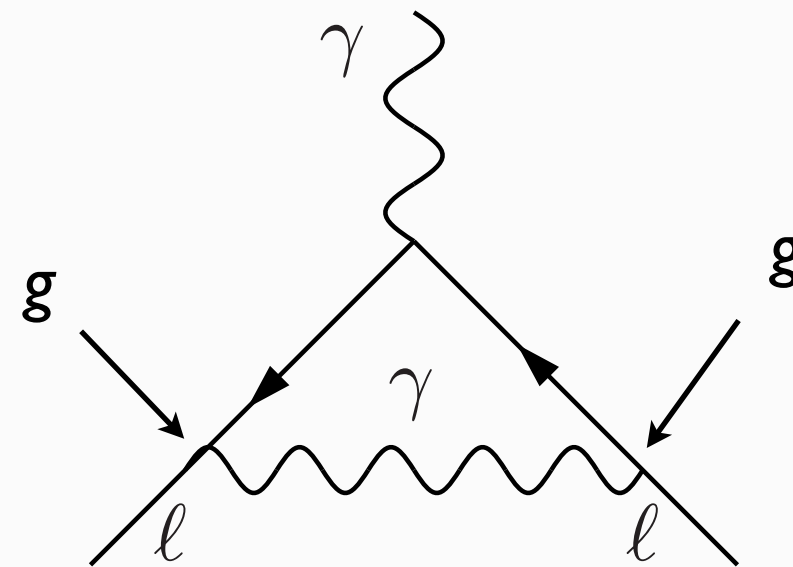
Infinitos y Guerras

La ecuación de Dirac no proporciona una descripción completa de la electrodinámica: la reacción del campo electromagnético sobre las cargas eléctricas genera divergencias (efectos no físicos).

Ocurre lo mismo para las correcciones asociadas a partículas virtuales que generan “loops”.



g^0

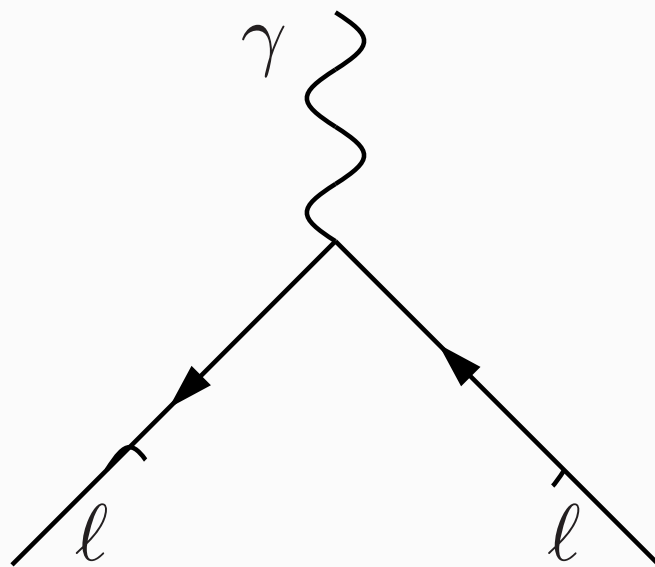


g^2

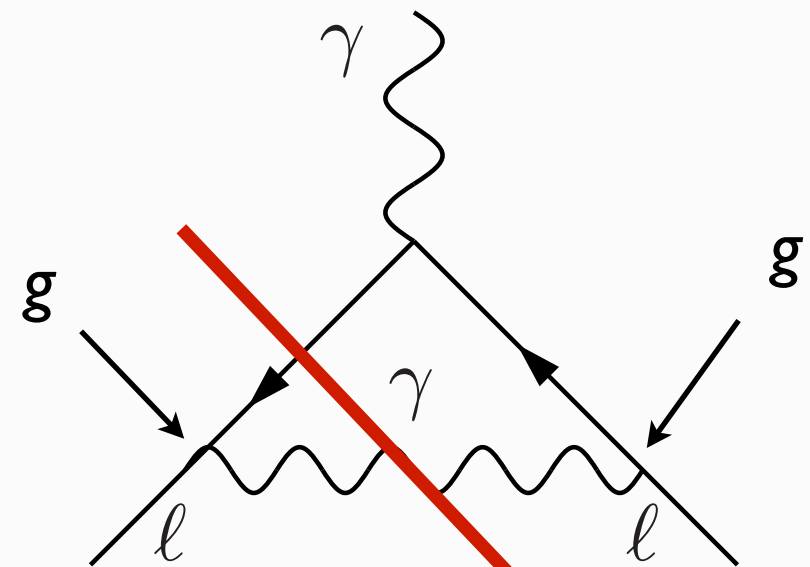
Infinitos y Guerras

La ecuación de Dirac no proporciona una descripción completa de la electrodinámica: la reacción del campo electromagnético sobre las cargas eléctricas genera divergencias (efectos no físicos).

Ocurre lo mismo para las correcciones asociadas a partículas virtuales que generan “loops”.



g^0



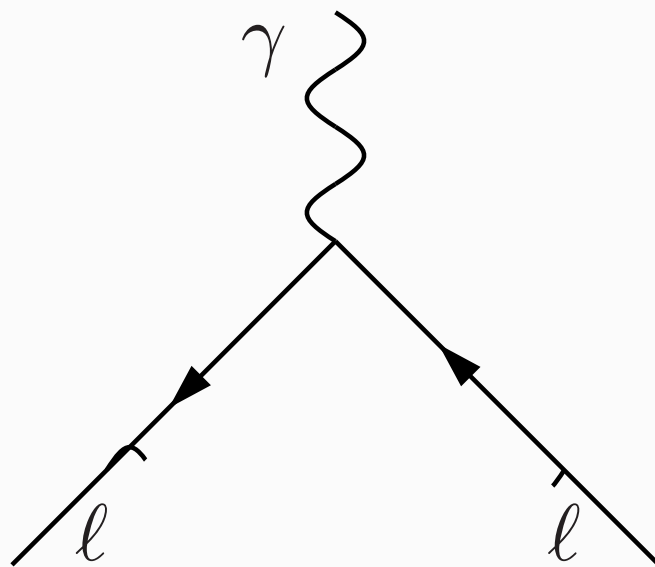
g^2

∞

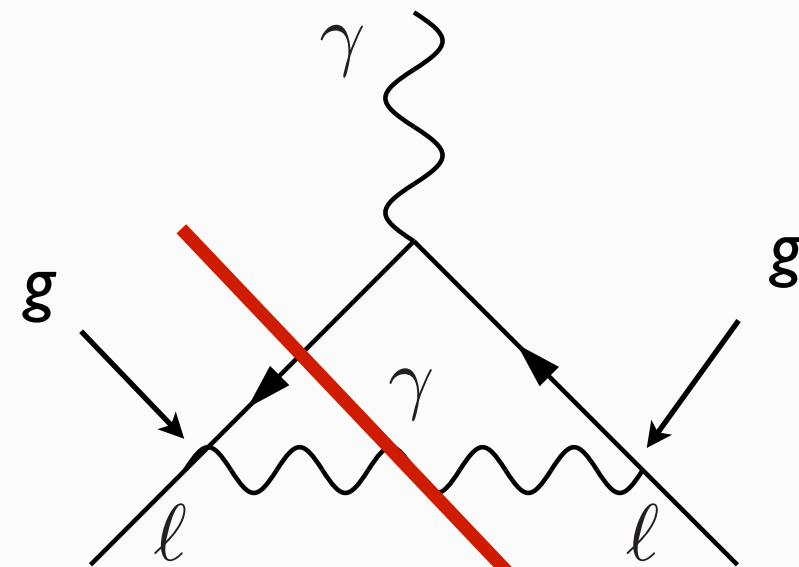
Infinitos y Guerras

La ecuación de Dirac no proporciona una descripción completa de la electrodinámica: la reacción del campo electromagnético sobre las cargas eléctricas genera divergencias (efectos no físicos).

Ocurre lo mismo para las correcciones asociadas a partículas virtuales que generan “loops”.



g^0



g^2

∞

Este problema frenó el desarrollo de la TCC entre mediados de los 1930 y 1948...

Infinitos y Guerras

... aunque también hubo motivos más serios.



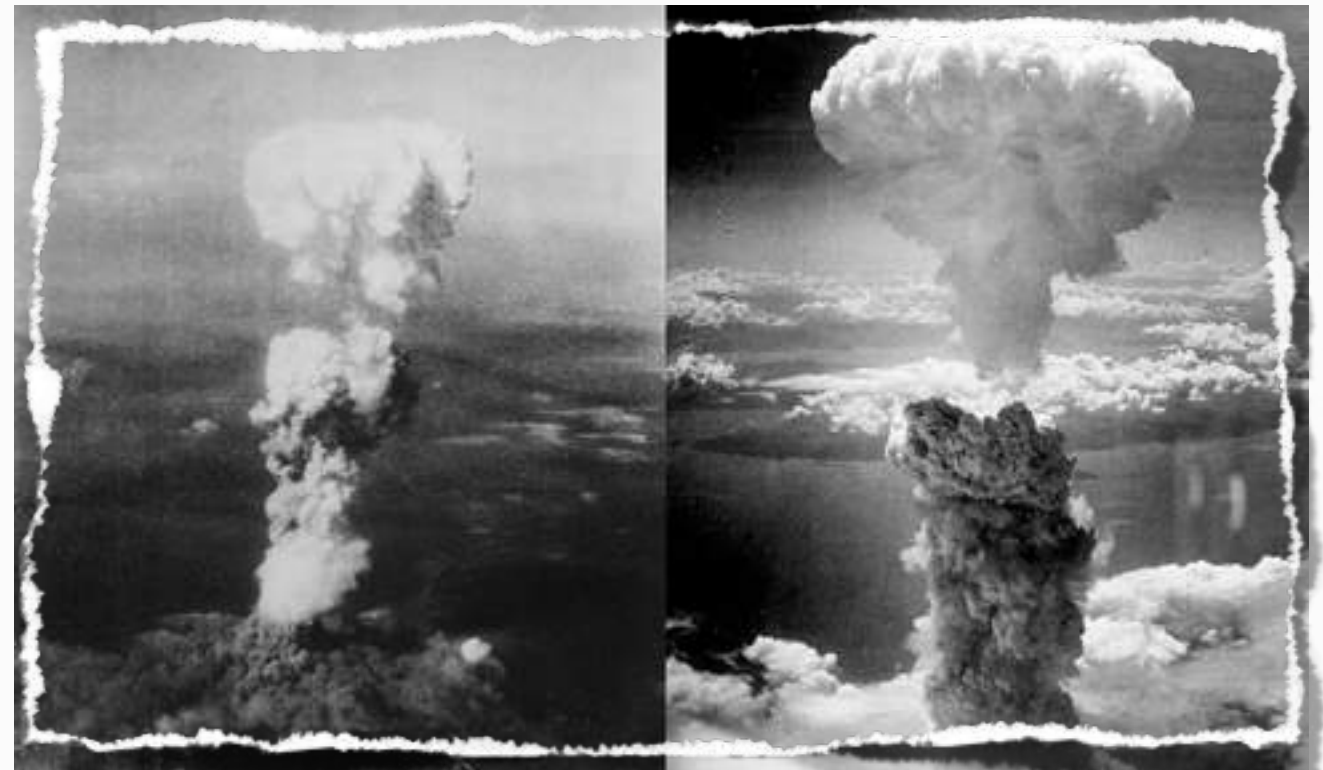
Albert Einstein
Old Grove Rd.
Nassau Point
Peconic, Long Island

August 2nd, 1939

F.D. Roosevelt,
President of the United States,
White House
Washington, D.C.

Sir:

Some recent work by E. Fermi and L. Szilard, which has been communicated to me in manuscript, leads me to expect that the element uranium may be transformed into a new and important source of energy in the im-



Renormalización: la Teoría Cuántica de Campos

Los infinitos no son tales: desaparecen si se acepta que la magnitud de las fuerzas (valores de cargas y masas) **cambia como función de la distancia**.



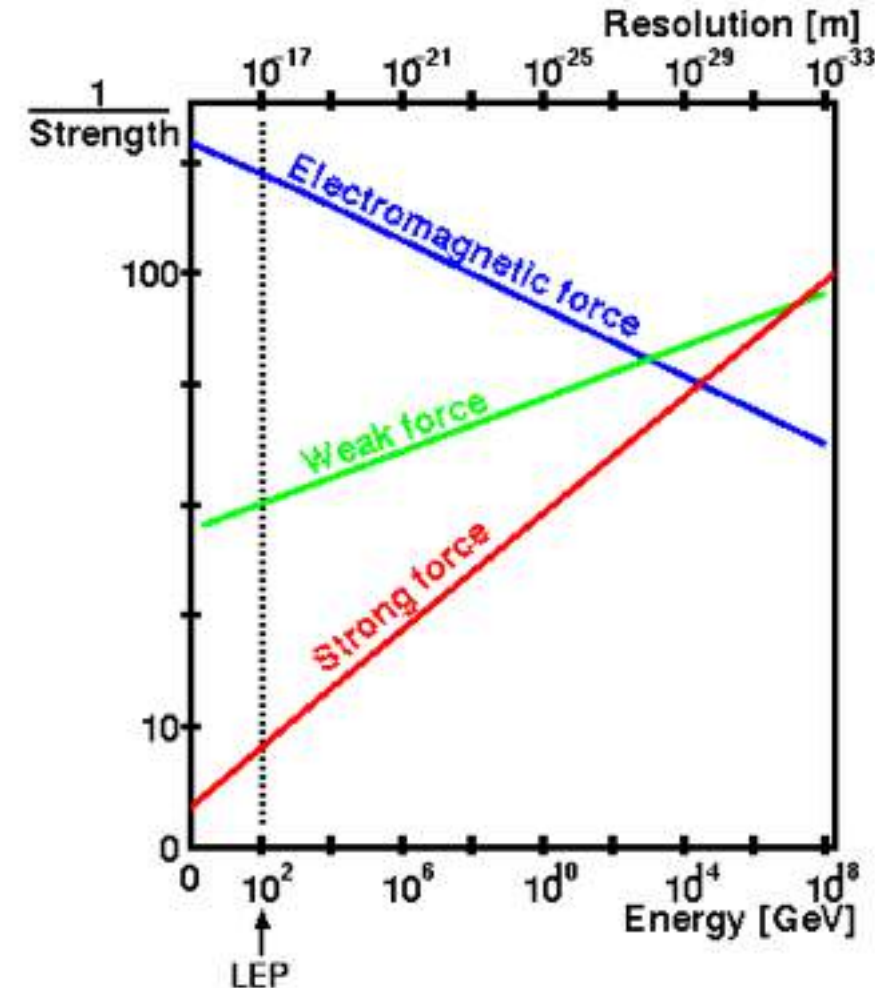
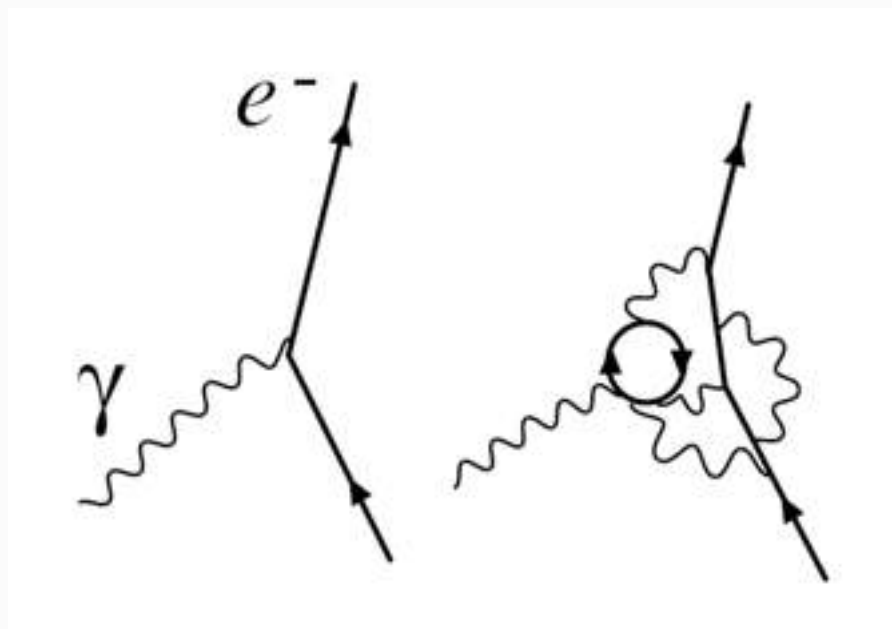
Dyson, Feynman, Schwinger, Stückelberg, Tomonaga | 1934-1948

Renormalización: la Teoría Cuántica de Campos

Los infinitos no son tales: desaparecen si se acepta que la magnitud de las fuerzas (valores de cargas y masas) **cambia como función de la distancia**.



Dyson, Feynman, Schwinger, Stückelberg, Tomonaga | 1934-1948

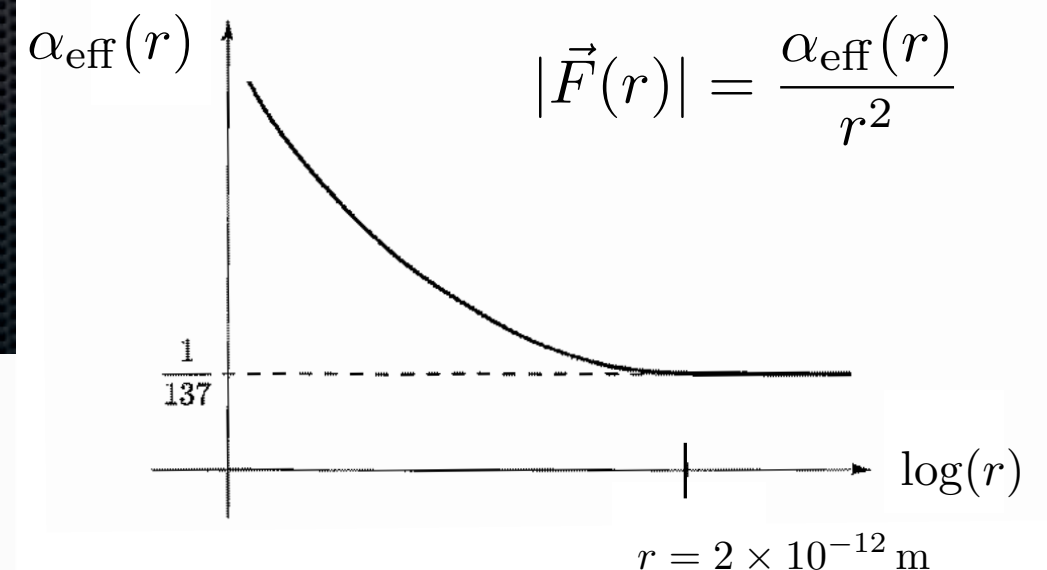
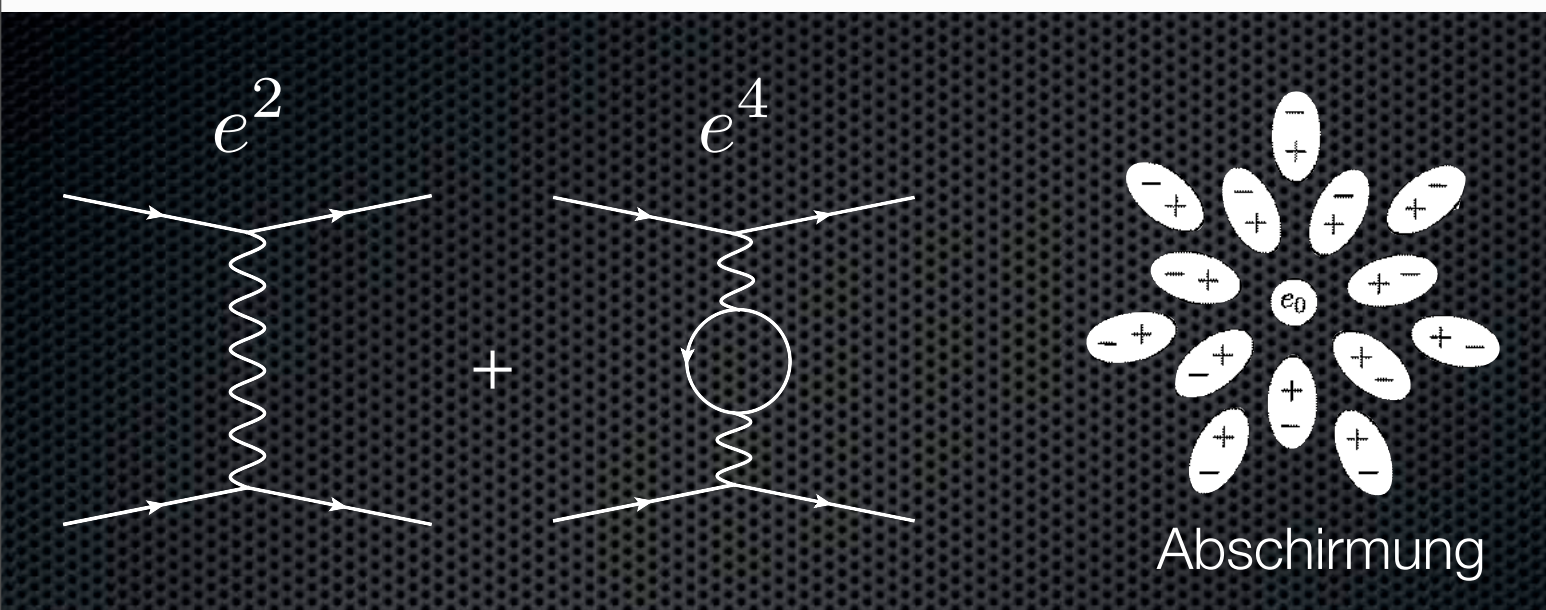


Renormalización: la Teoría Cuántica de Campos

Los infinitos no son tales: desaparecen si se acepta que la magnitud de las fuerzas (valores de cargas y masas) **cambia como función de la distancia**.



Dyson, Feynman, Schwinger, Stüeckelberg, Tomonaga | 1934-1948



Renormalización: la Teoría Cuántica de Campos

Los infinitos no son tales: desaparecen si se acepta que la magnitud de las fuerzas (valores de cargas y masas) **cambia como función de la distancia**.

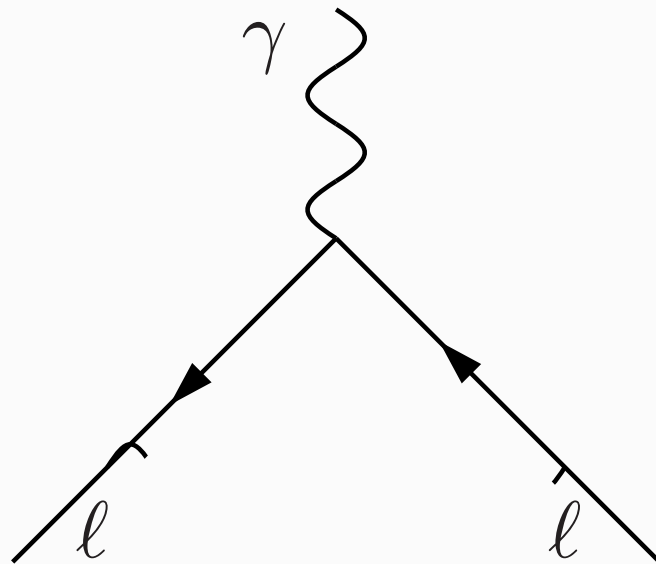


Dyson, Feynman, Schwinger, Stüeckelberg, Tomonaga | 1934-1948

N.B.: el juego de la renormalización NO funciona siempre. Es consistente para la electrodinámica, pero NO para los modelos de Fermi y Yukawa.

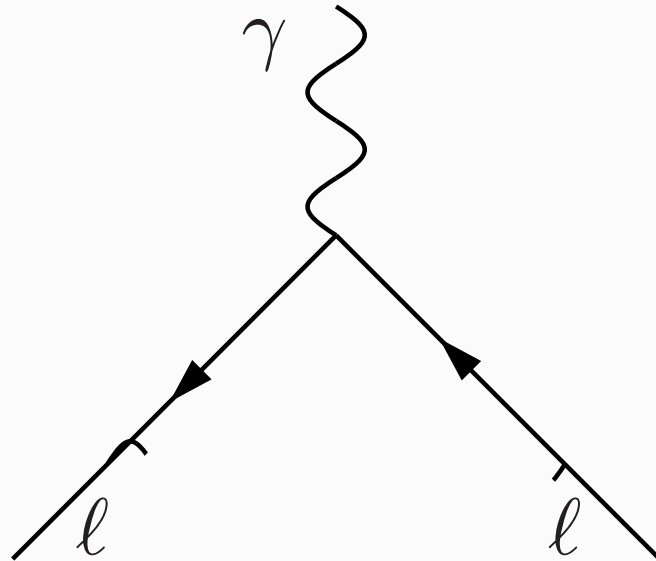
Falta una teoría consistente para las interacciones nucleares fuerte y débil.

El momento magnético anómalo del electrón

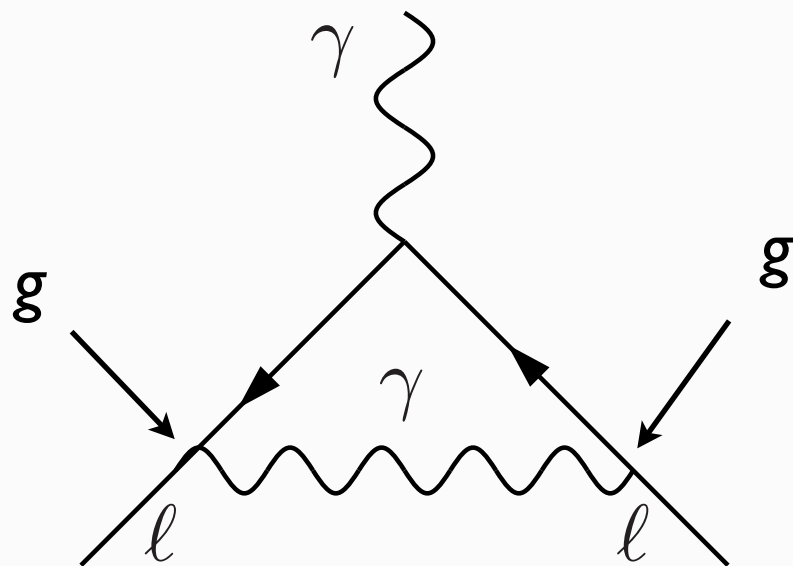


$$a = \frac{g - 2}{2} \quad \text{Dirac: } g = 2$$

El momento magnético anómalo del electrón



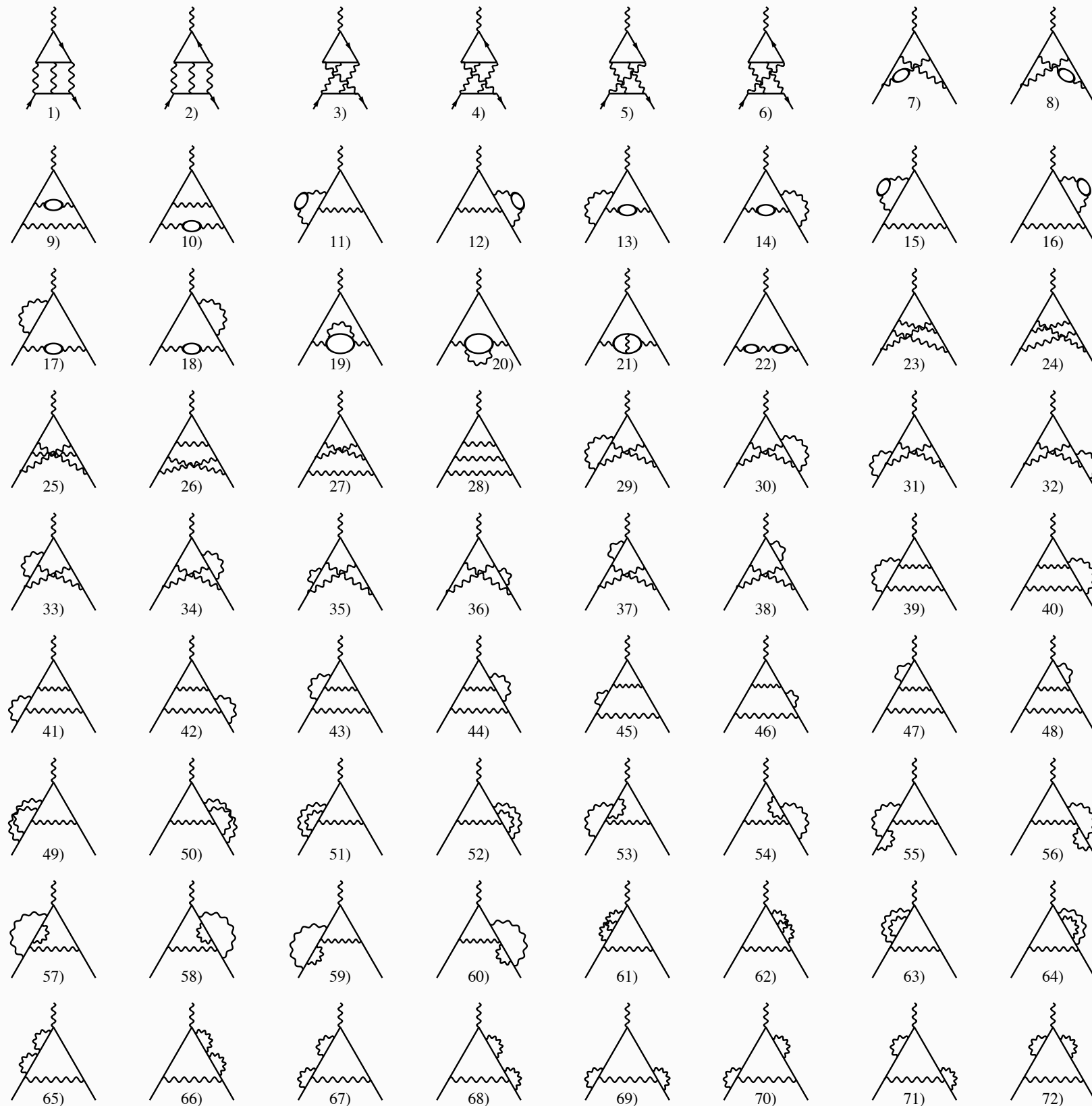
$$a = \frac{g - 2}{2} \quad \text{Dirac: } g = 2$$



$$a = \frac{\alpha}{2\pi} \approx 0.0011614$$

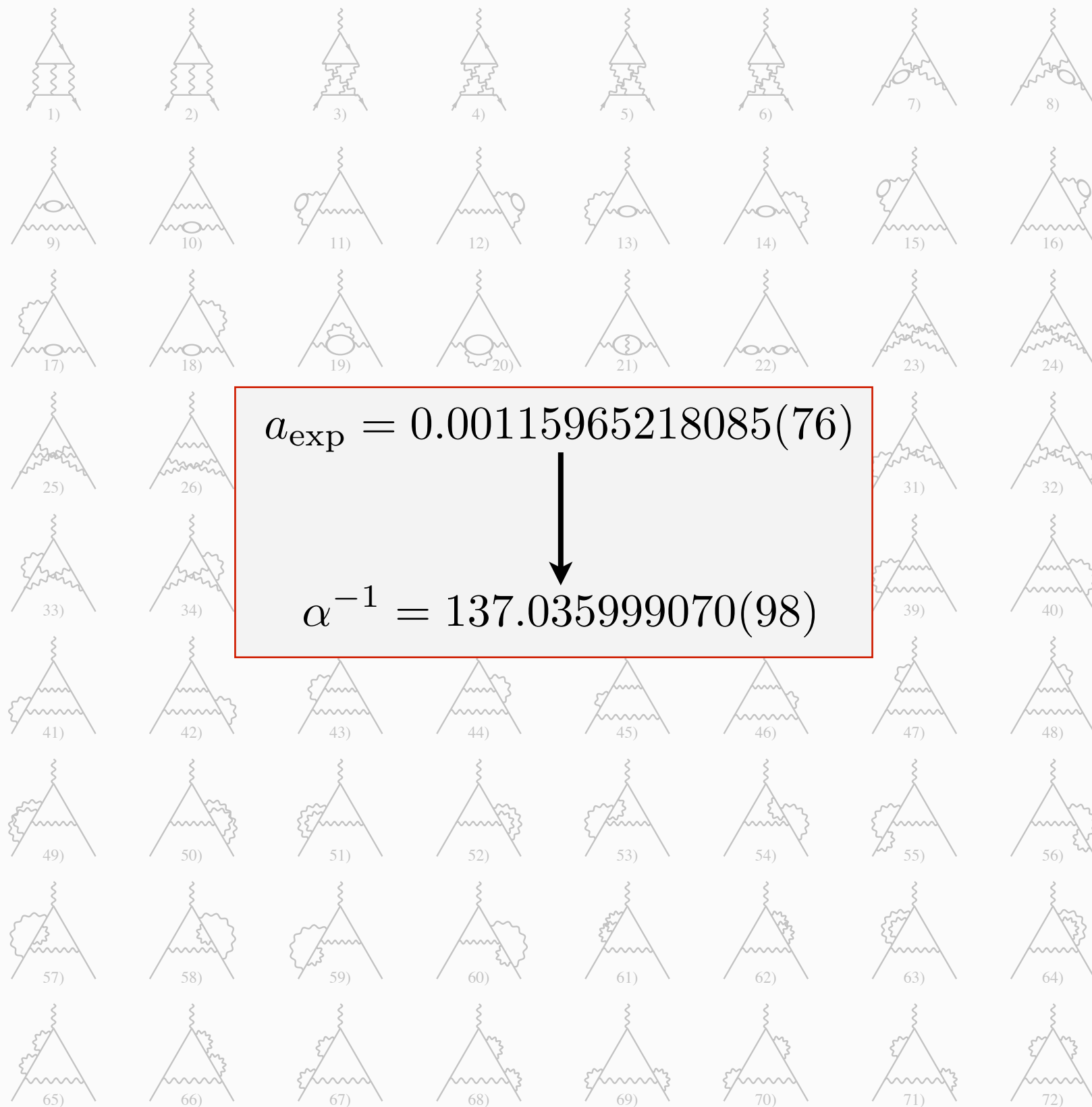
Schwinger 1948

El momento magnético anómalo del electrón



gg⁶

El momento magnético anómalo del electrón



La edad de plata de la teoría de campos

La madurez técnica de la TCC permitió demostrar muchas propiedades fundamentales de la naturaleza que habían sido postuladas durante la revolución cuántica.

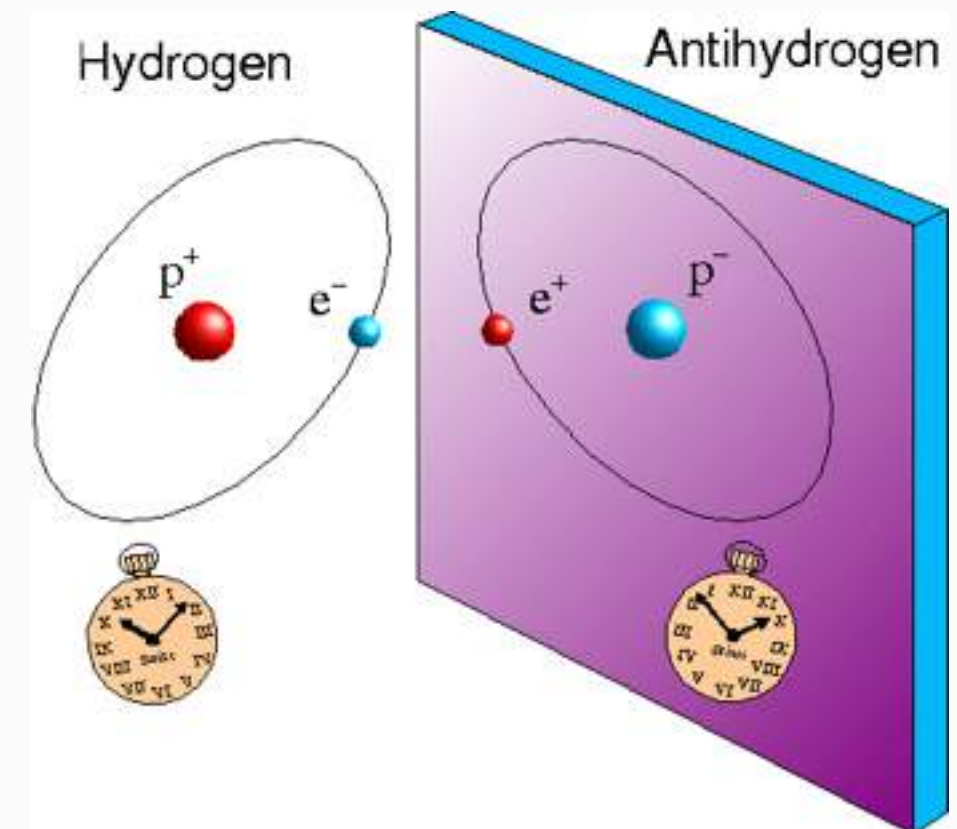
➔ Fermiones y bosones: sólo dos tipos de campos bajo relatividad especial.

➔ Spin-estadística: principio de exclusión de Pauli.

A. Wightman, 30/03/1922-13/01/2013

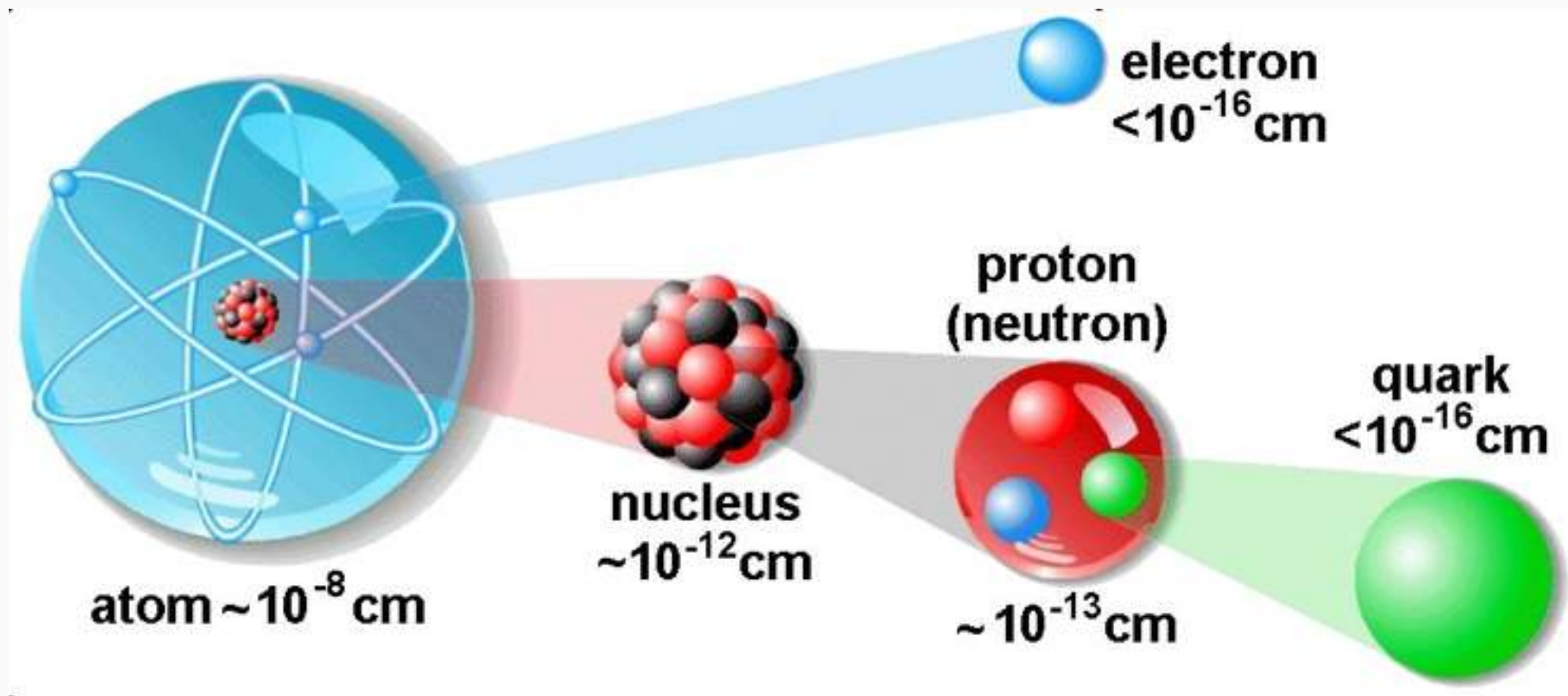
“El átomo está tan lleno como es físicamente posible.”

➔ Simetrías discretas: el universo es invariante bajo *CPT*, pero no necesariamente bajo *C*, *P* o *T*.



La edad de plata de la teoría de campos

... pero el progreso del núcleo atómico fue lento, hasta que emergió toda la importancia de las propiedades de simetría de la Física Fundamental.

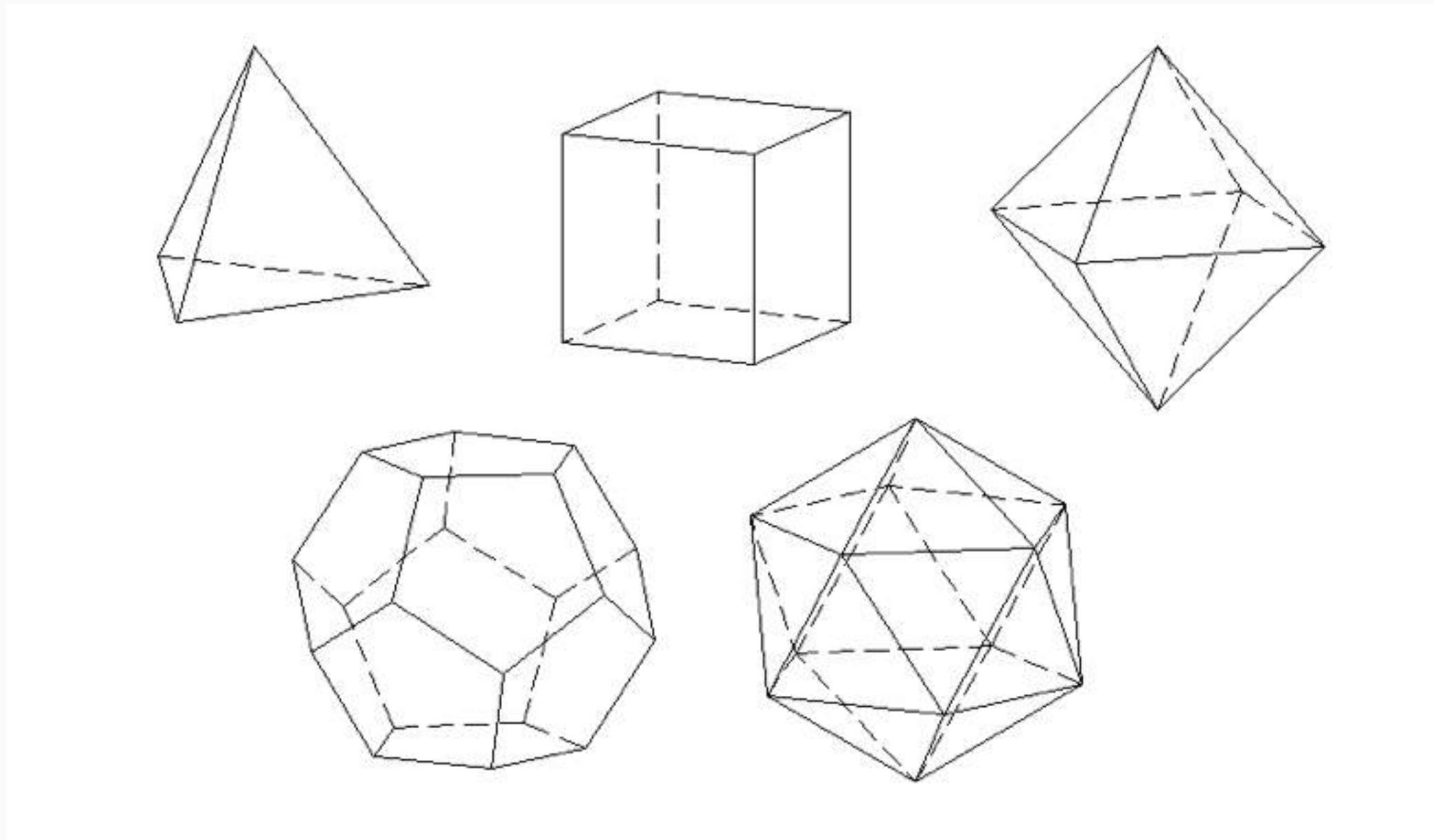


Electromagnetismo

Interacciones nucleares
débil y fuerte

Simetría: La edad de oro de la teoría de campos

... pero el progreso del núcleo atómico fue lento, hasta que emergió toda la importancia de las propiedades de simetría de la Física Fundamental.



"What is especially striking and remarkable is that in fundamental physics a beautiful or elegant theory is more likely to be right than a theory that is inelegant."

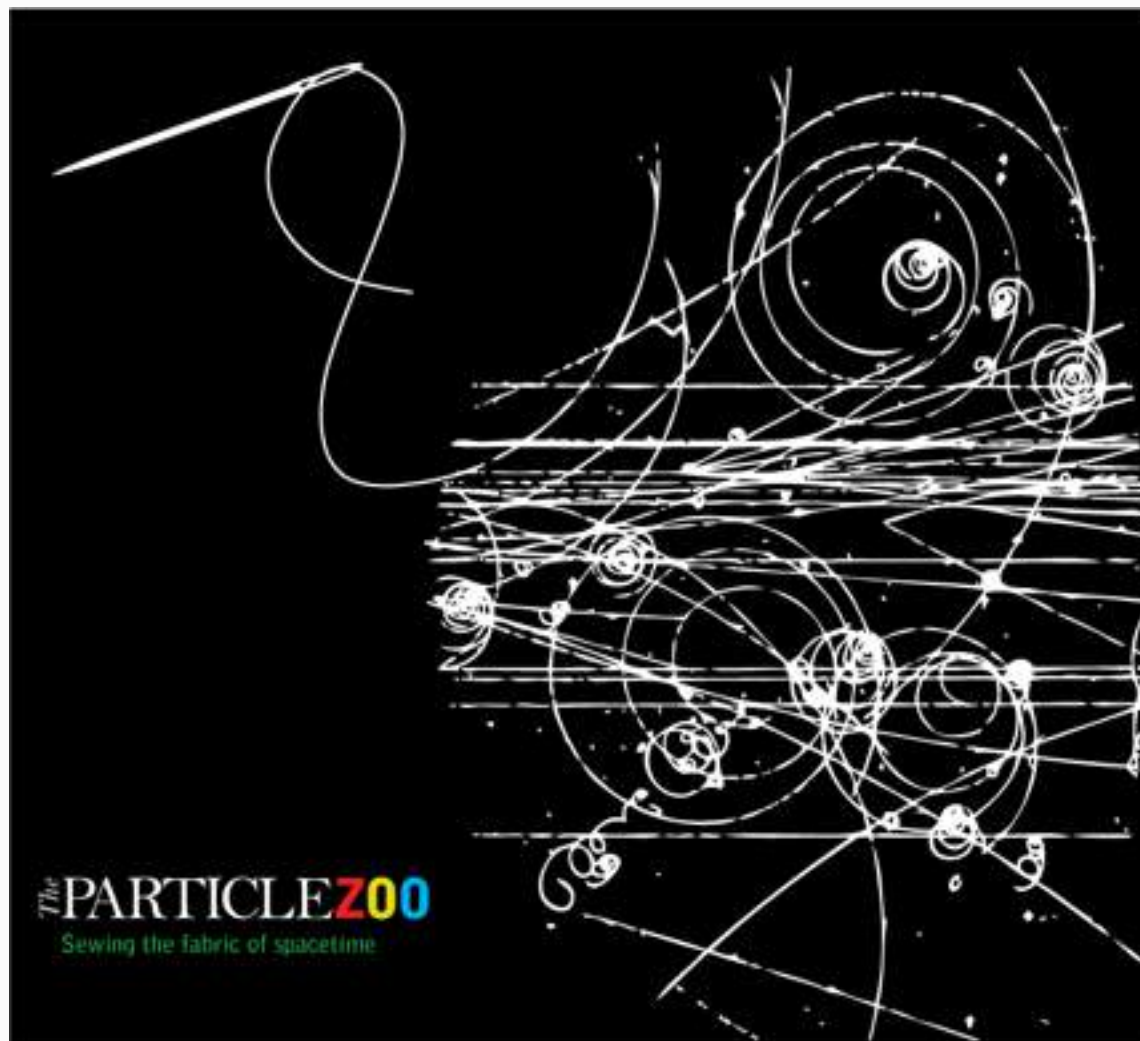
Murray Gell-Mann

Plan

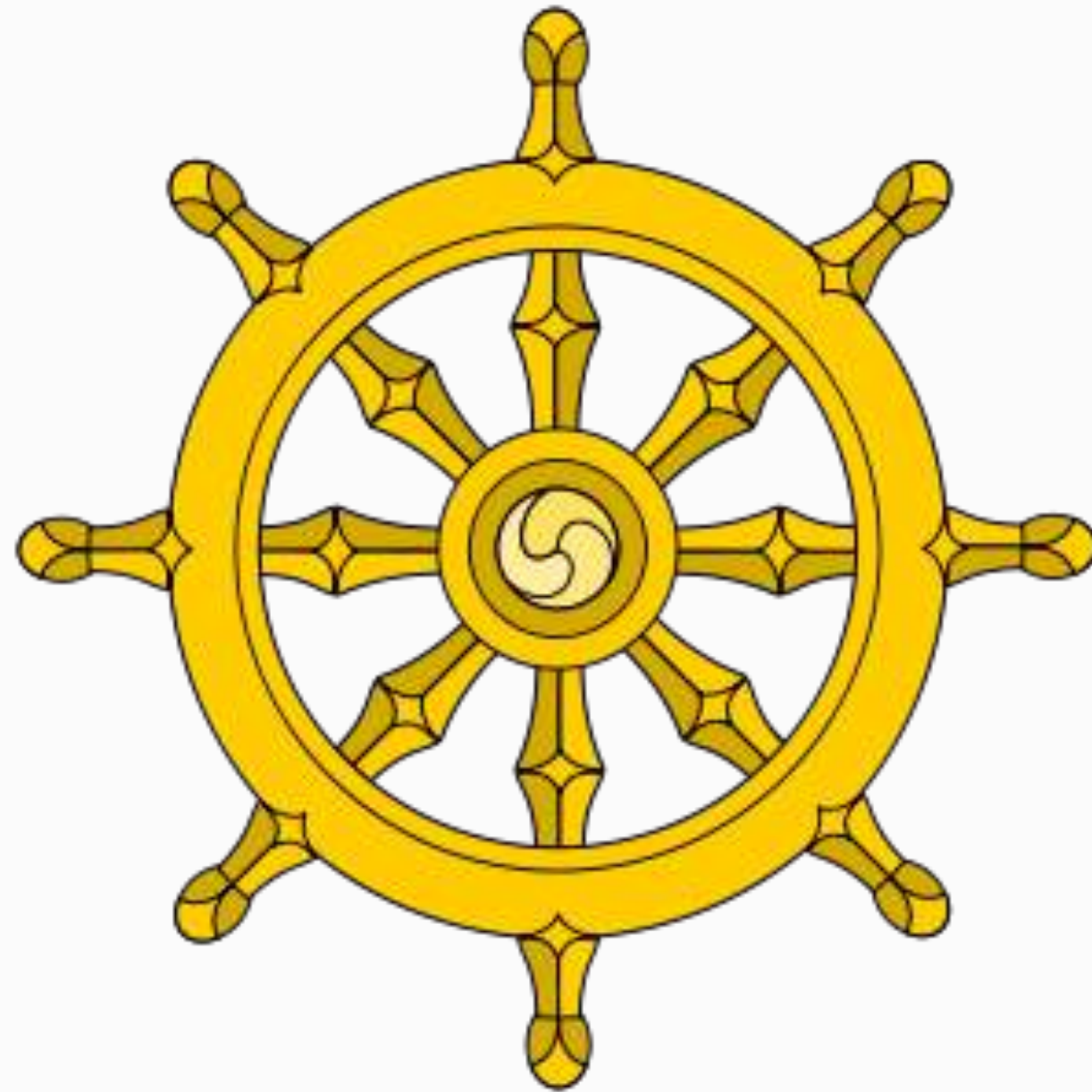
- Introducción: escalas de espacio y de energía en Física Fundamental.
- Física Cuántica y Relatividad Especial.
 - Las preguntas revolucionarias.
 - Dirac y la Mecánica Cuántica Relativista.
 - Las interacciones nucleares débil y fuerte: neutrinos y mesones.
- Interludio: diagramas de Feynman.
- Teoría Cuántica de Campos.
 - Efectos cuánticos y fuerzas fundamentales.
 - Infinitos y Guerras.
 - La Edad de Plata: Electrodinámica Cuántica y leyes fundamentales.
- Simetrías: la Edad de Oro.
 - El Camino Óctuple: Quarks.
 - La interacción electrodébil: corrientes neutras.
 - Más infinitos.
 - El Modelo Estándar de la Física de Partículas.

La interacción fuerte: el zoo de partículas

Los experimentos de física de altas energías de los años 50 descubrieron docenas de nuevas partículas que interactuaban fuertemente (*mesones* y *bariones*). El modelo de Yukawa no bastaba para describirlas adecuadamente.



La interacción fuerte: el Camino Óctuple



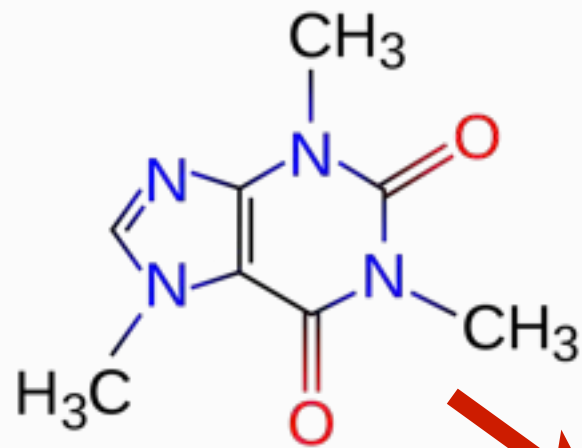
inicio de la edad de oro de la física teórica de partículas

La interacción fuerte: el Camino Óctuple

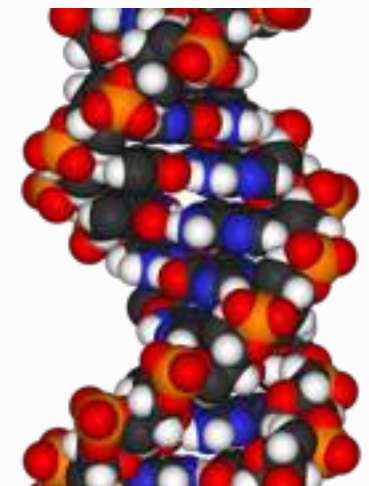
$n^{2s+1}\ell_J$	J^{PC}	$l = 1$ $u\bar{d}, \bar{u}d, \frac{1}{\sqrt{2}}(d\bar{d} - u\bar{u})$	$l = \frac{1}{2}$ $u\bar{s}, d\bar{s}; \bar{d}s, -\bar{u}s$	$l = 0$ f'	$l = 0$ f
1^1S_0	0^{-+}	π	K	η	$\eta'(958)$
1^3S_1	1^{--}	$\rho(770)$	$K^*(892)$	$\phi(1020)$	$\omega(782)$
1^1P_1	1^{+-}	$b_1(1235)$	$K_{1B}^\dagger$	$h_1(1380)$	$h_1(1170)$
1^3P_0	0^{++}	$a_0(1450)$	$K_0^*(1430)$	$f_0(1710)$	$f_0(1370)$
1^3P_1	1^{++}	$a_1(1260)$	$K_{1A}^\dagger$	$f_1(1420)$	$f_1(1285)$
1^3P_2	2^{++}	$a_2(1320)$	$K_2^*(1430)$	$f_2'(1525)$	$f_2(1270)$
1^1D_2	2^{-+}	$\pi_2(1670)$	$K_2(1770)^\dagger$	$\eta_2(1870)$	$\eta_2(1645)$
1^3D_1	1^{--}	$\rho(1700)$	$K^*(1680)$		$\omega(1650)$
1^3D_2	2^{--}		$K_2(1820)$		
1^3D_3	3^{--}	$\rho_3(1690)$	$K_3^*(1780)$	$\phi_3(1850)$	$\omega_3(1670)$
1^3F_4	4^{++}	$a_4(2040)$	$K_4^*(2045)$		$f_4(2050)$
1^3G_5	5^{--}	$\rho_5(2350)$			
1^3H_6	6^{++}	$a_6(2450)$			$f_6(2510)$
2^1S_0	0^{-+}	$\pi(1300)$	$K(1460)$	$\eta(1475)$	$\eta(1295)$
2^3S_1	1^{--}	$\rho(1450)$	$K^*(1410)$	$\phi(1680)$	$\omega(1420)$

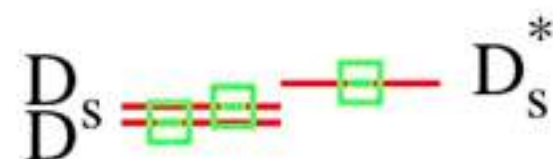
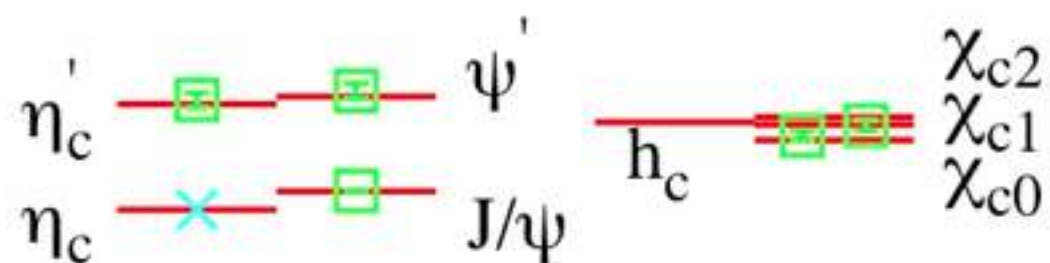
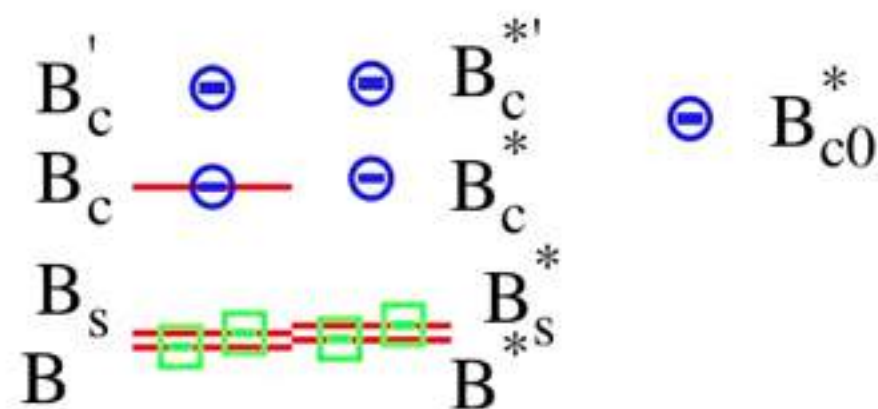
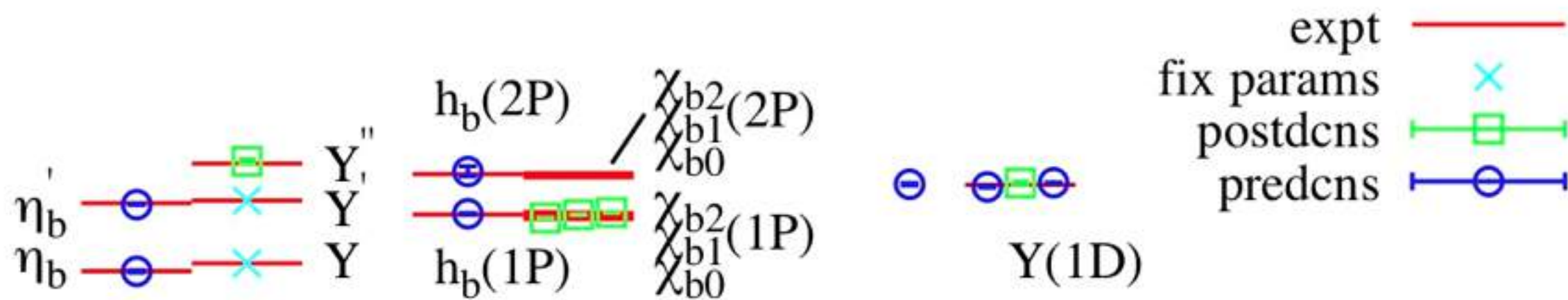
$n^{2s+1}\ell_J$	J^{PC}	$l = 0$ $c\bar{c}$	$l = 0$ $b\bar{b}$	$l = \frac{1}{2}$ $c\bar{u}, c\bar{d}; \bar{c}u, \bar{c}d$	$l = 0$ $c\bar{s}; \bar{c}s$	$l = \frac{1}{2}$ $b\bar{u}, b\bar{d}; \bar{b}u, \bar{b}d$	$l = 0$ $b\bar{s}; \bar{b}s$	$l = 0$ $b\bar{c}; \bar{b}c$
1^1S_0	0^{-+}	$\eta_c(1S)$	$\eta_b(1S)$	D	$D_s^\pm$	B	B_s^0	$B_c^\pm$
1^3S_1	1^{--}	$J/\psi(1S)$	$\Upsilon(1S)$	D^*	$D_s^{*\pm}$	B^*	B_s^*	
1^1P_1	1^{+-}	$h_c(1P)$		$D_1(2420)$	$D_{s1}(2536)^\pm$	$B_1(5721)$	$B_{s1}(5830)^0$	
1^3P_0	0^{++}	$\chi_{c0}(1P)$	$\chi_{b0}(1P)$	$D_0^*(2400)$	$D_{s0}^*(2317)^{\pm\dagger}$			
1^3P_1	1^{++}	$\chi_{c1}(1P)$	$\chi_{b1}(1P)$	$D_1(2430)$	$D_{s1}(2460)^{\pm\dagger}$			
1^3P_2	2^{++}	$\chi_{c2}(1P)$	$\chi_{b2}(1P)$	$D_2^*(2460)$	$D_{s2}^*(2573)^\pm$	$B_2^*(5747)$	$B_{s2}^*(5840)^0$	
1^3D_1	1^{--}	$\psi(3770)$			$D_{s1}^*(2700)^\pm$			
2^1S_0	0^{-+}	$\eta_c(2S)$						
2^3S_1	1^{--}	$\psi(2S)$	$\Upsilon(2S)$					
$2^3P_{0,1,2}$	$0^{++}, 1^{++}, 2^{++}$		$\chi_{b0,1,2}(2P)$					

La interacción fuerte: el Camino Óctuple



		Group																									
		I		II												III	IV	V	VI	VII	VIII						
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	*	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	**	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							
		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																											

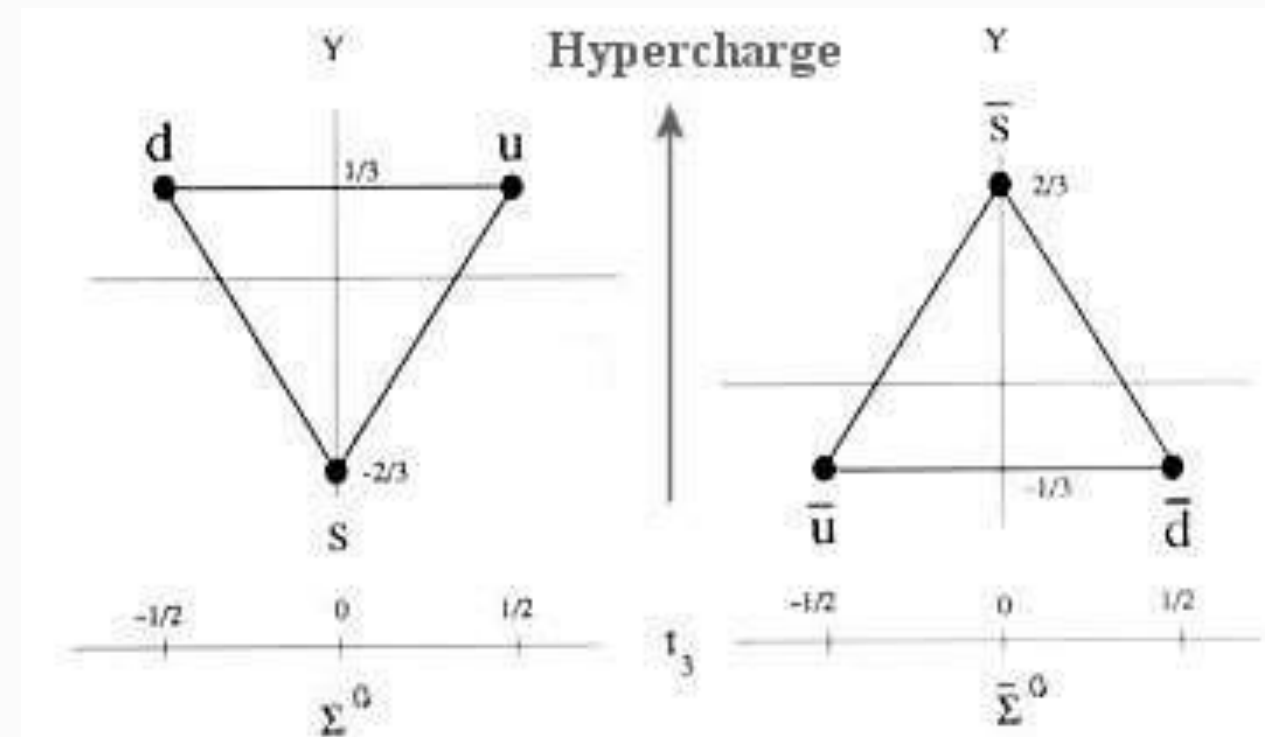
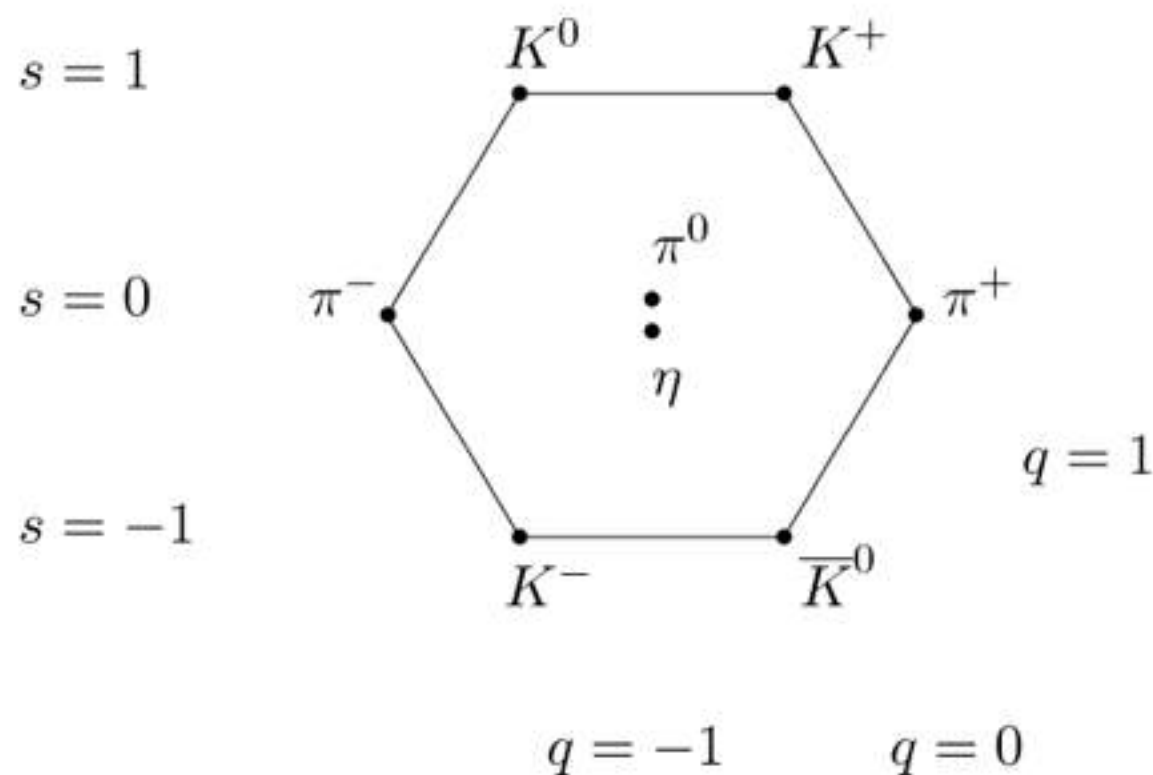




La interacción fuerte: el Camino Óctuple

Es posible explicar el espectro de mesones y bariones asumiendo que están constituidos por sólo tres tipos de partículas más elementales: los **quarks**.

Gell-Mann, Ne'eman 1961



$$I_3 = \frac{1}{2} [(n_u - n_{\bar{u}}) - (n_d - n_{\bar{d}})]$$

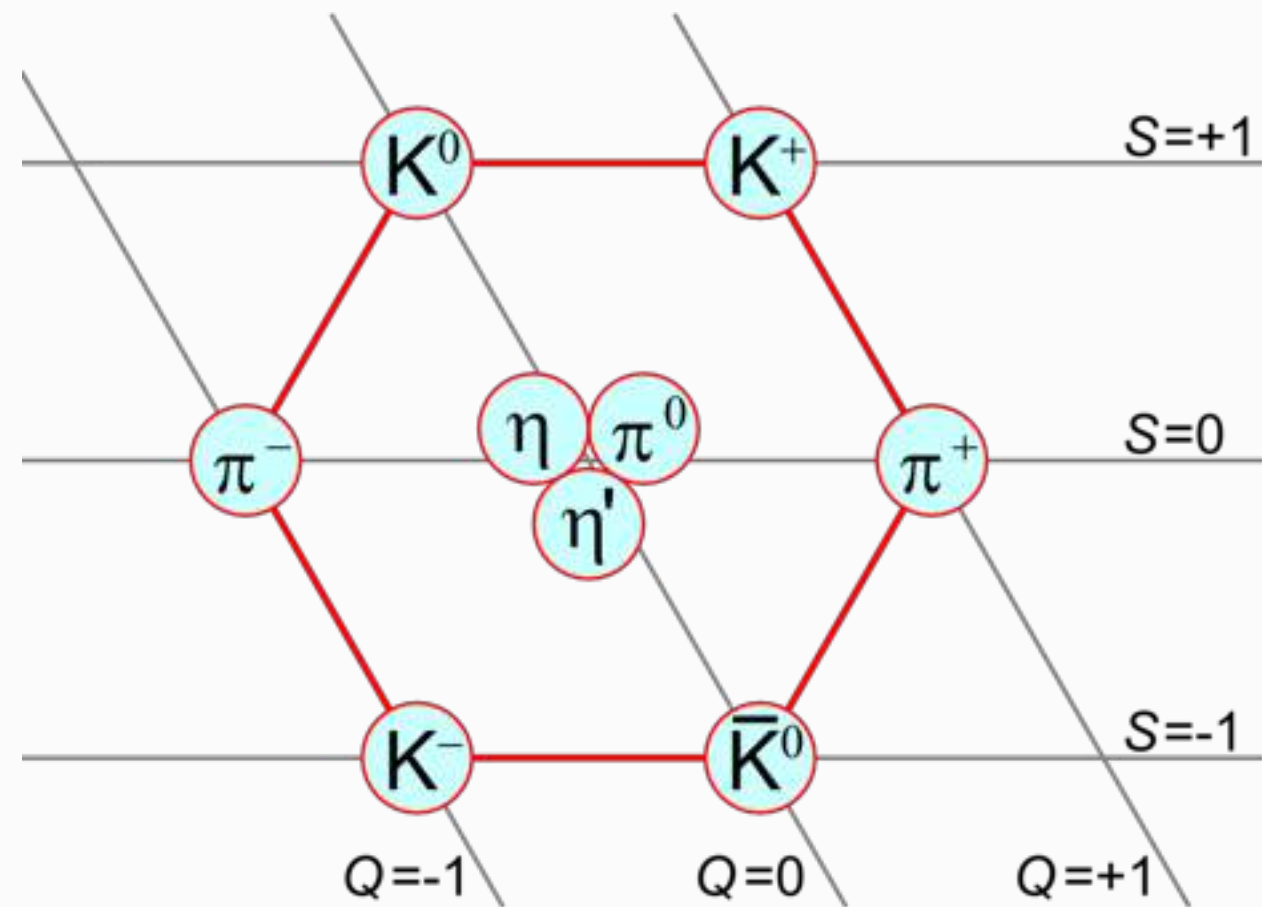
Simetría SU(3) (“de sabor”)

$I = 1$ $u\bar{d}, \bar{u}d, \frac{1}{\sqrt{2}}(d\bar{d} - u\bar{u})$	$I = \frac{1}{2}$ $u\bar{s}, d\bar{s}; \bar{d}s, -\bar{u}s$
--	--

$$\mathbf{3} \otimes \bar{\mathbf{3}} = \mathbf{8} \oplus \mathbf{1}$$

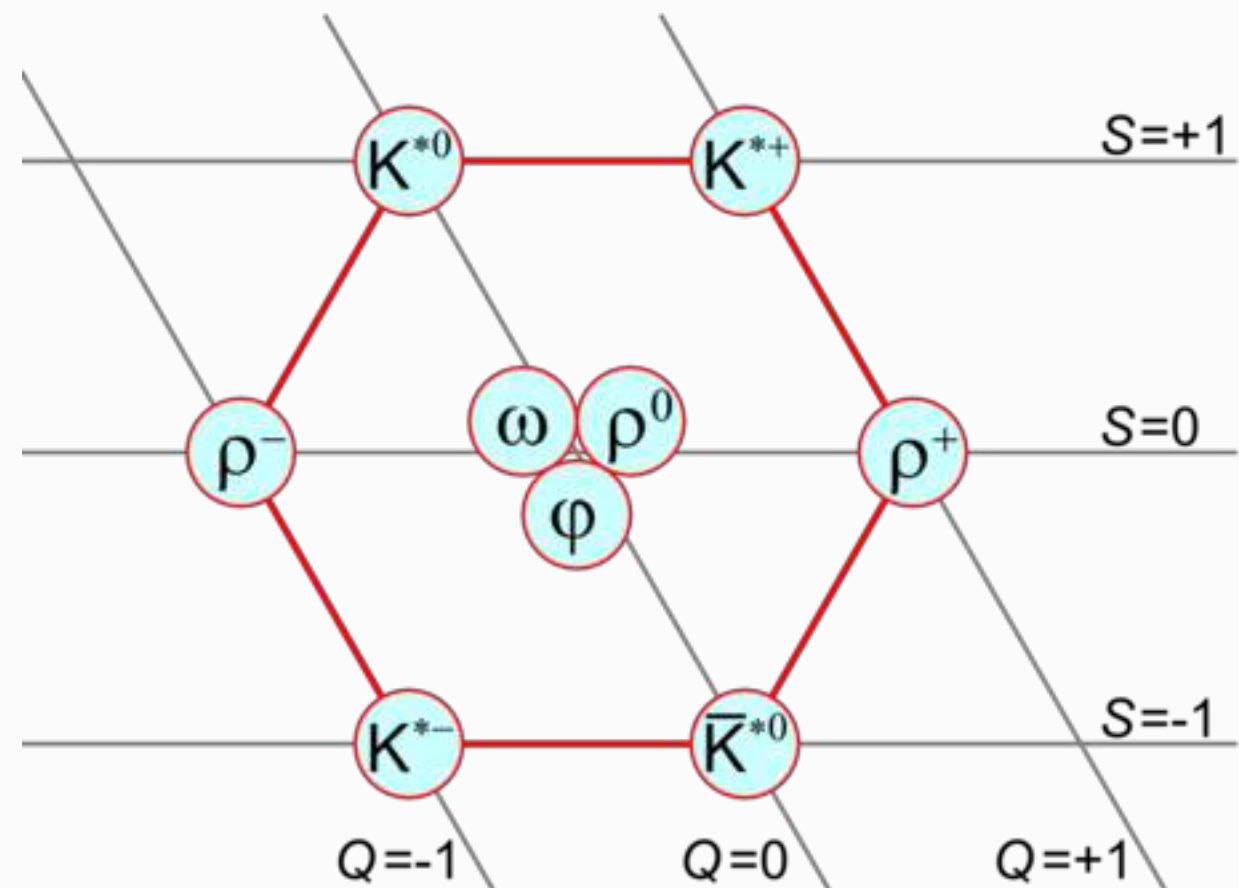
Mesones pseudoescalares

spin=0

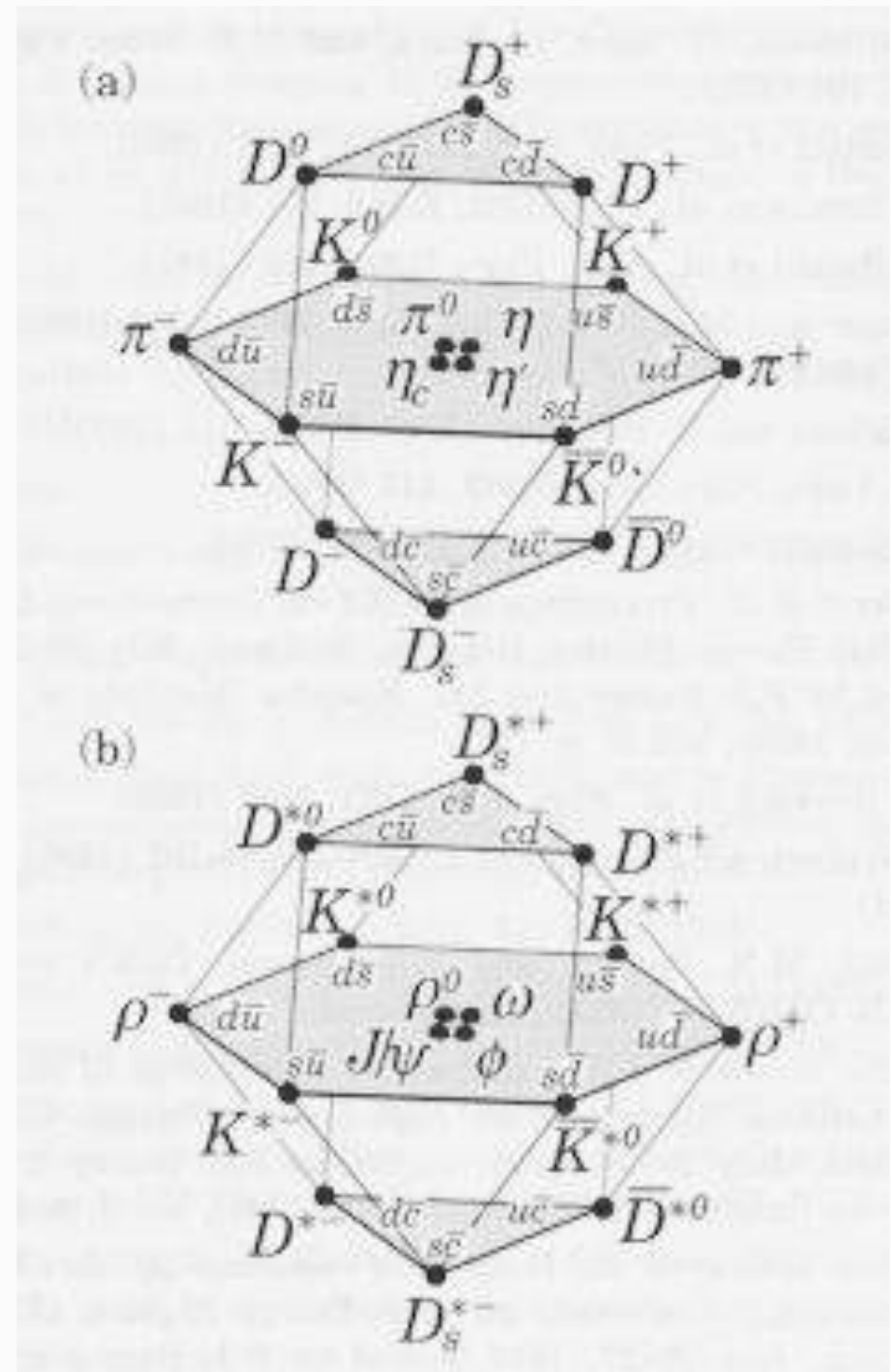


Mesones vectoriales

spin=1



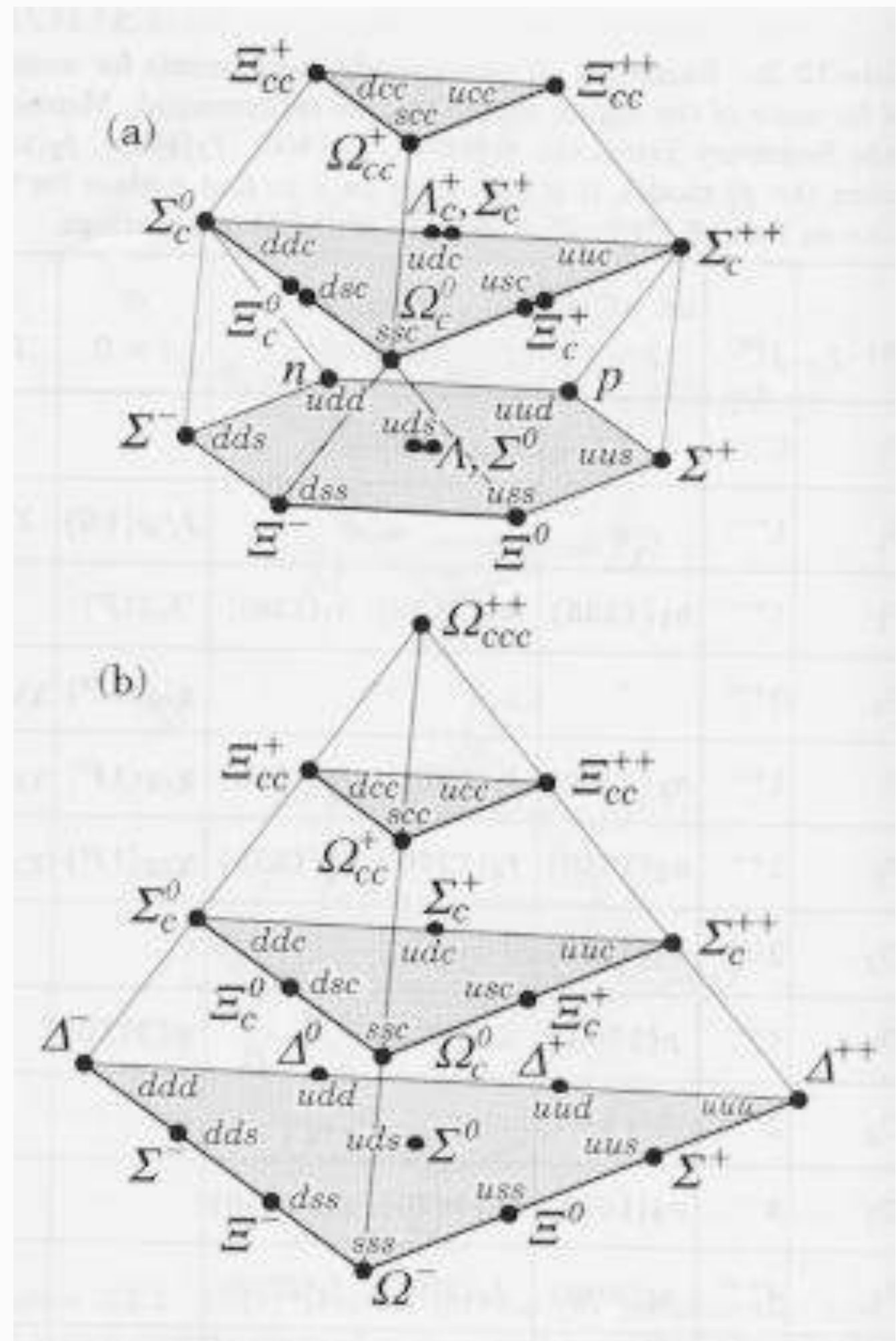
$$\mathbf{3} \otimes \bar{\mathbf{3}} = \mathbf{8} \oplus \mathbf{1}$$



BARIONES

Son combinaciones de tres quarks y por lo tanto las posibilidades son mayores

$$3 \otimes 3 \otimes 3 = 10_S \oplus 8_M \oplus 8_M \oplus 1_A$$



BARIONES

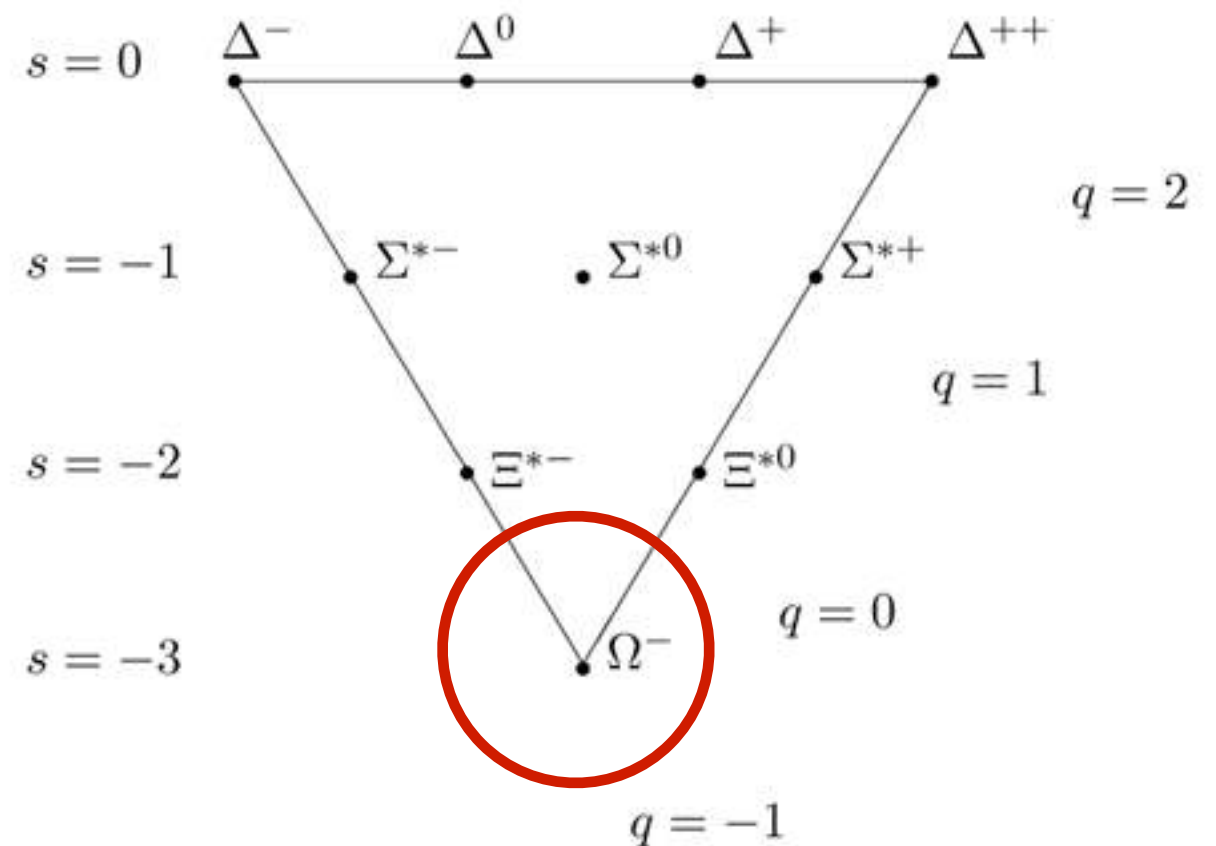
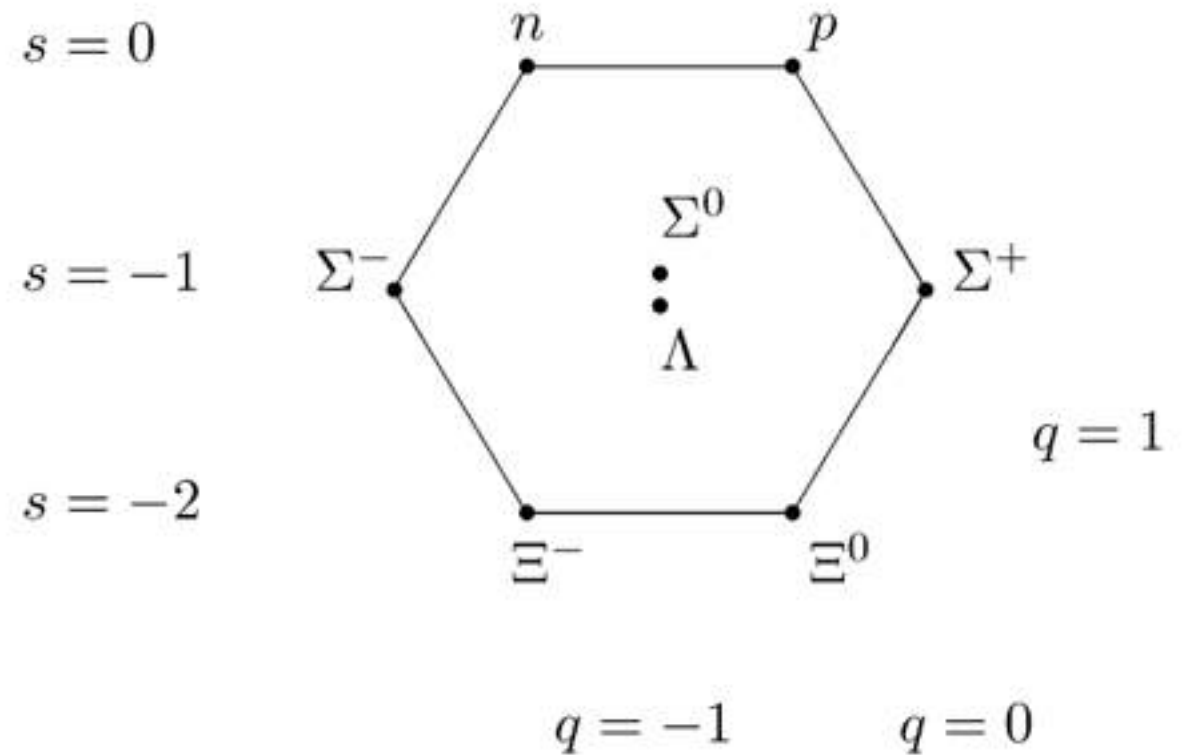
Son combinaciones de tres quarks y por lo tanto las posibilidades son mayores

$$\mathbf{3} \otimes \mathbf{3} \otimes \mathbf{3} = \mathbf{10}_S \oplus \mathbf{8}_M \oplus \mathbf{8}_M \oplus \mathbf{1}_A$$

Algunos de estos bariones fueron predichos teóricamente antes de ser encontrados experimentalmente!

Principio de exclusión de Pauli: tres fermiones idénticos no pueden estar en el mismo estado.

Es necesario postular un “equivalente fuerte” de la carga eléctrica: la **carga de color**.



BARIONES

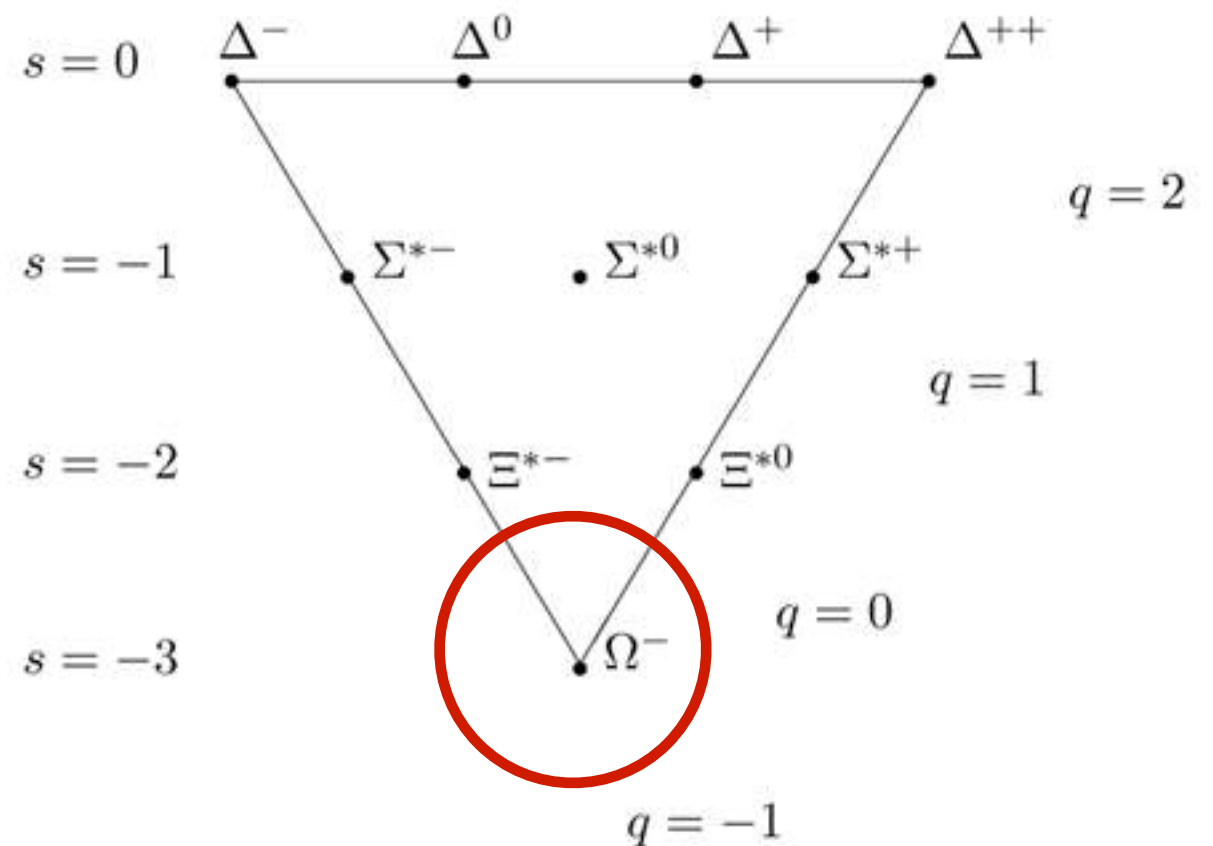
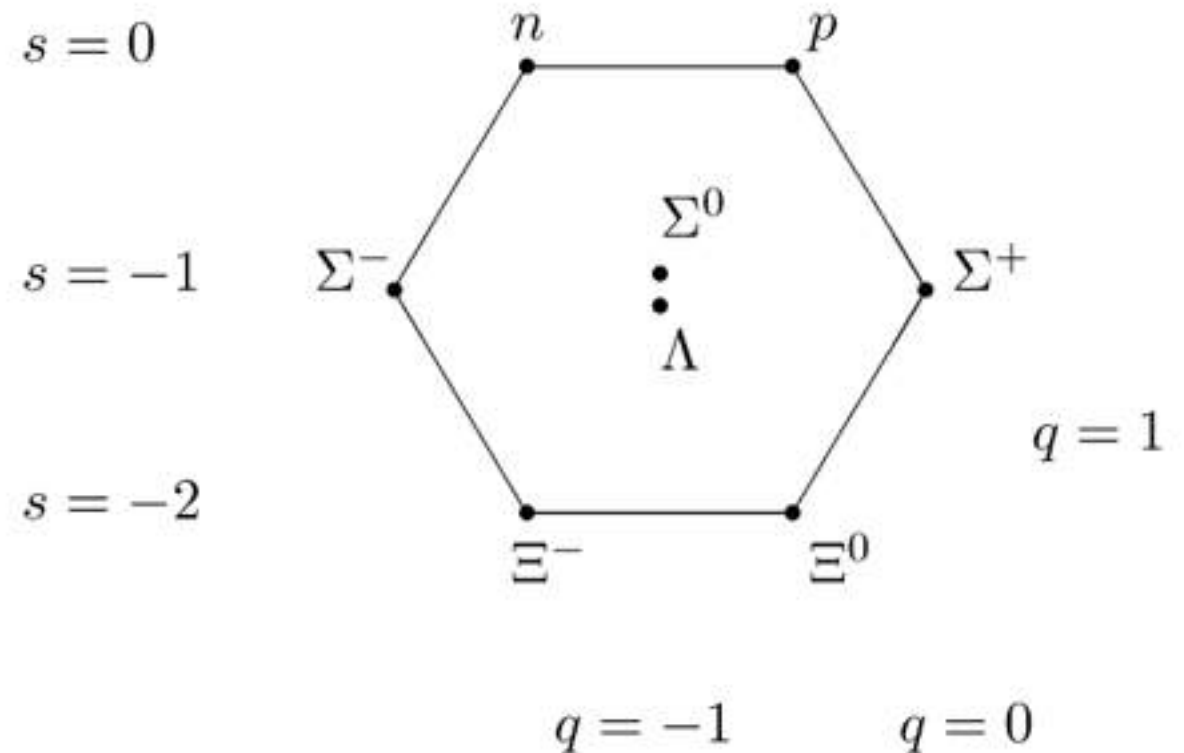
Son combinaciones de tres quarks y por lo tanto las posibilidades son mayores

$$\mathbf{3} \otimes \mathbf{3} \otimes \mathbf{3} = \mathbf{10}_S \oplus \mathbf{8}_M \oplus \mathbf{8}_M \oplus \mathbf{1}_A$$

Algunos de estos bariones fueron predichos teóricamente antes de ser encontrados experimentalmente!

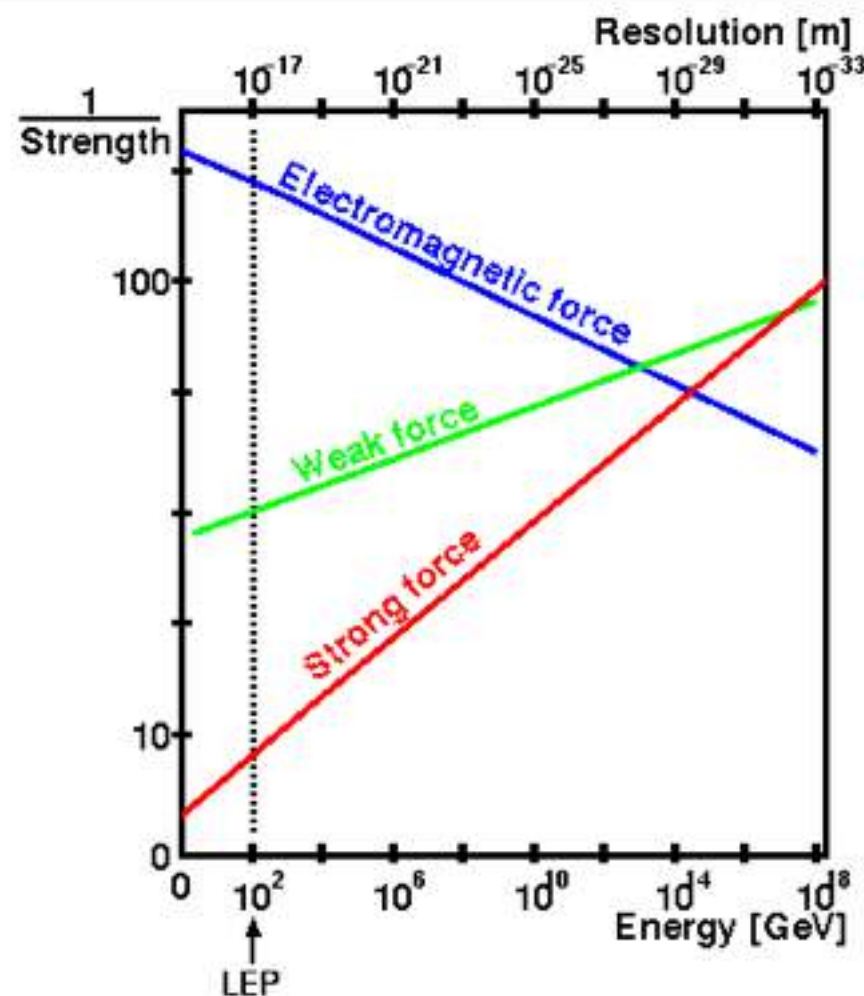
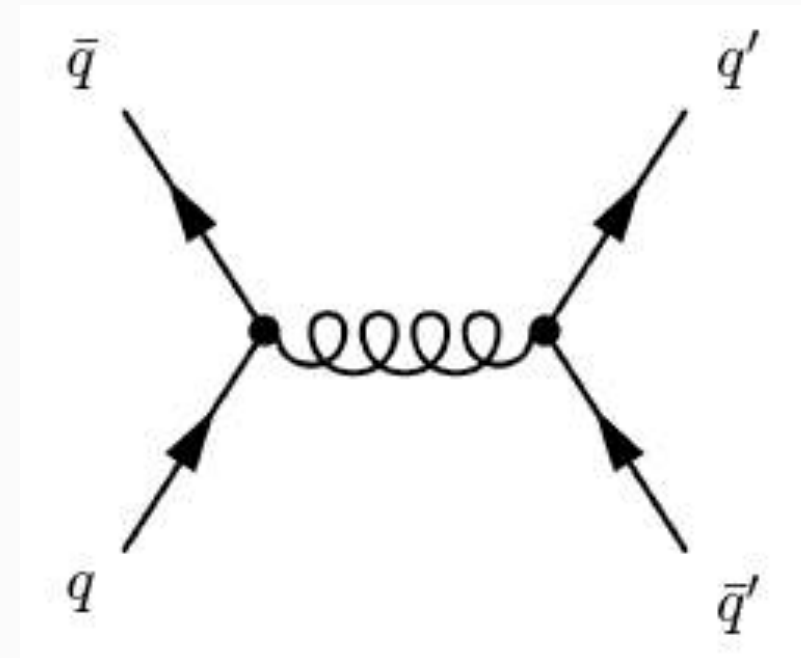
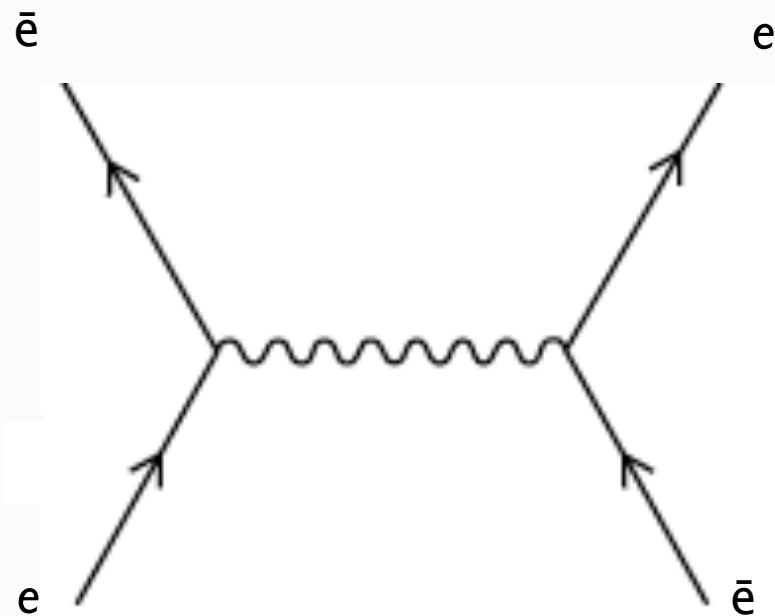
Principio de exclusión de Pauli: tres fermiones idénticos no pueden estar en el mismo estado.

Es necesario postular un “equivalente fuerte” de la carga eléctrica: la **carga de color**.



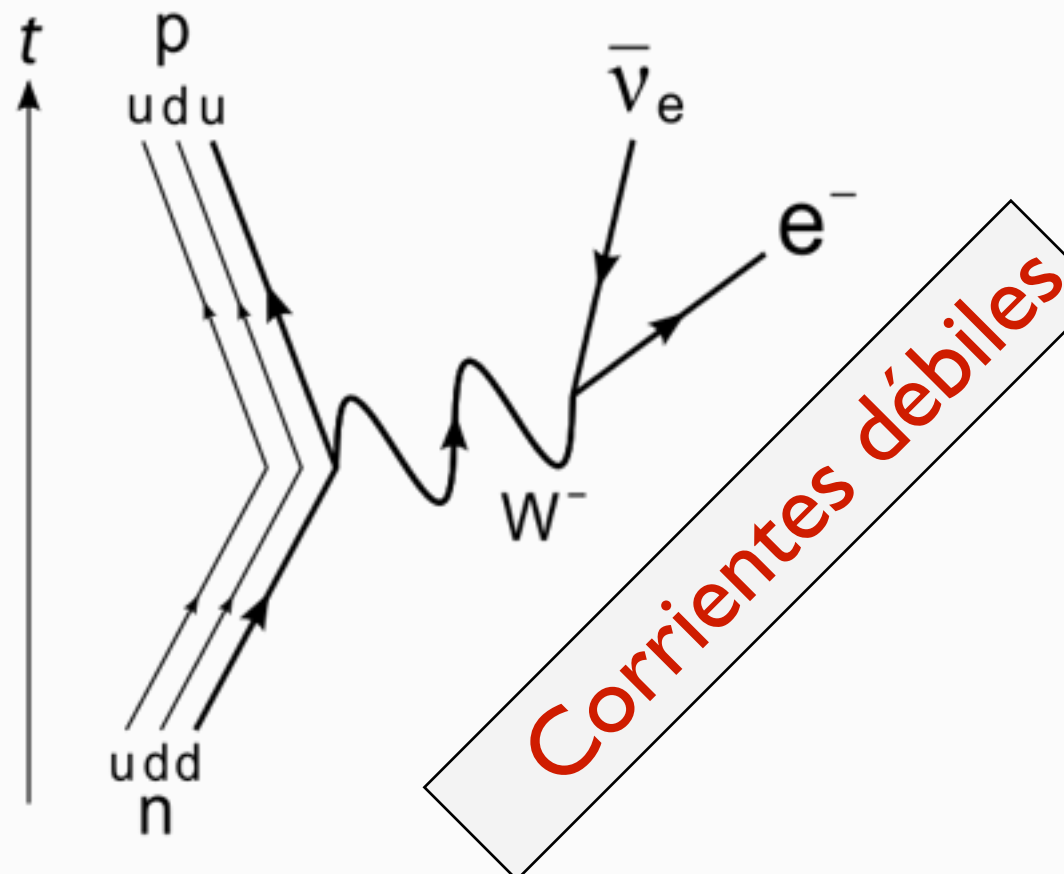
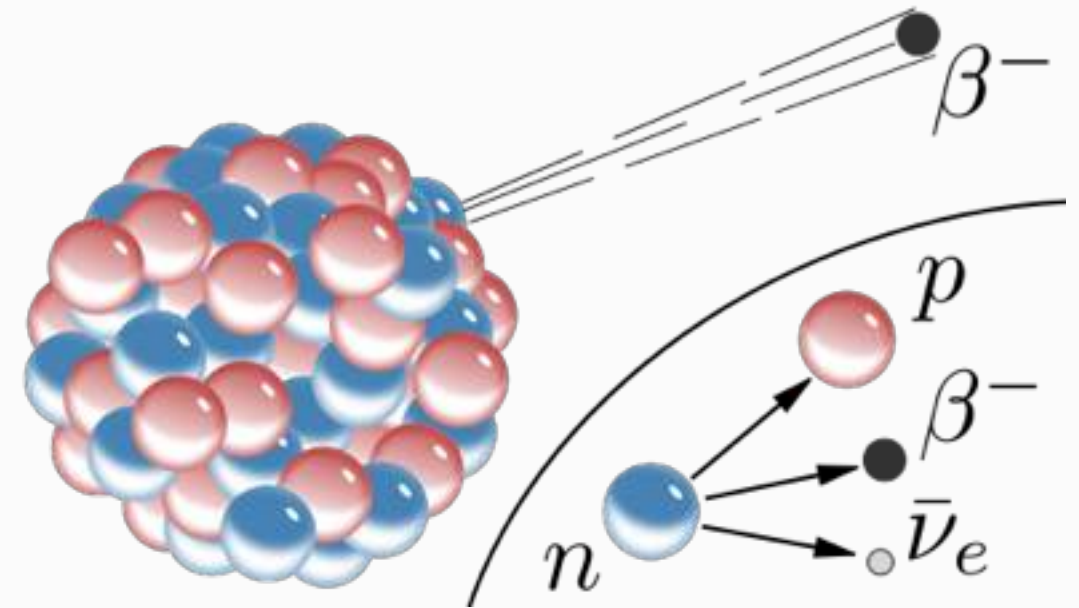
Simetría SU(3) (“de color”)

La interacción fuerte: el Camino Óctuple



La interacción débil

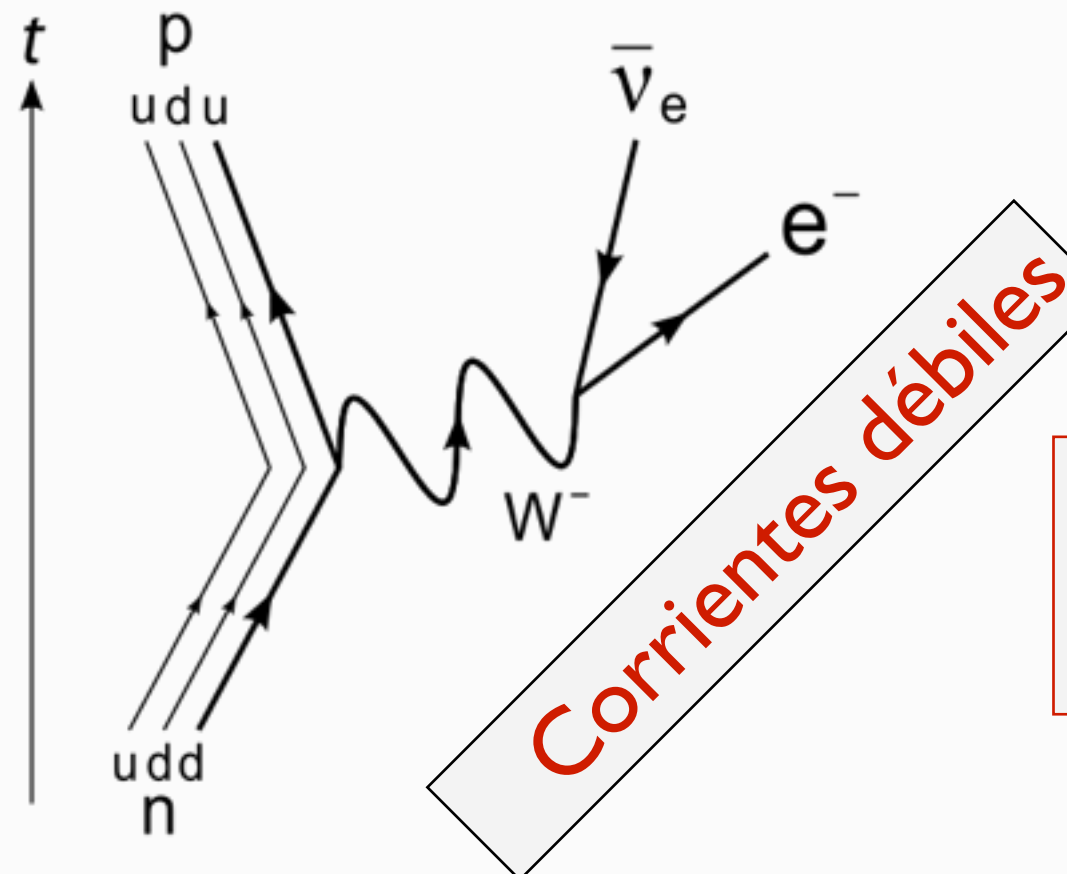
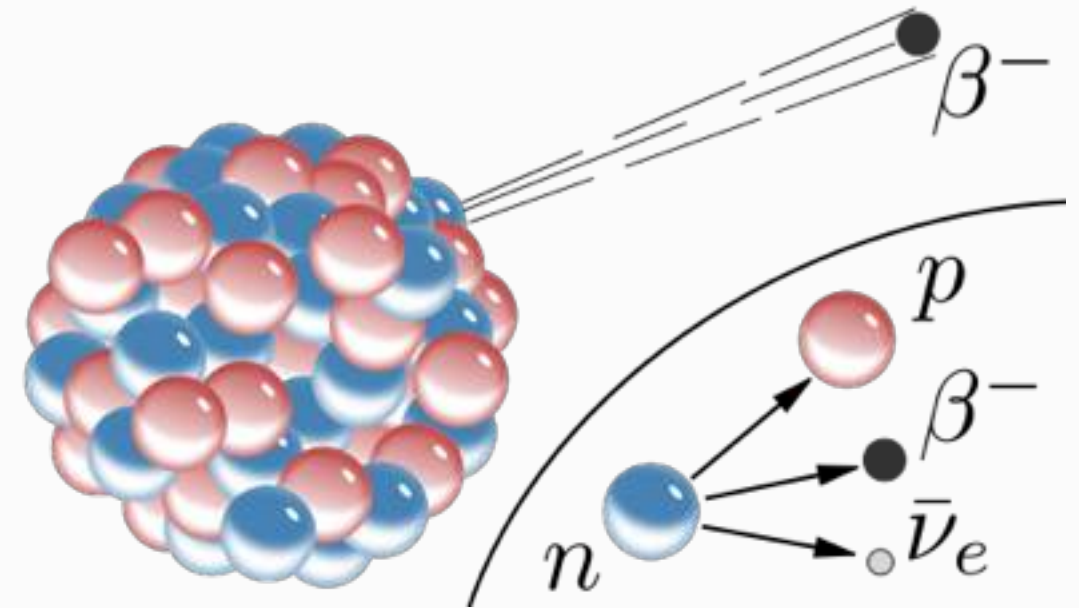
El modelo de Fermi para la interacción débil se vuelve inconsistente para energías del orden de 100 GeV.



Solución: postular la existencia de una interacción fundamental mediada por partículas similares al fotón pero masivas.

La interacción débil

El modelo de Fermi para la interacción débil se vuelve inconsistente para energías del orden de 100 GeV.



Solución: postular la existencia de una interacción fundamental mediada por partículas similares al fotón pero masivas.

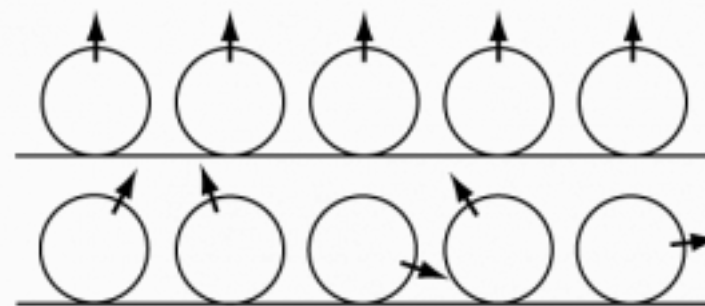
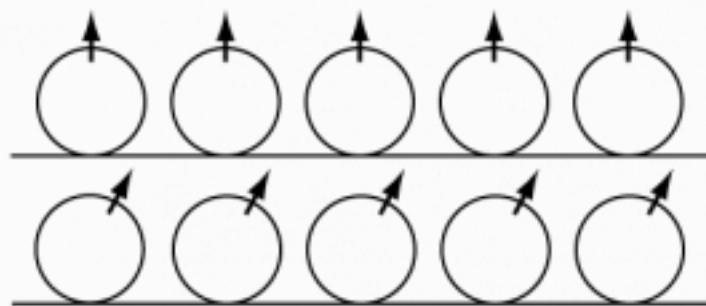
BONUS: es posible unificar una interacción de este tipo con la electromagnética (**fuerza electrodébil**).

Glashow 1960

Infinitos nucleares

Pero en los años 60 estos modelos tienen dos problemas:

- ➔ No se sabe formular una TCC consistente para las simetrías implicadas: $SU(3)$ de color para los quarks, $SU(2) \times U(1)$ para la interacción electrodébil (*teorías gauge no abelianas*).
- ➔ Aún cuando fuera posible formular una teoría electrodébil, no se sabe cómo dar masa a las partículas implicadas en interacciones débiles sin violar simetrías fundamentales.



Simetría gauge: los grados de libertad “internos” (cargas) pueden ser rotados de manera distinta en cada punto del espaciotiempo.

Infinitos nucleares

Pero en los años 60 estos modelos tienen dos problemas:

- ➔ No se sabe formular una TCC consistente para las simetrías implicadas: $SU(3)$ de color para los quarks, $SU(2) \times U(1)$ para la interacción electrodébil (*teorías gauge no abelianas*).
- ➔ Aún cuando fuera posible formular una teoría electrodébil, no se sabe cómo dar masa a las partículas implicadas en interacciones débiles sin violar simetrías fundamentales.



't Hooft, Veltman 1971

Demostración de la renormalizabilidad de teorías gauge no abelianas.

Infinitos nucleares

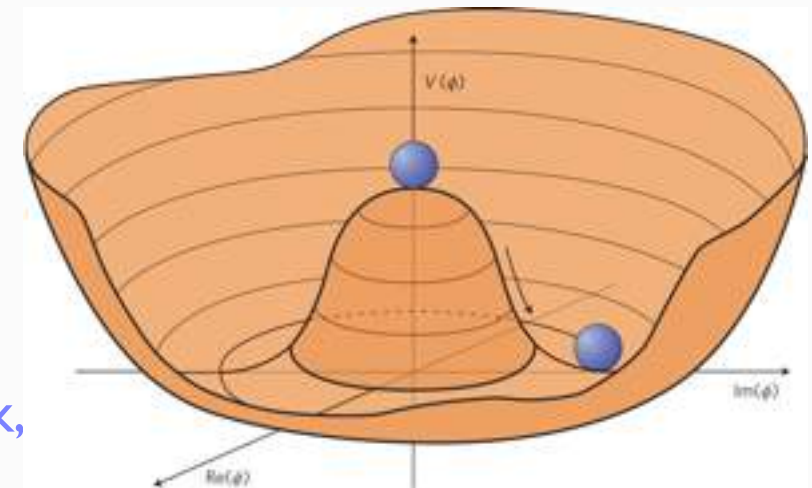
Pero en los años 60 estos modelos tienen dos problemas:

- ➔ No se sabe formular una TCC consistente para las simetrías implicadas: $SU(3)$ de color para los quarks, $SU(2) \times U(1)$ para la interacción electrodébil (*teorías gauge no abelianas*).
- ➔ Aún cuando fuera posible formular una teoría electrodébil, no se sabe cómo dar masa a las partículas implicadas en interacciones débiles sin violar simetrías fundamentales.



Generación de masa a través de la rotura espontánea de la simetría electrodébil.

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



Infinitos nucleares

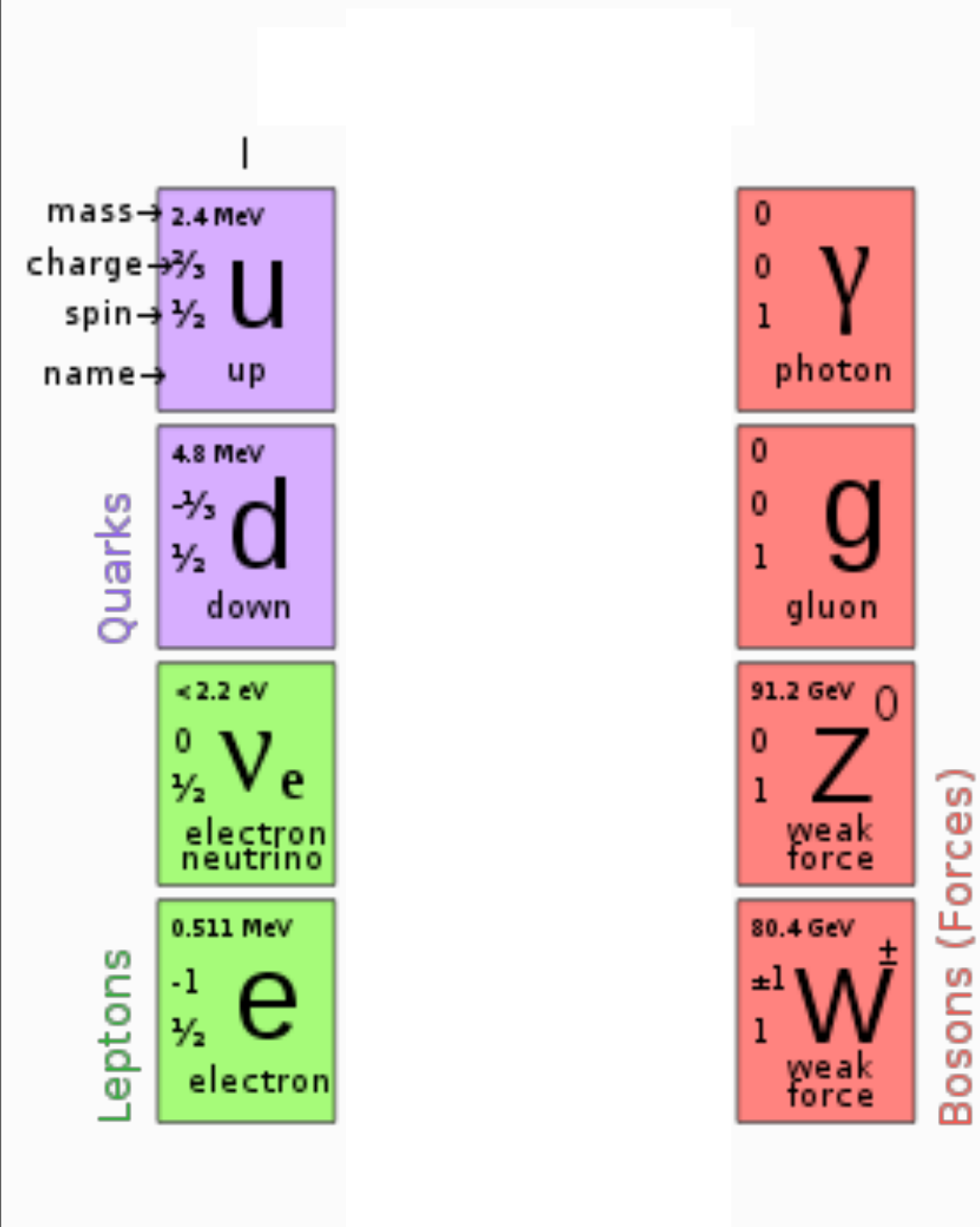
Pero en los años 60 estos modelos tienen dos problemas:

- ➔ No se sabe formular una TCC consistente para las simetrías implicadas: $SU(3)$ de color para los quarks, $SU(2) \times U(1)$ para la interacción electrodébil (*teorías gauge no abelianas*).
- ➔ Aún cuando fuera posible formular una teoría electrodébil, no se sabe cómo dar masa a las partículas implicadas en interacciones débiles sin violar simetrías fundamentales.



Bosón de Higgs: partícula asociada a la generación de masa para campos de materia fundamentales.

El Modelo Estándar de la Física de Partículas



El Modelo Estándar de la Física de Partículas

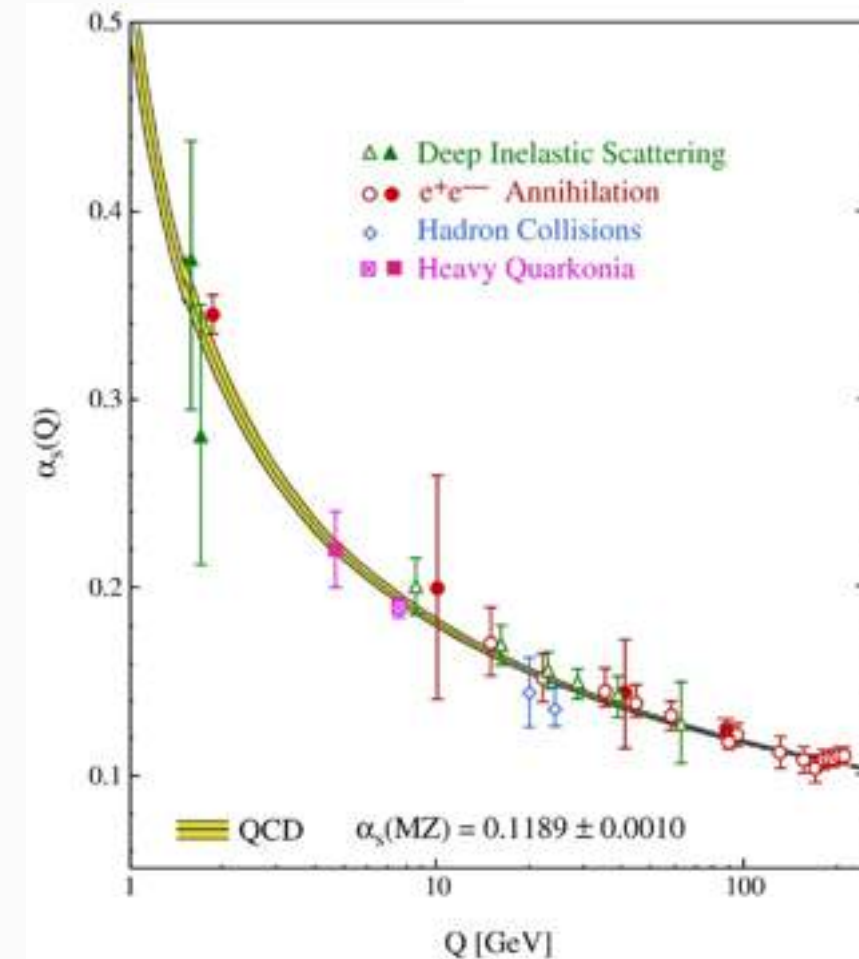
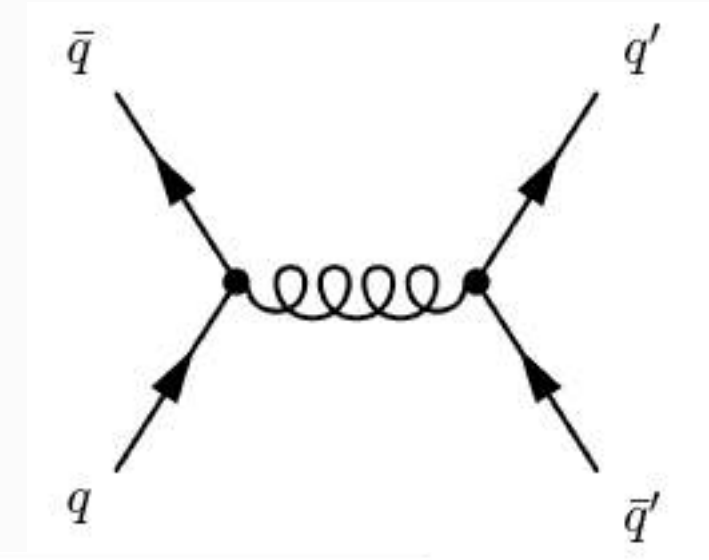
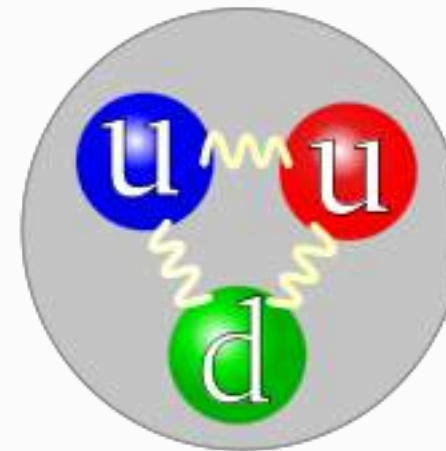
Three Generations
of Matter (Fermions)

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

El Modelo Estándar de la Física de Partículas

Interacción fuerte: Cromodinámica Cuántica (QCD)

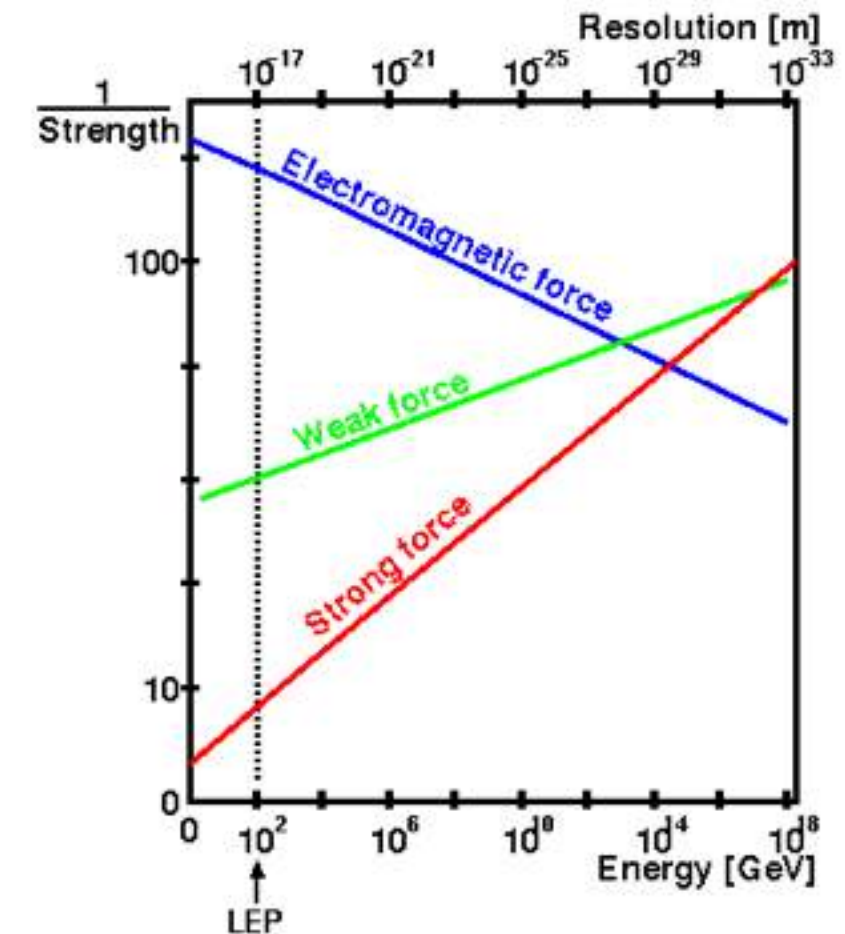
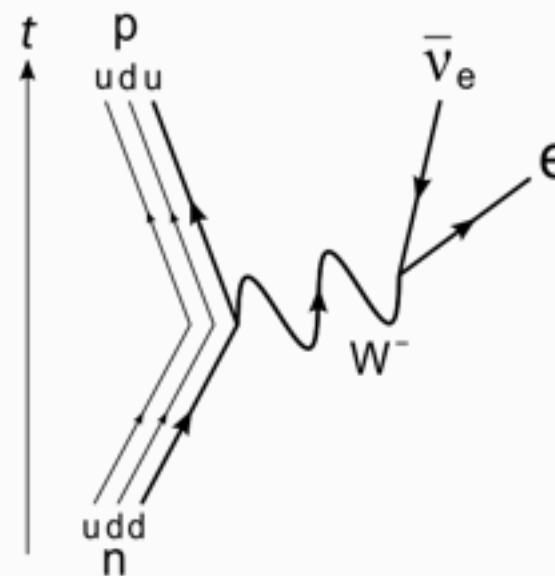
Three Generations of Matter (Fermions)				
	I	II	III	
mass →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name →	u up	c charm	t top	γ photon
Quarks	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ d down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ s strange	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ b bottom	0 0 1 g gluon
	< 2.2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e electron neutrino	< 0.17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ muon neutrino	< 15.5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutrino	91.2 GeV 0 1 Z weak force
	0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e electron	105.7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ muon	1.777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ tau	80.4 GeV ±1 1 W[±] weak force
Leptons				Bosons (Forces)



El Modelo Estándar de la Física de Partículas

Interacción electrodébil: Modelo de Glashow-Weinberg-Salam

Three Generations of Matter (Fermions)				
	I	II	III	
mass → 2.4 MeV		1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge → $\frac{2}{3}$	u	c	t	γ
spin → $\frac{1}{2}$	up	charm	top	photon
name →				
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
	d	s	b	g
	down	strange	bottom	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
	ν_e	ν_μ	ν_τ	Z
	electron neutrino	muon neutrino	tau neutrino	weak force
Bosons (Forces)	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	±1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e	μ	τ	W[±]
	electron	muon	tau	weak force



El Modelo Estándar de la Física de Partículas

Interacción electrodébil: Modelo de Glashow-Weinberg-Salam

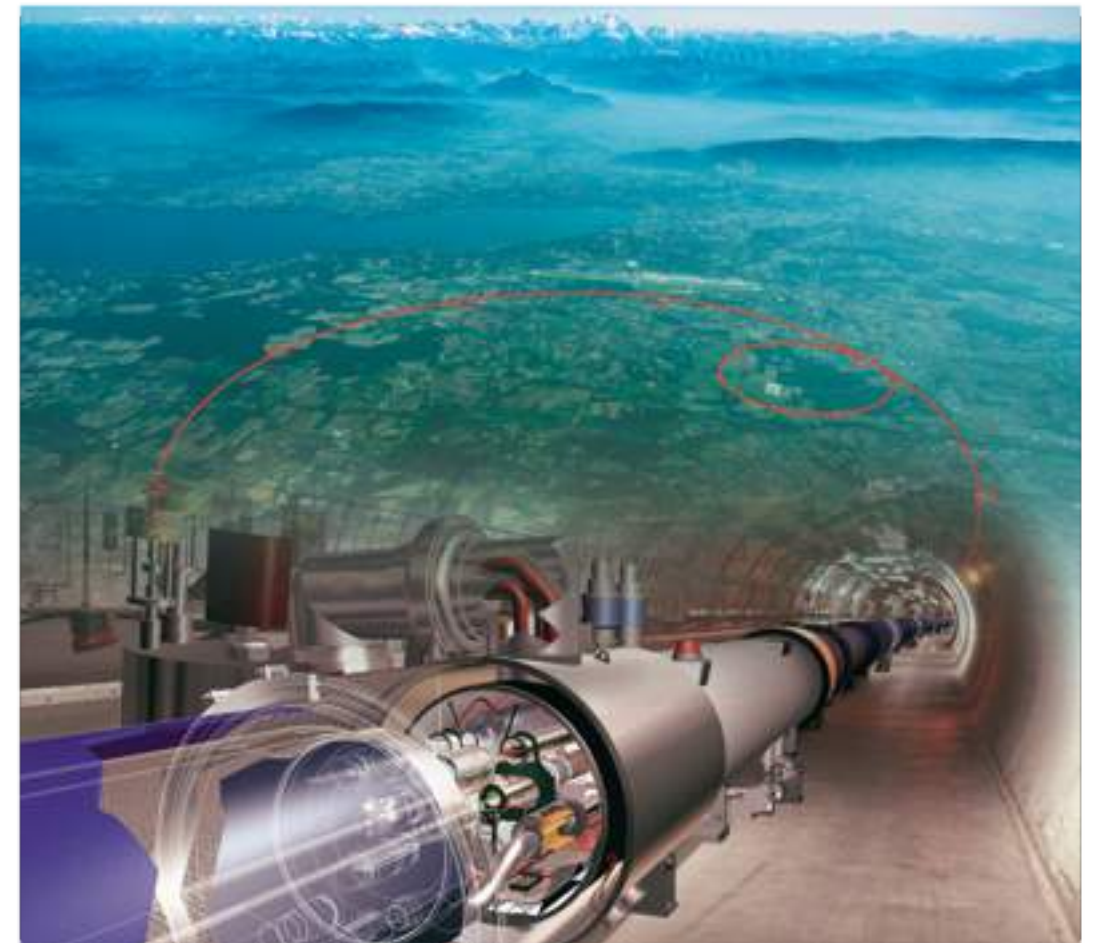
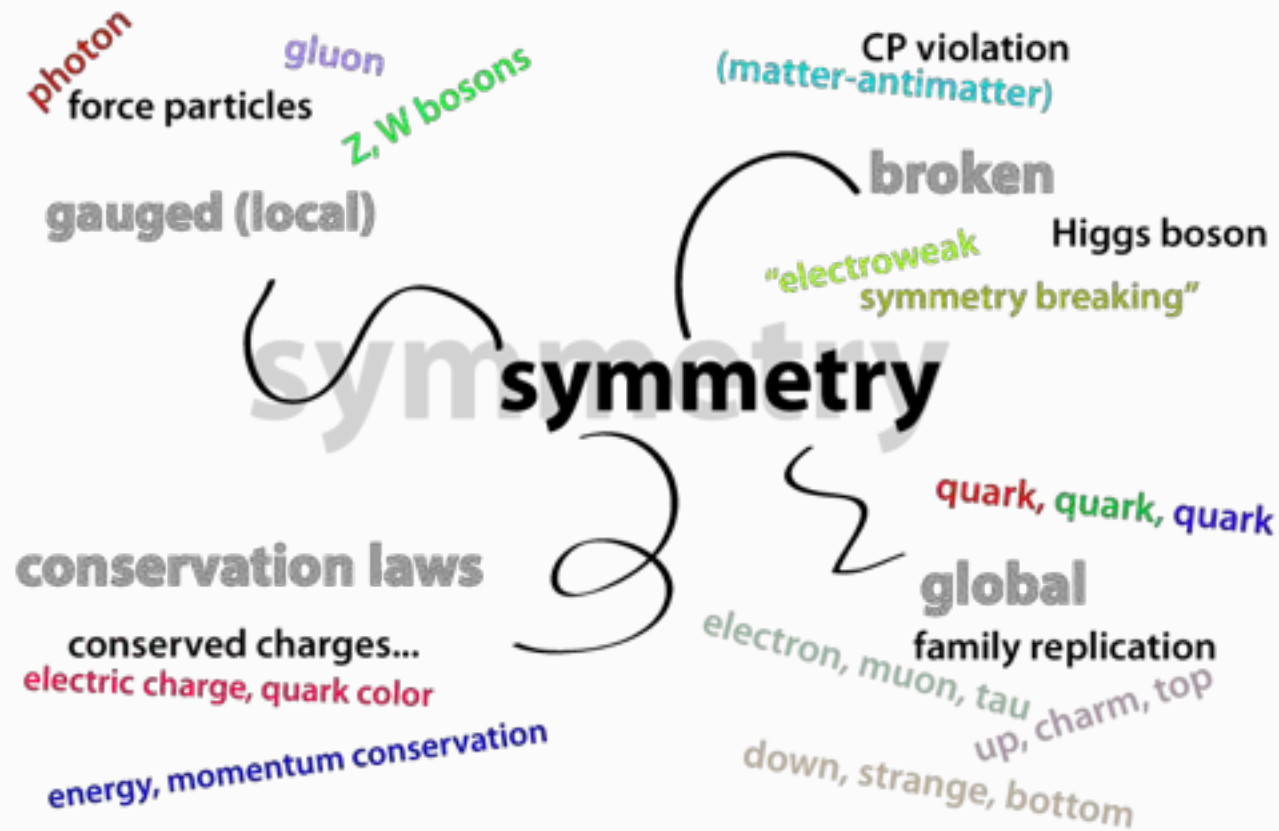
Three Generations of Matter (Fermions)			
	I	II	III
mass →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
name →	u up	c charm	t top
Quarks	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s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



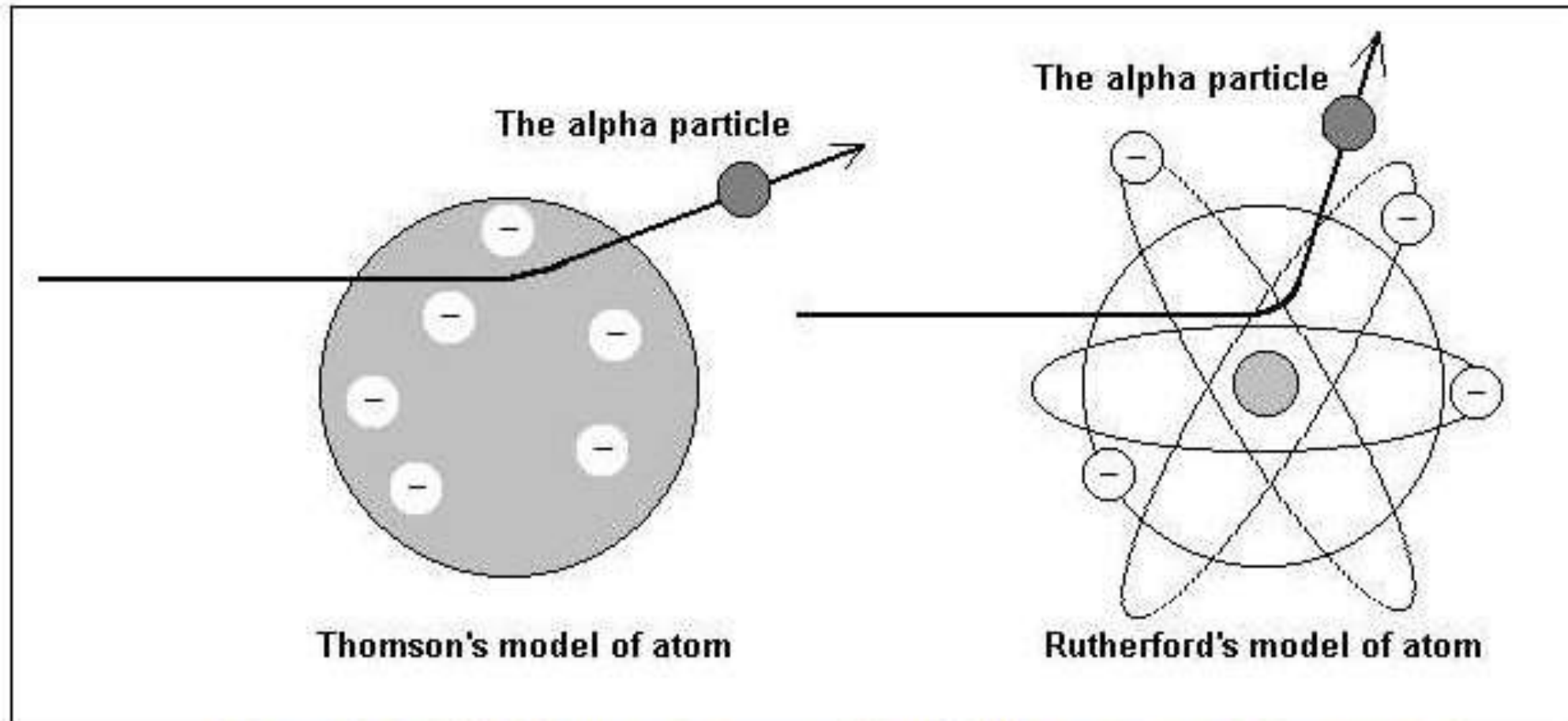
Gargamelle

Simetría

El progreso actual de la física se debe, en gran medida, el intento de simplificar y profundizar la estructura de simetría de las interacciones fundamentales.



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.



Rutherford et al, 1911-1920

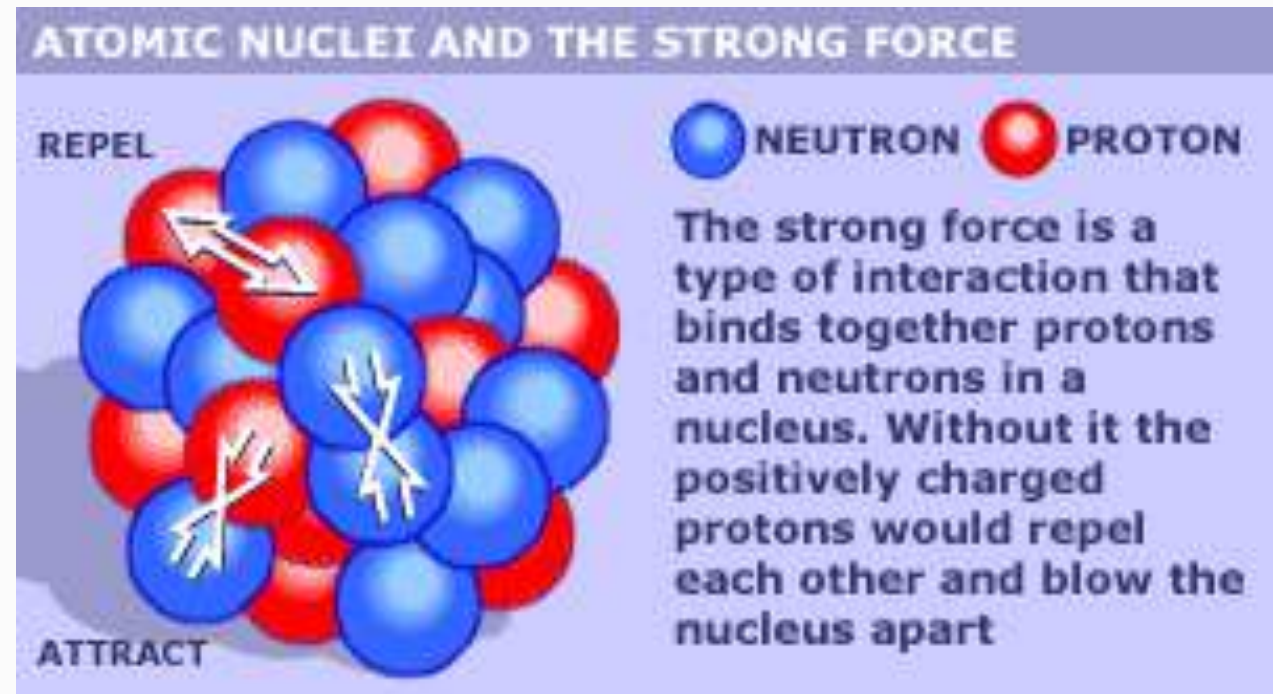
$$A \neq Z \Rightarrow \text{neutrón}$$

Descubriendo las piezas: protones y neutrones

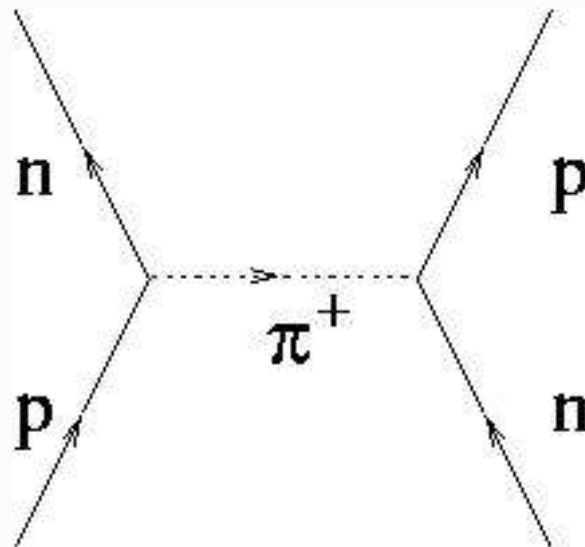
Descubrimiento del neutrón



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

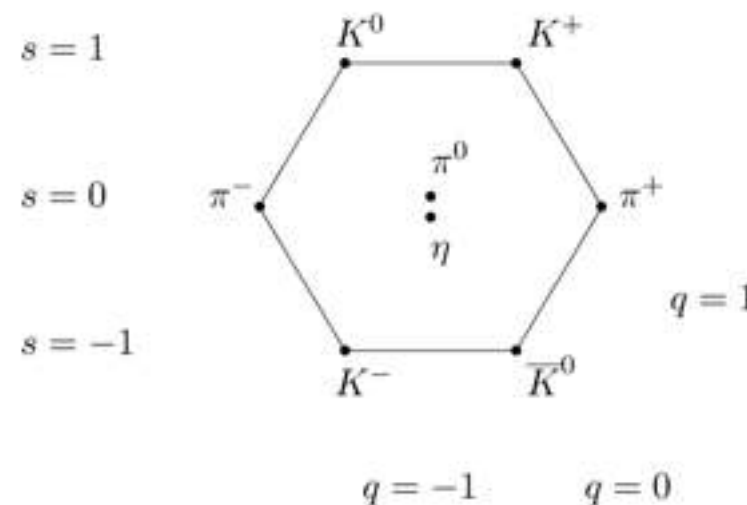
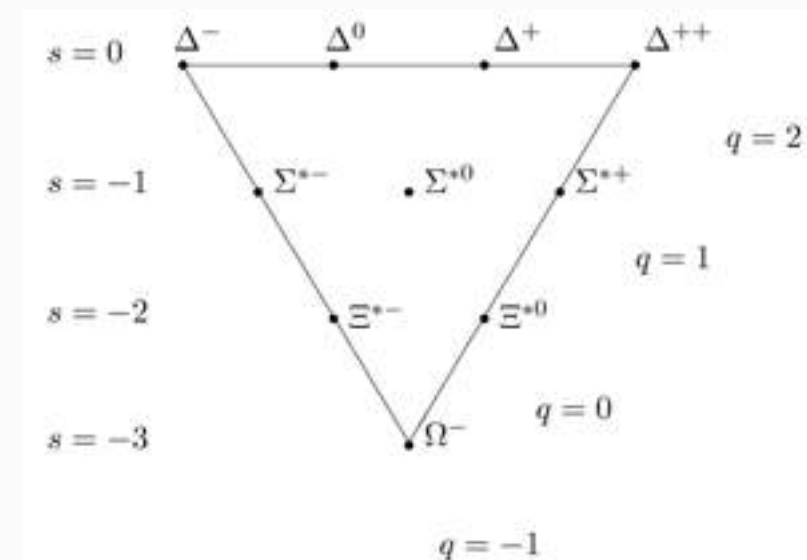
Descubriendo las piezas: quarks

*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*

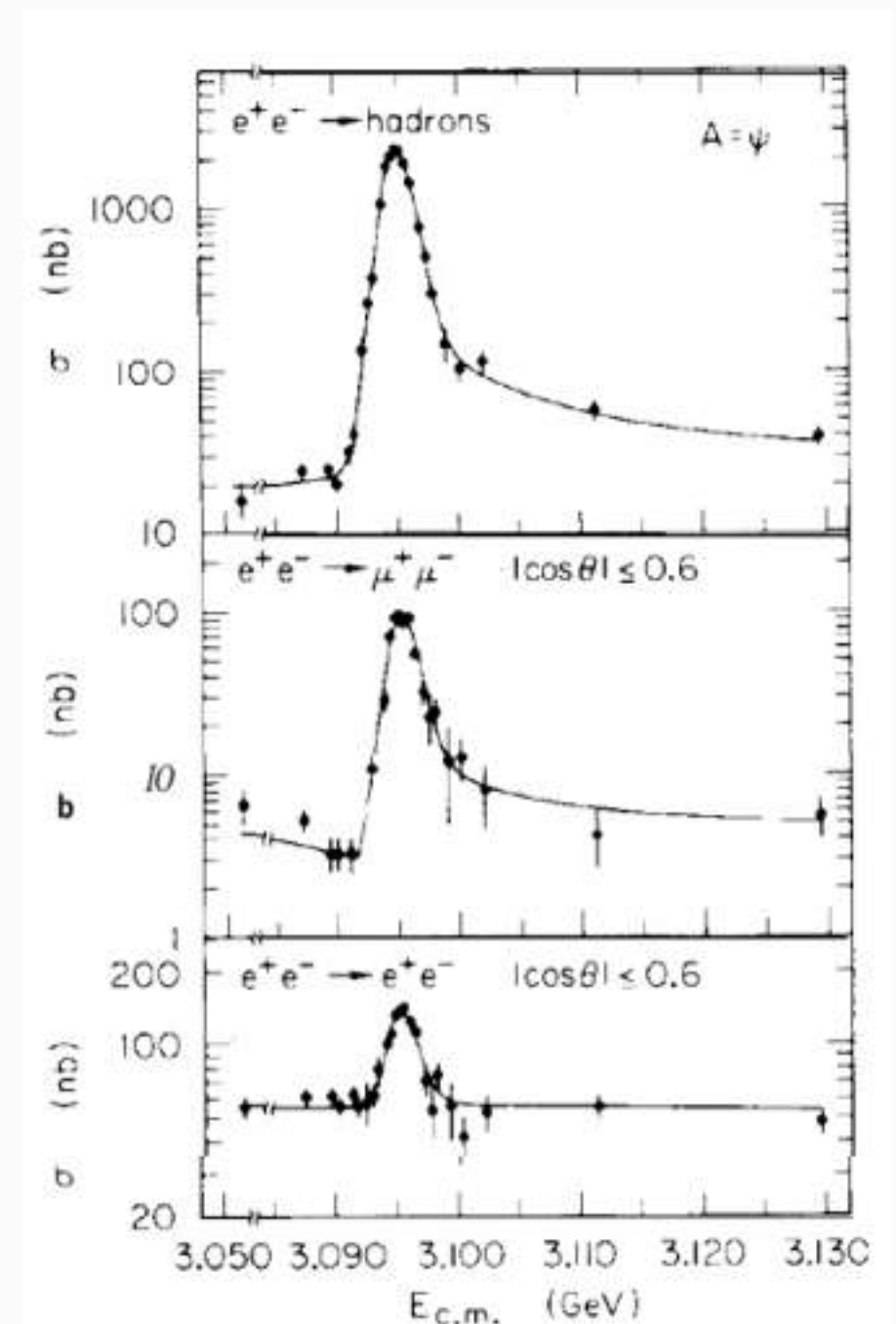
El zoo de partículas se explica con una simetría basada en octetes (y decupletes): el *Camino Óctuple*.

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

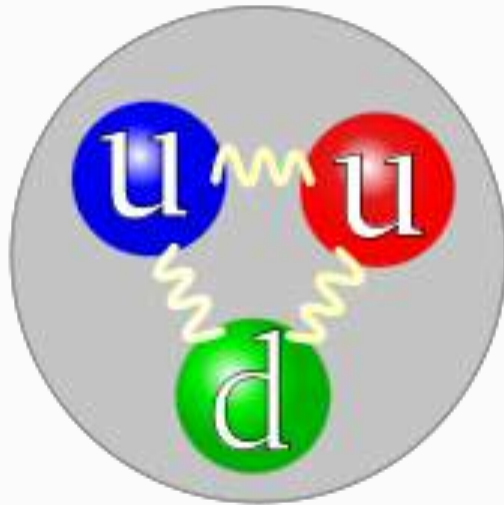


La Cromodinámica Cuántica

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

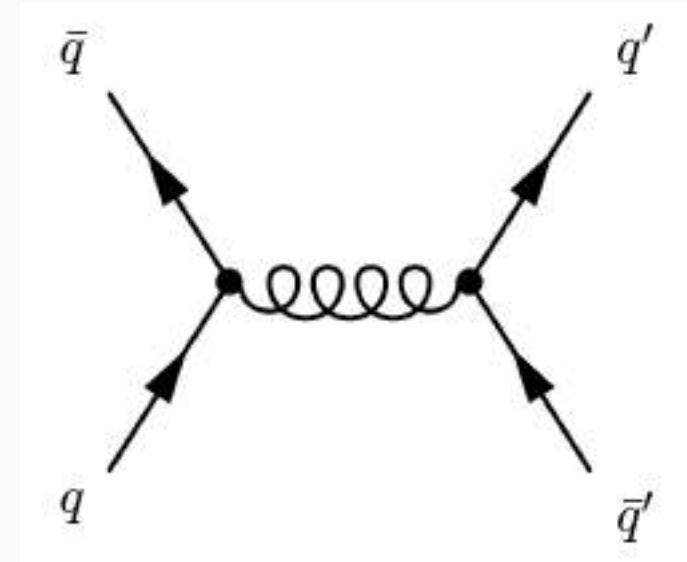
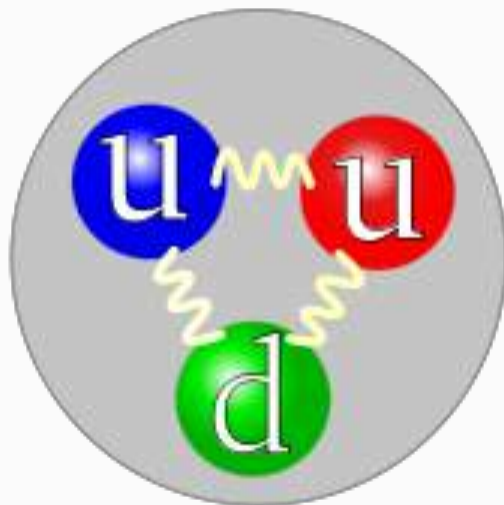
1969 - mediados de 1970s

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



La Cromodinámica Cuántica

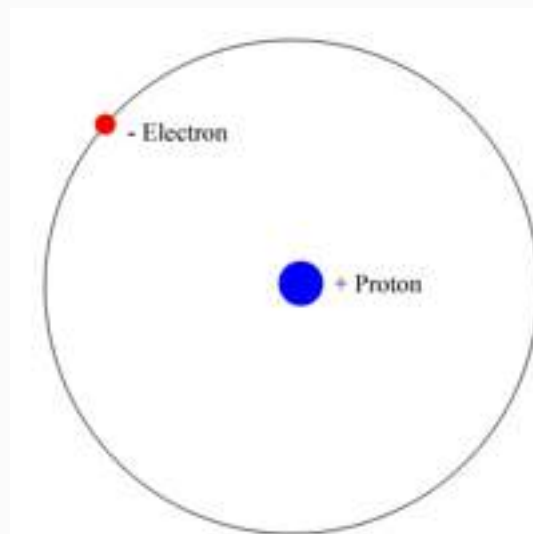
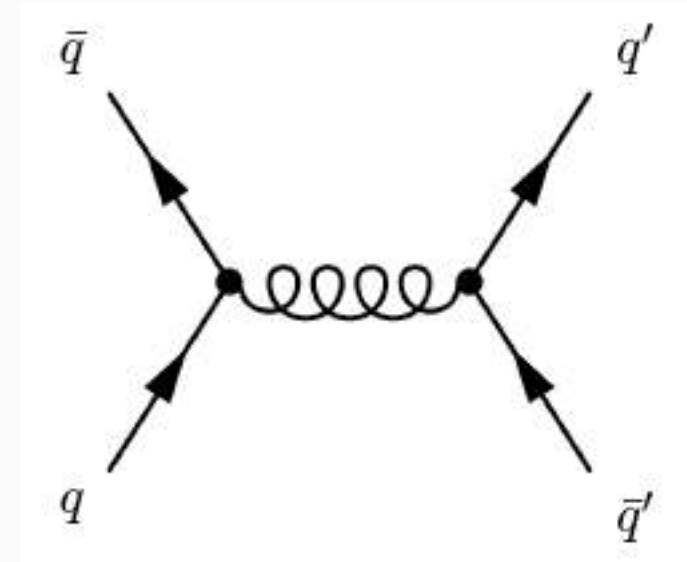
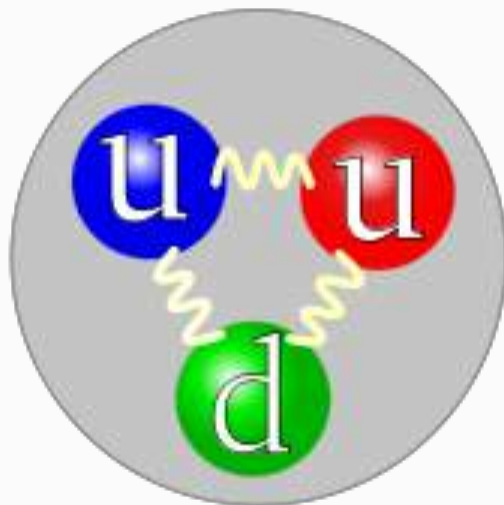
Los *hadrones* (protones, neutrones, piones, ...) están constituidos por *quarks*, que poseen una carga de **color**.



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

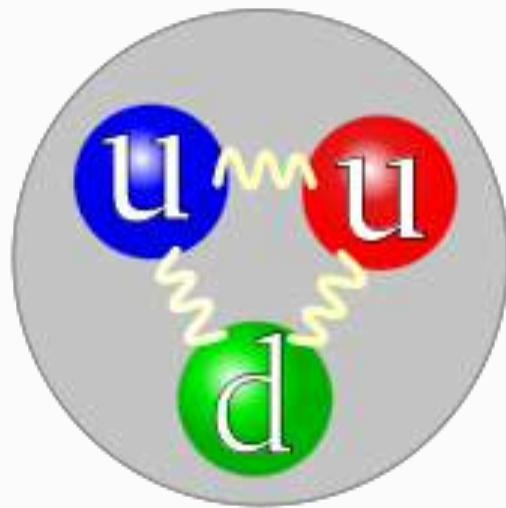
Casi toda la masa del átomo está en el núcleo

¿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



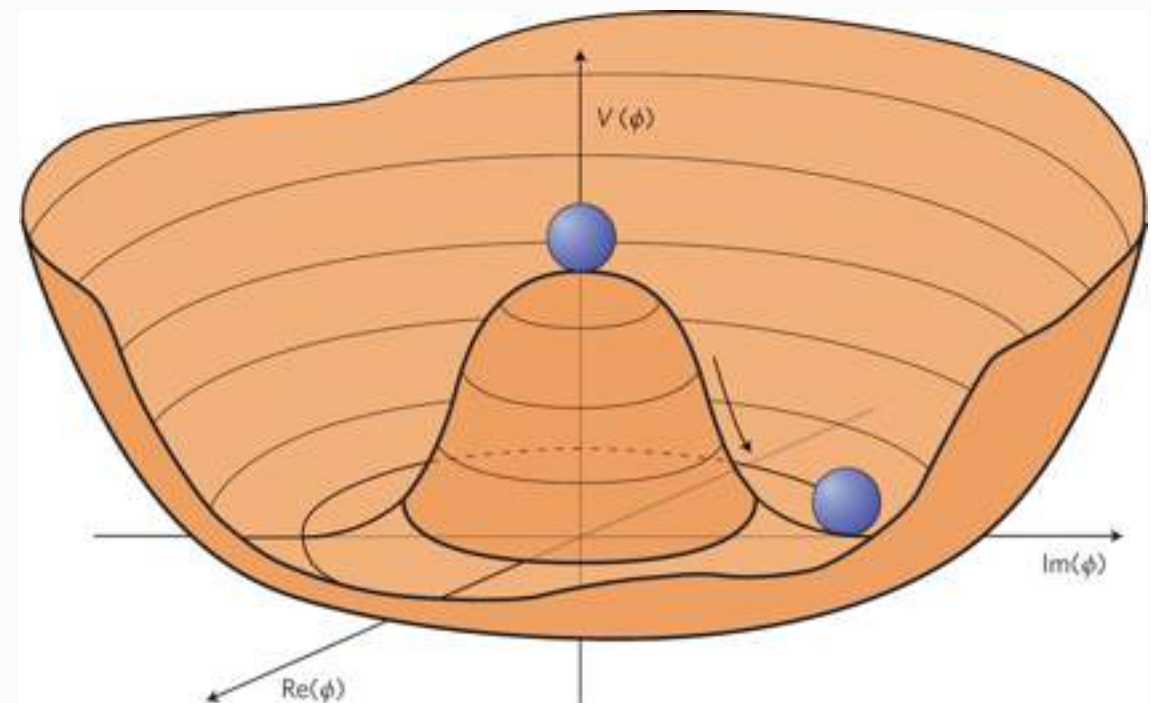
¿Cuál es el origen de la masa de un protón?

¿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

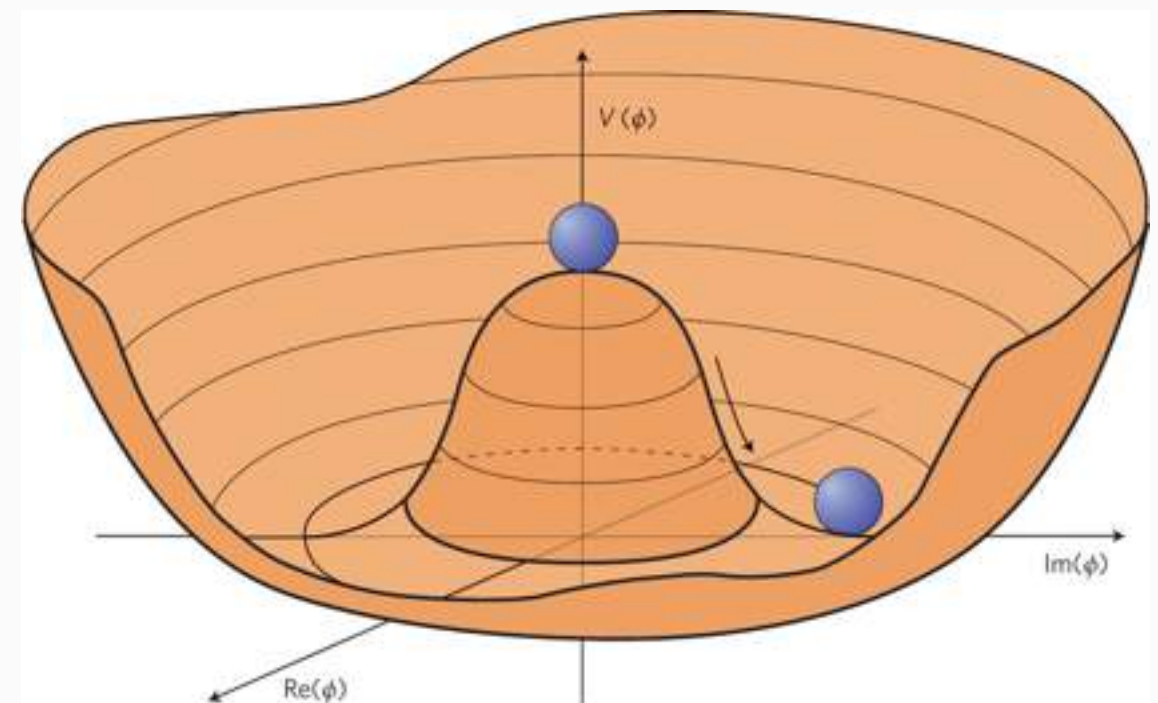


¿Cuál es el origen de la masa?

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



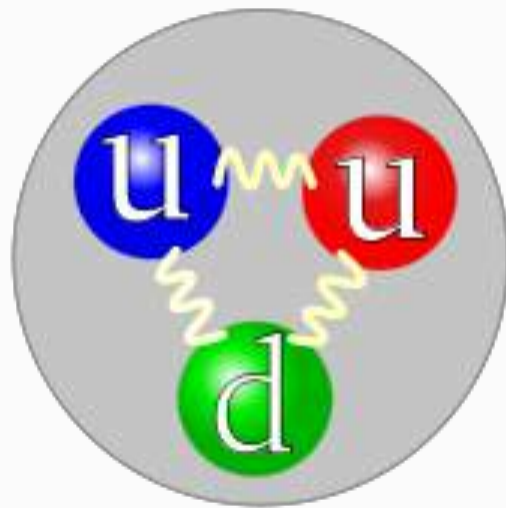
Bosón de Higgs: partícula asociada a la generación de masa.

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

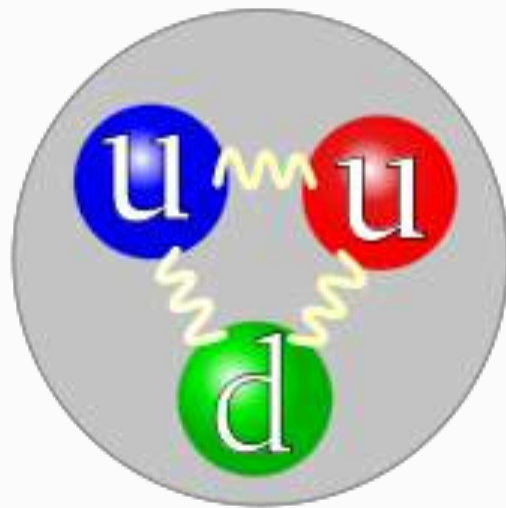
interacción fuerte: $\frac{E_{\text{bind}}(\text{proton})}{3m_q c^2} \approx 50$

¿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



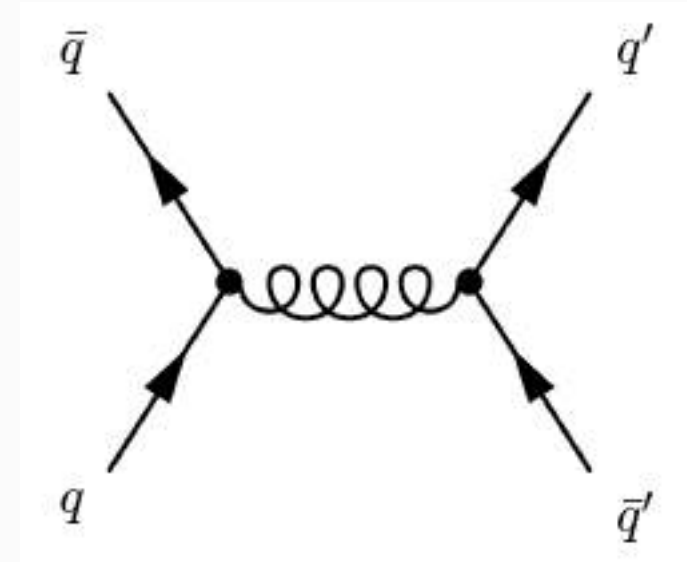
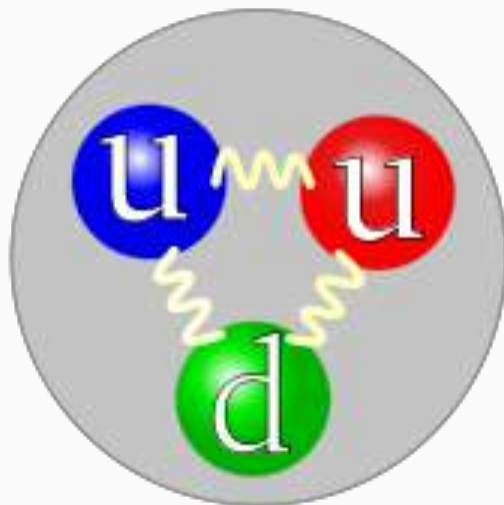
Más del 99% de la masa de la materia ordinaria es energía de ligadura de interacción fuerte entre quarks

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

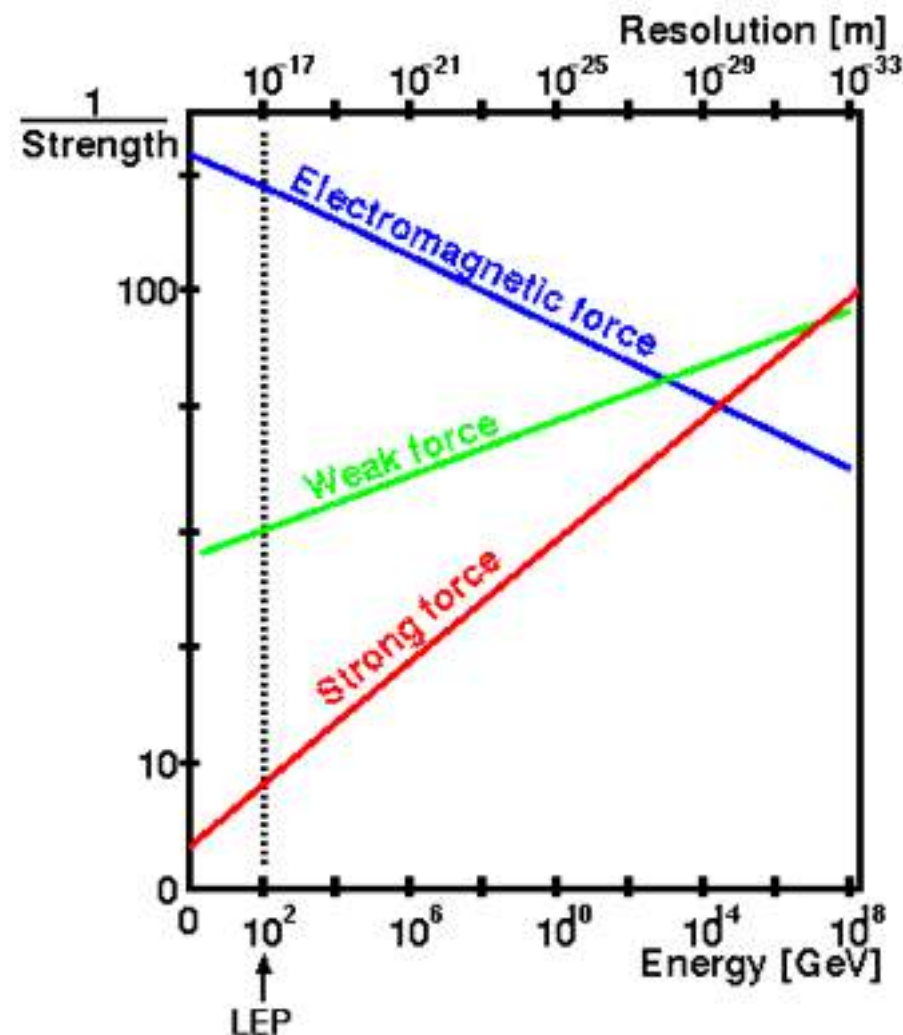
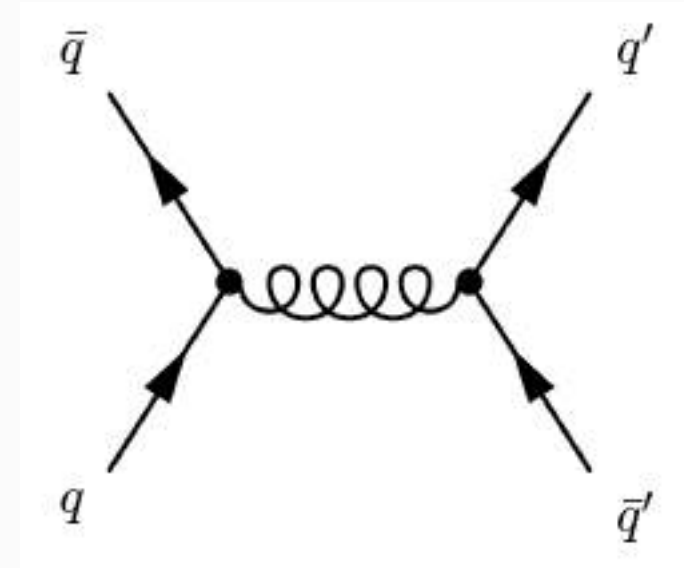
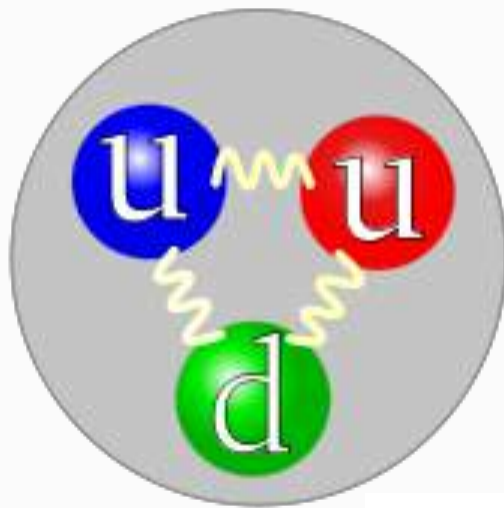
Los *hadrones* (protones, neutrones, piones, ...) están constituidos por *quarks*, que poseen una carga de **color**.



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

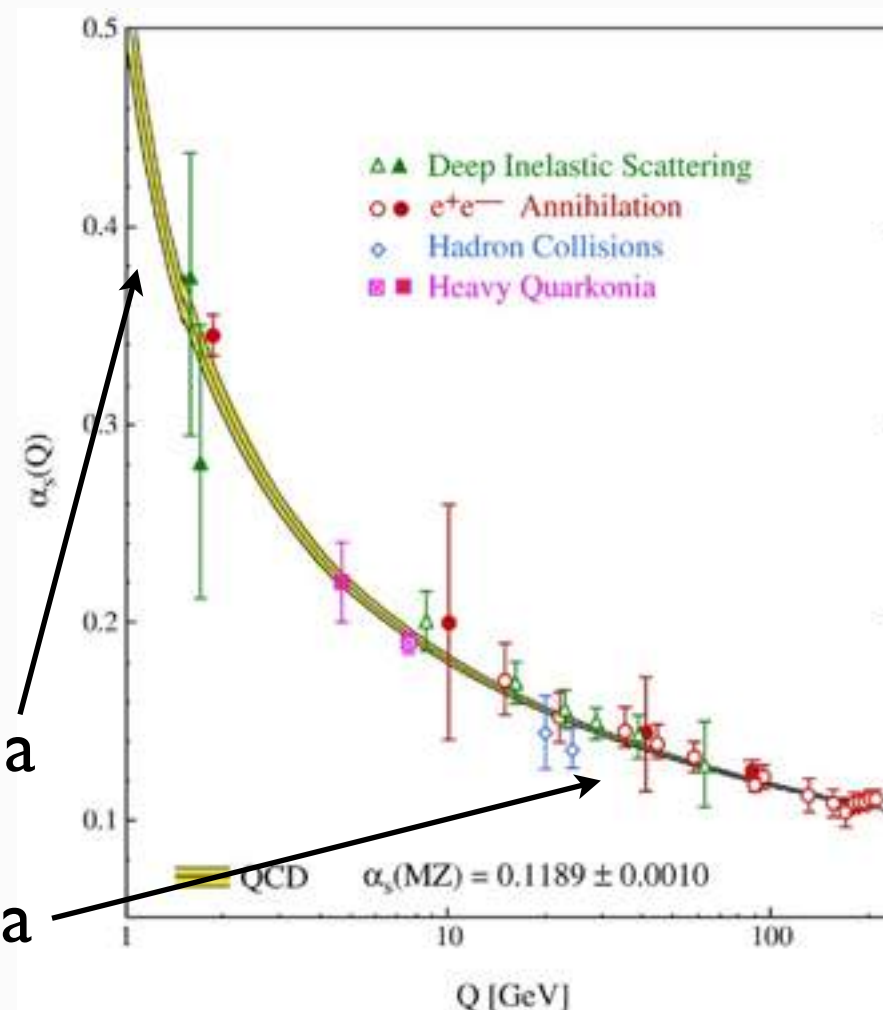
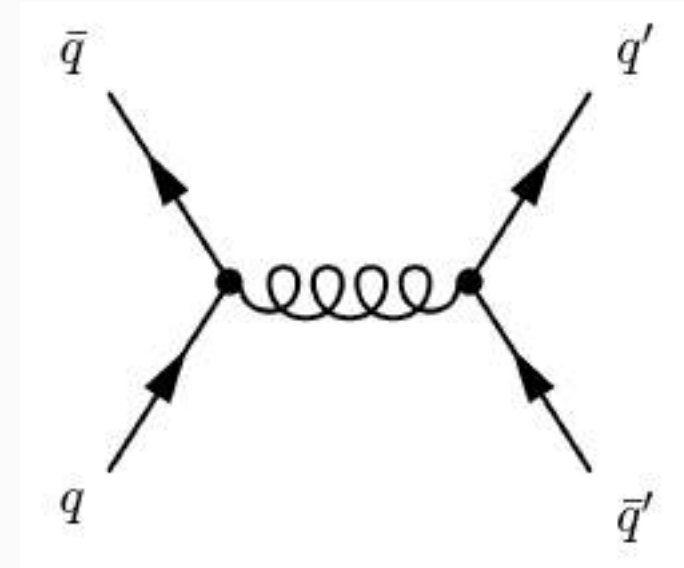
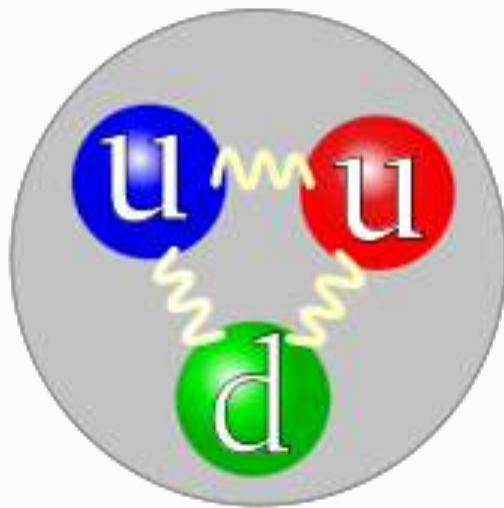
Libertad asintótica

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**.



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



David J. Gross



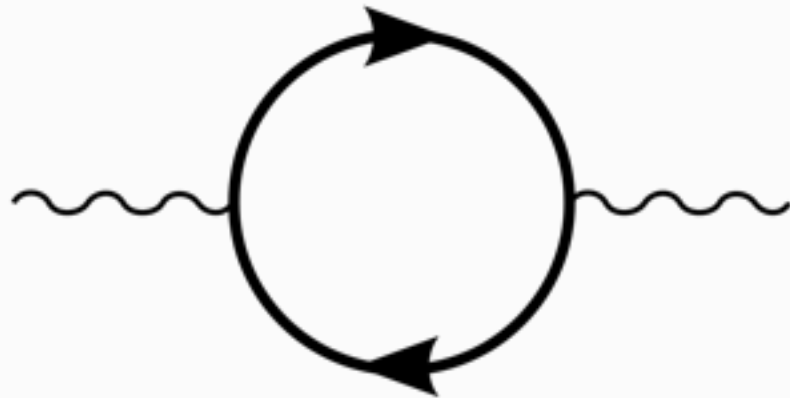
H. David Politzer



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

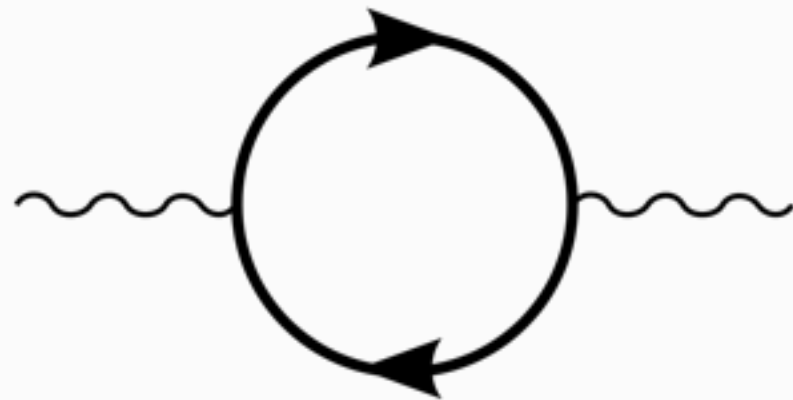


Polarización del vacío

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

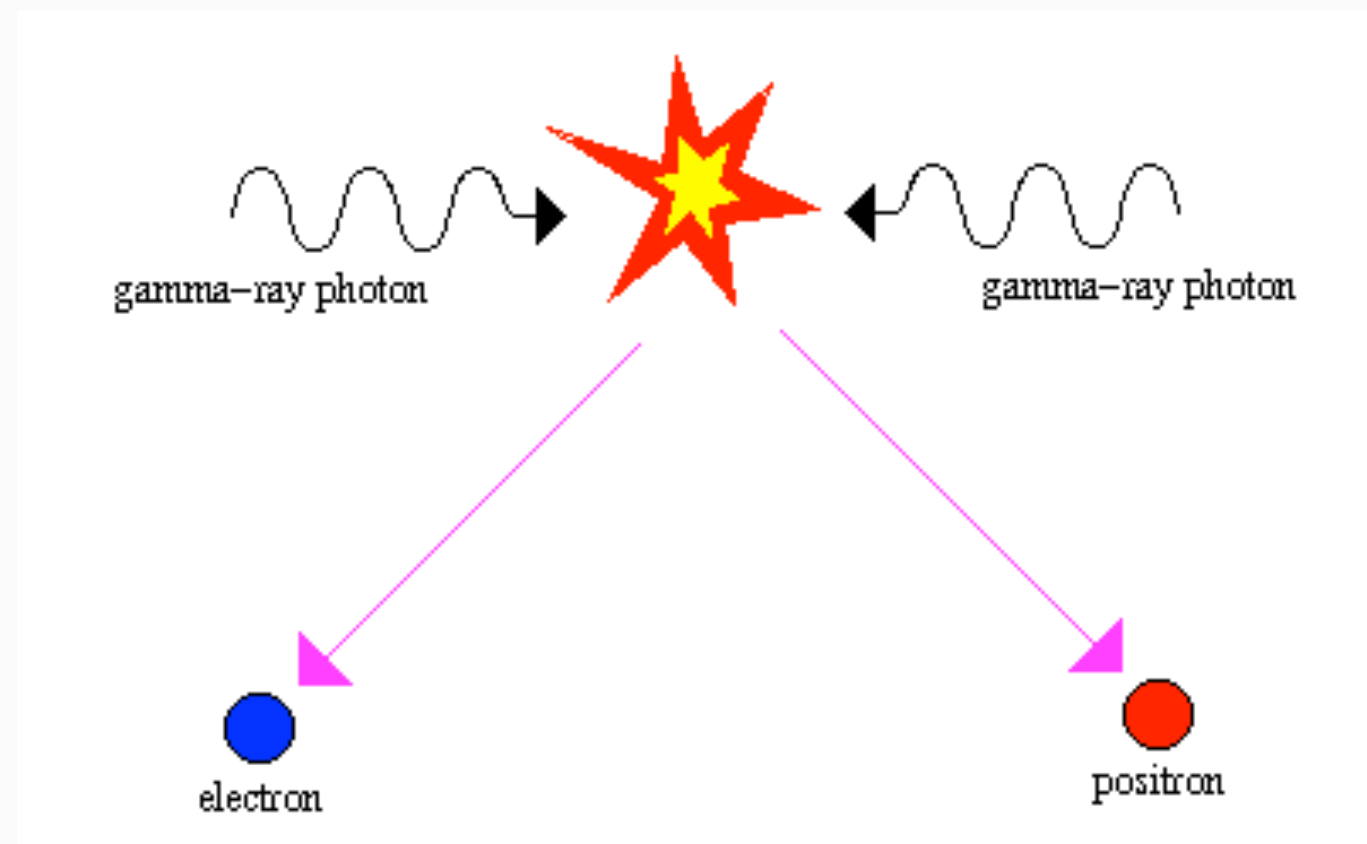
El vacío cuántico posee estructura, revelada por los campos gauge.

Burbujas en el vacío



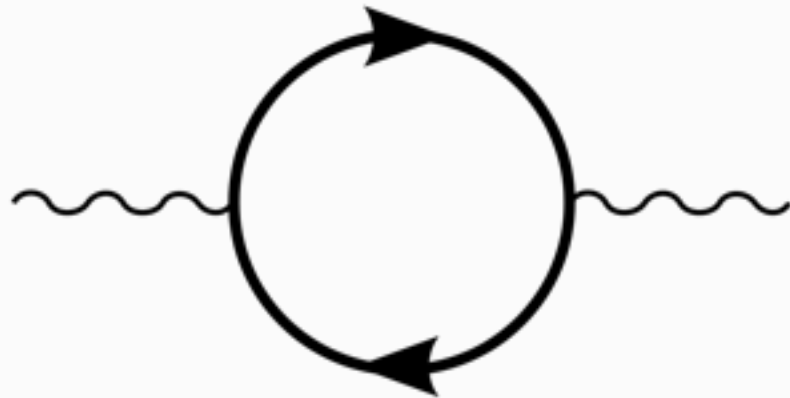
Polarización del vacío

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



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

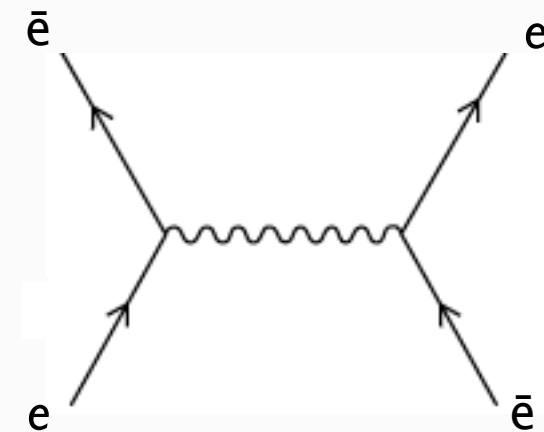
Burbujas en el vacío



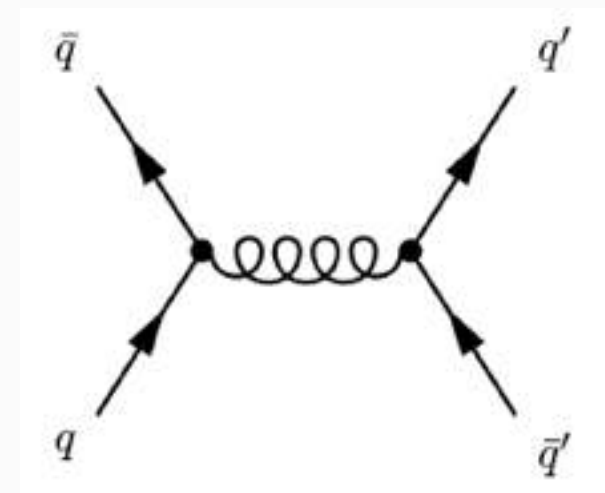
Polarización del vacío

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

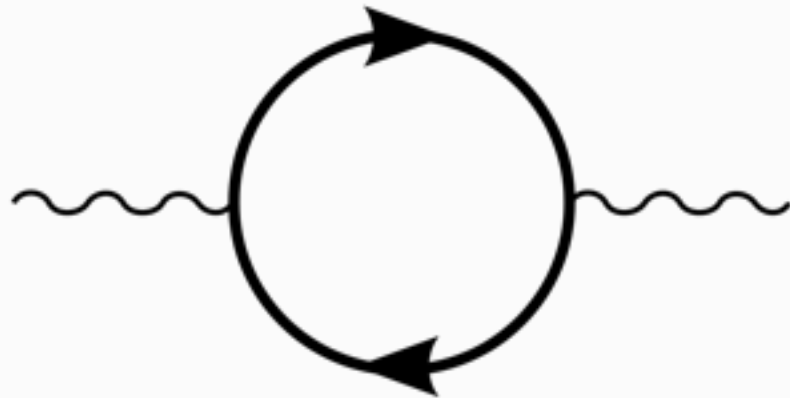
Electrodinámica: apantallamiento de la carga



Cromodinámica: ANTI-apantallamiento de la carga



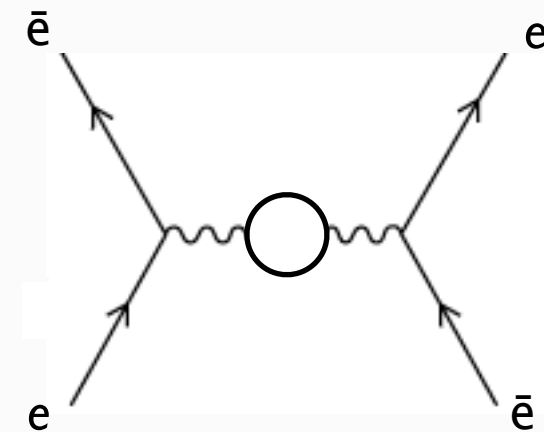
Burbujas en el vacío



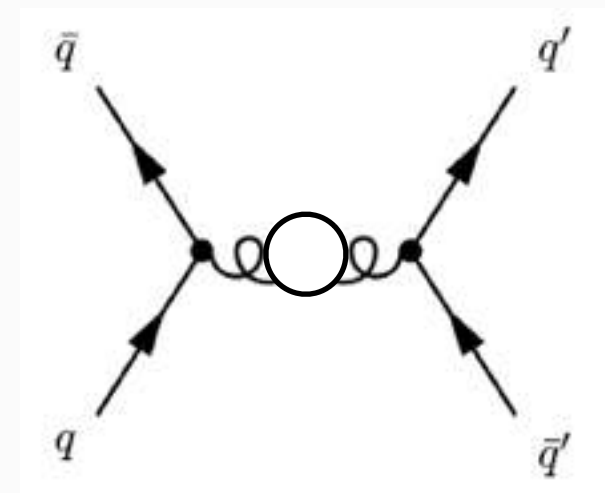
Polarización del vacío

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

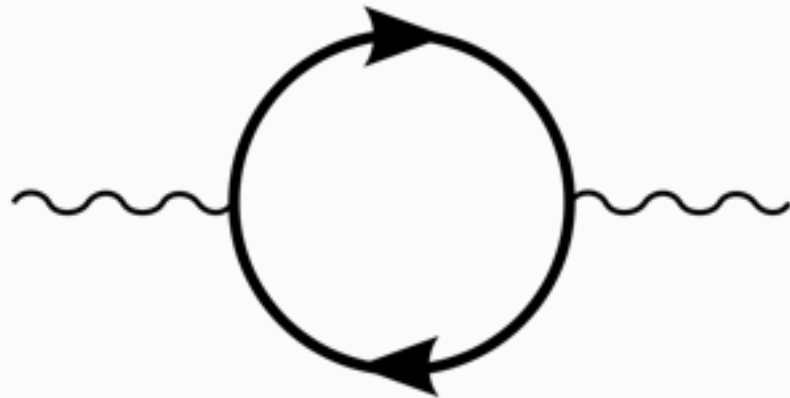
Electrodinámica: apantallamiento de la carga



Cromodinámica: ANTI-apantallamiento de la carga



Burbujas en el vacío

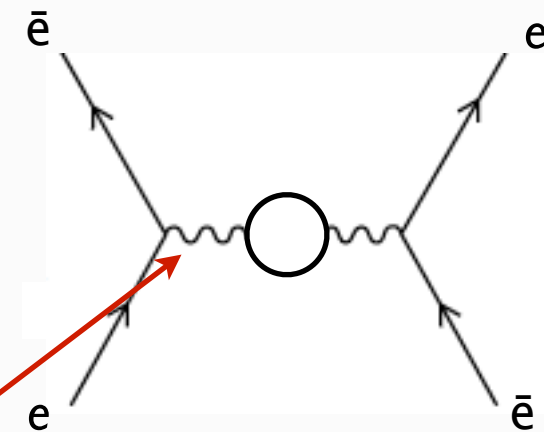


Polarización del vacío

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

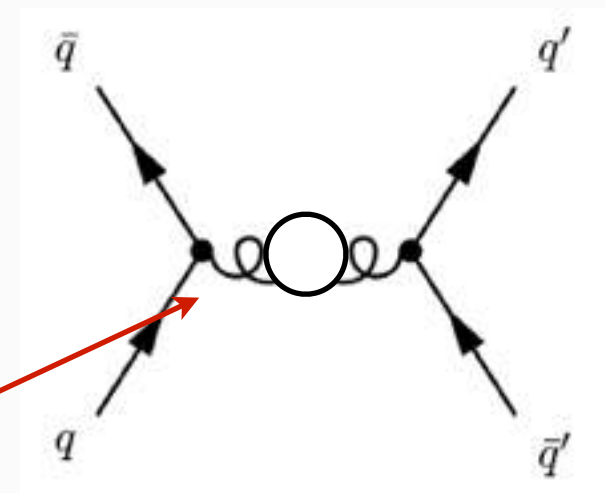
Electrodinámica: apantallamiento de la carga

el fotón NO lleva carga de eléctrica

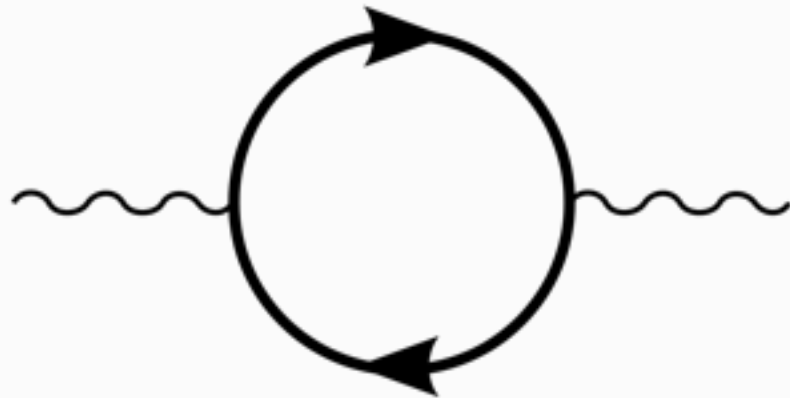


Cromodinámica: ANTI-apantallamiento de la carga

el gluon SÍ lleva carga de color



Burbujas en el vacío

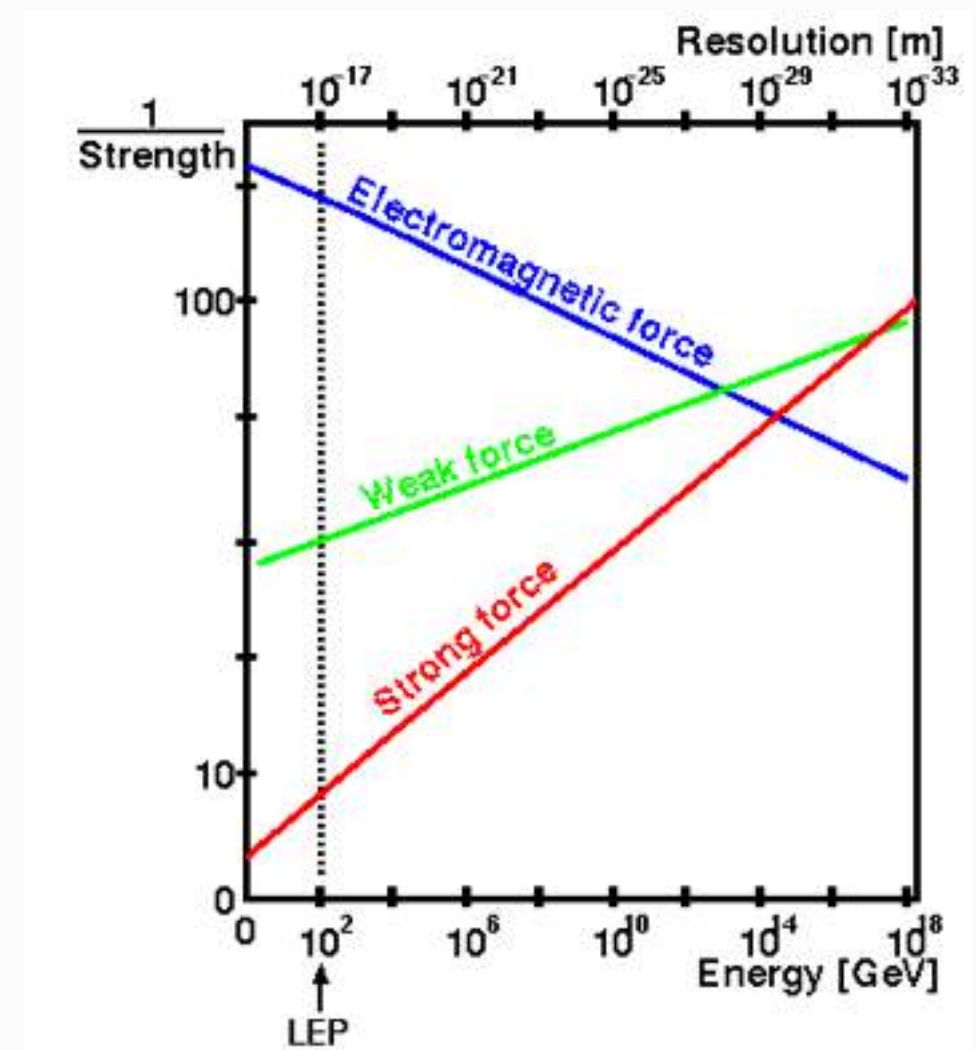


Polarización del vacío

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

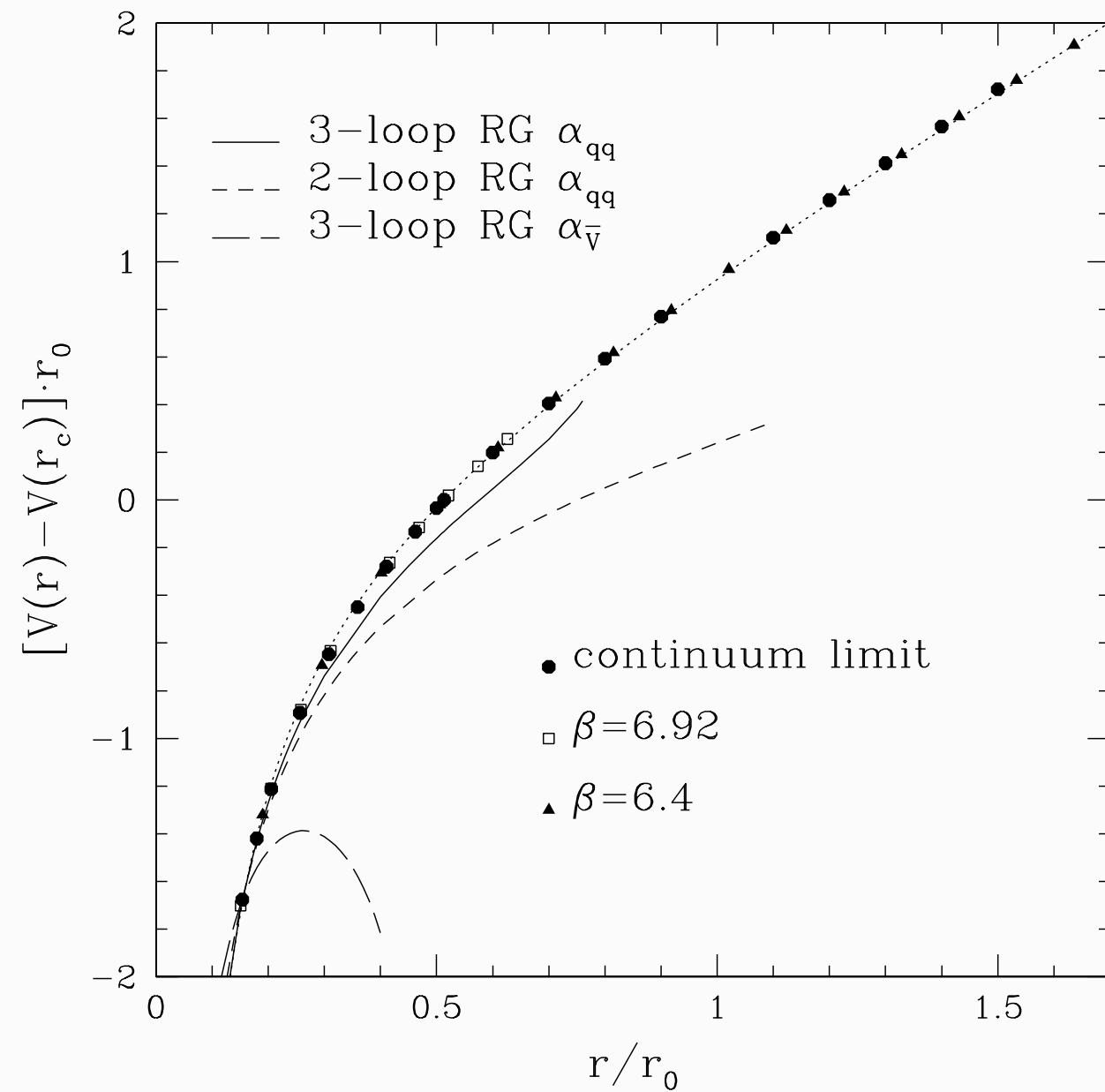
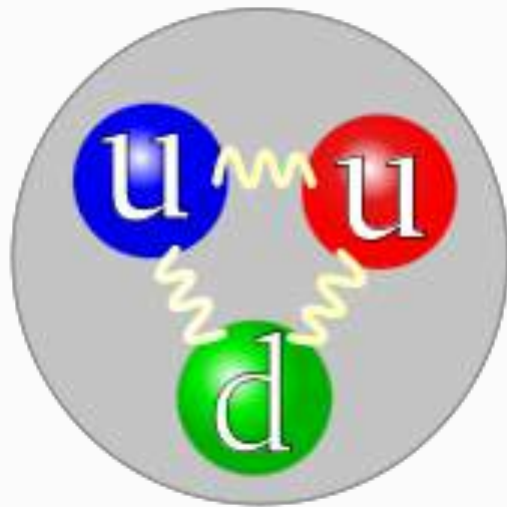
Electrodinámica: apantallamiento de la carga

Cromodinámica: ANTI-apantallamiento de la carga



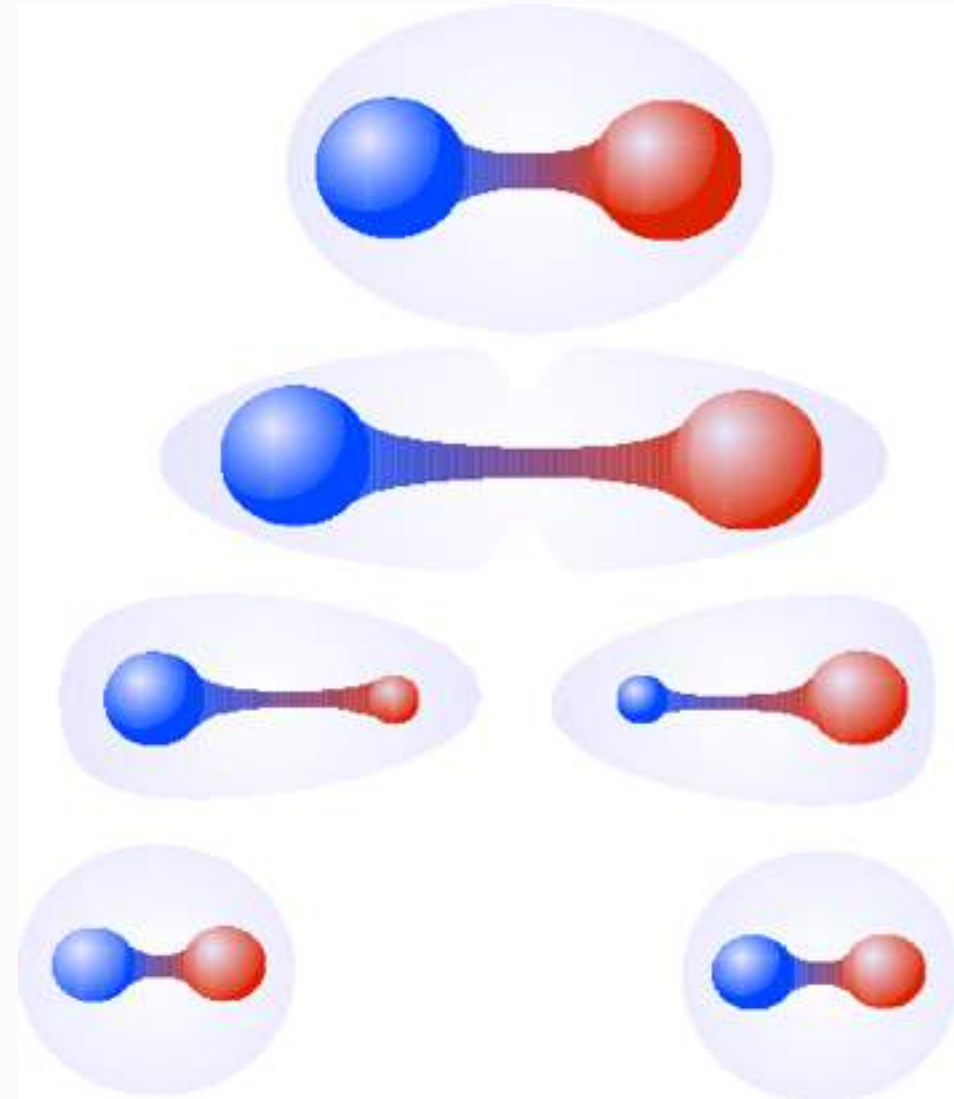
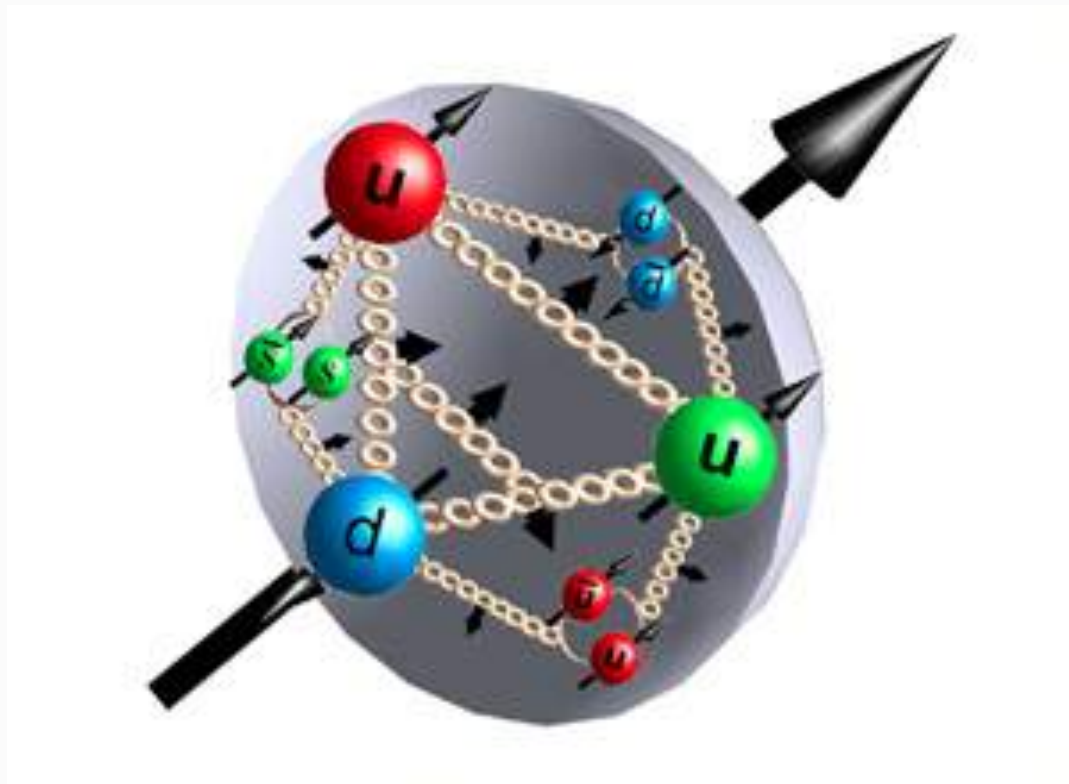
Confinamiento

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



Confinamiento

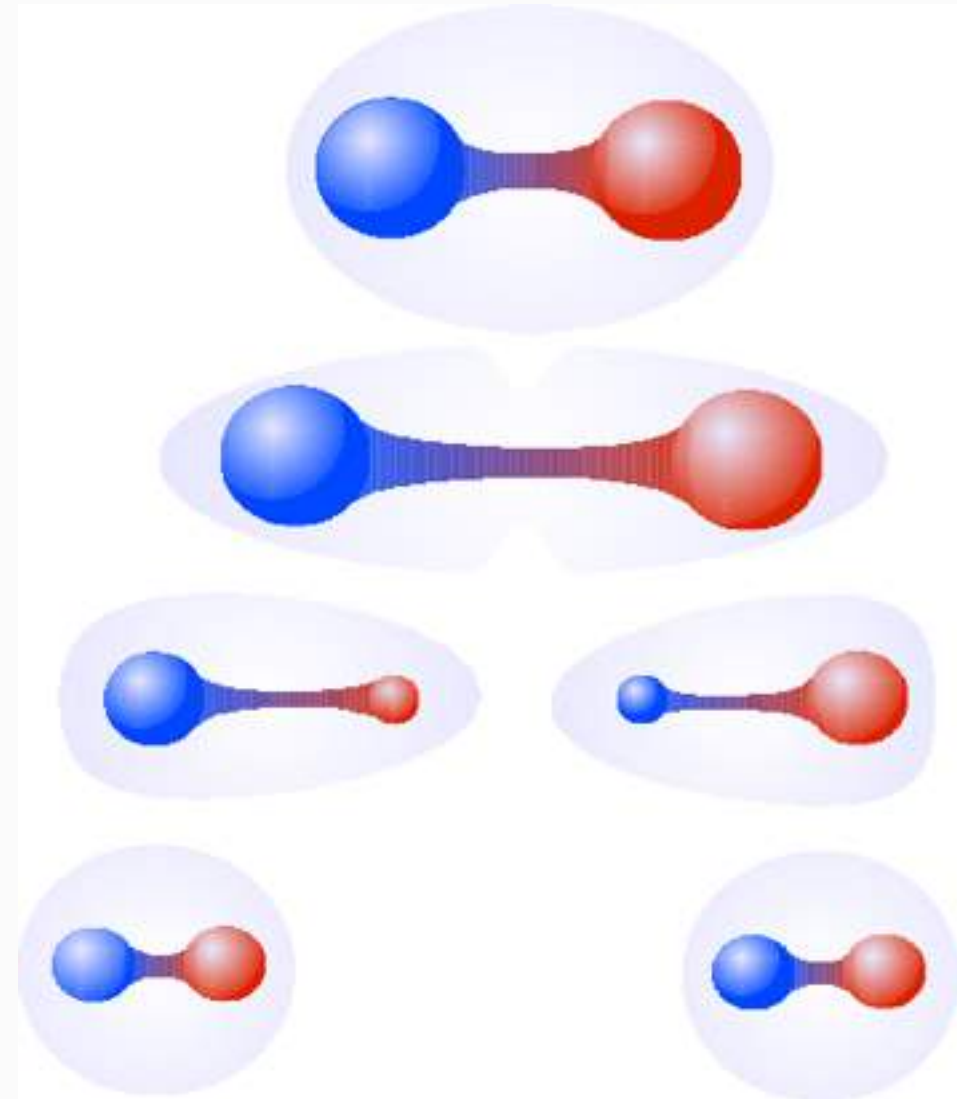
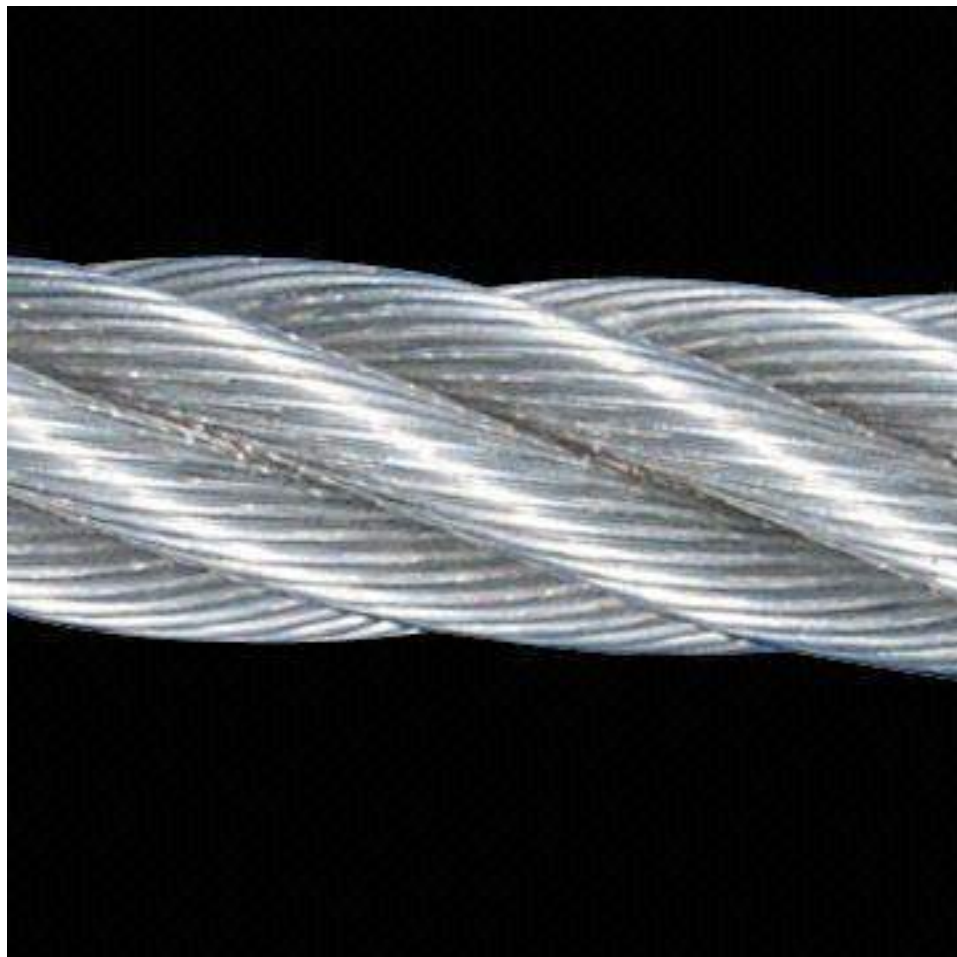
Los quarks no existen como partículas aisladas: sólo *confinados* en hadrones.



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.



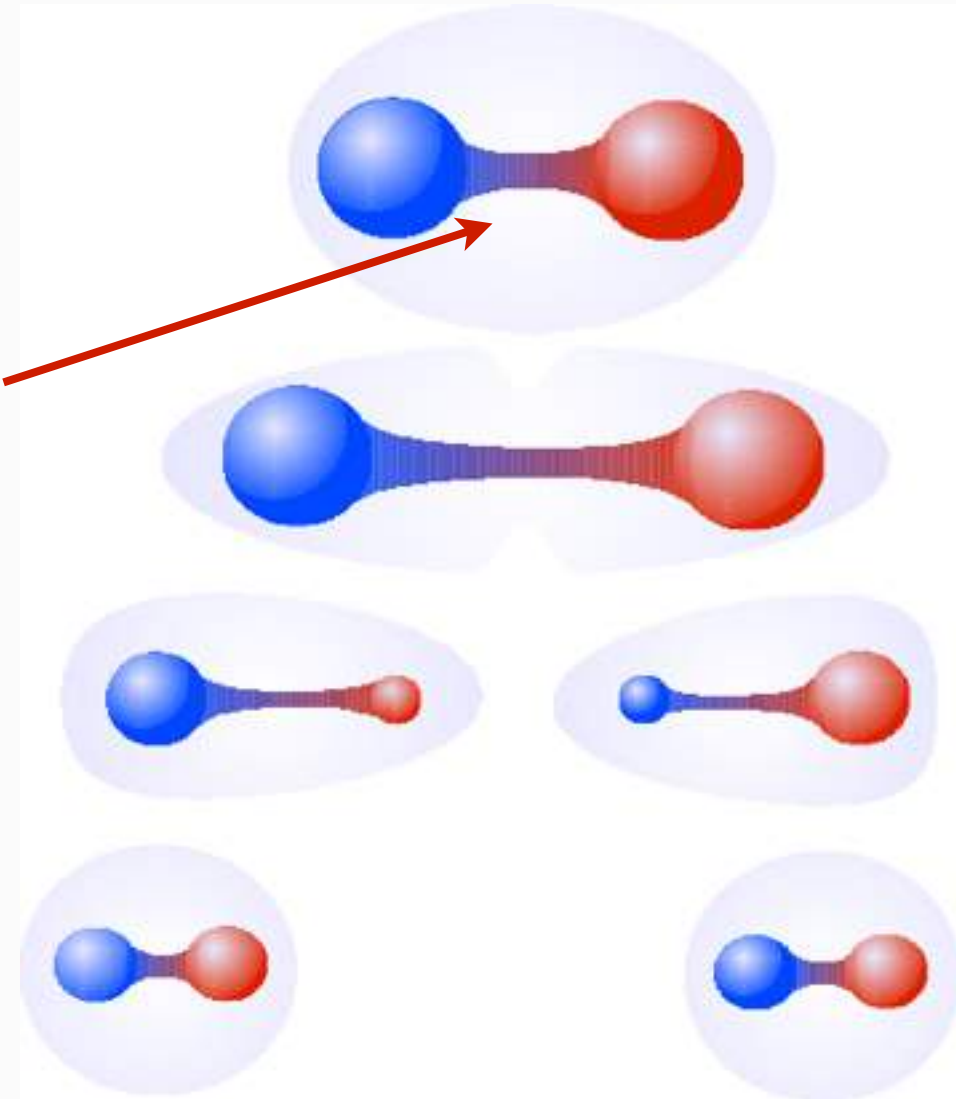
La tensión de la “cuerda” quark-antiquark es similar a la de un cable de acero, pero está concentrada en una sección 13 órdenes de magnitud menor.

Confinamiento

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

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

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

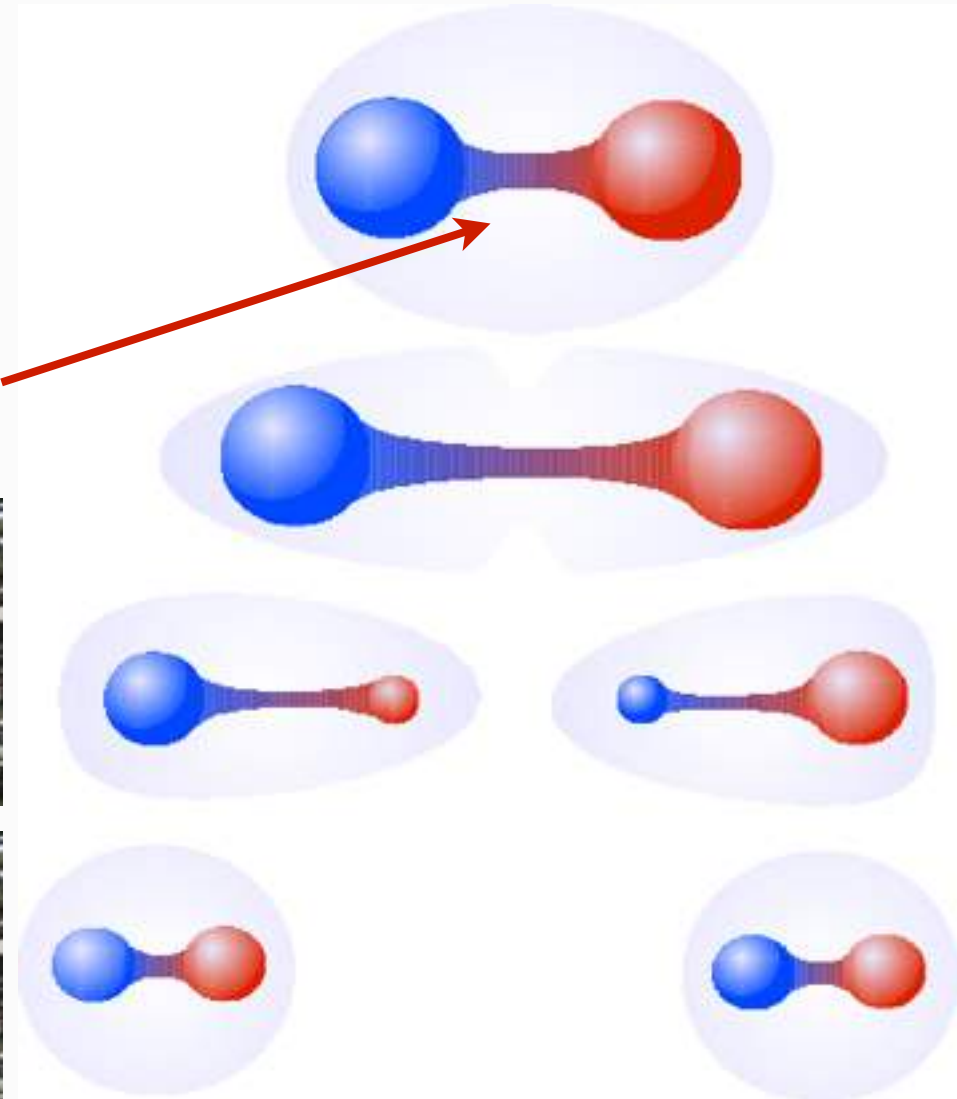


Confinamiento

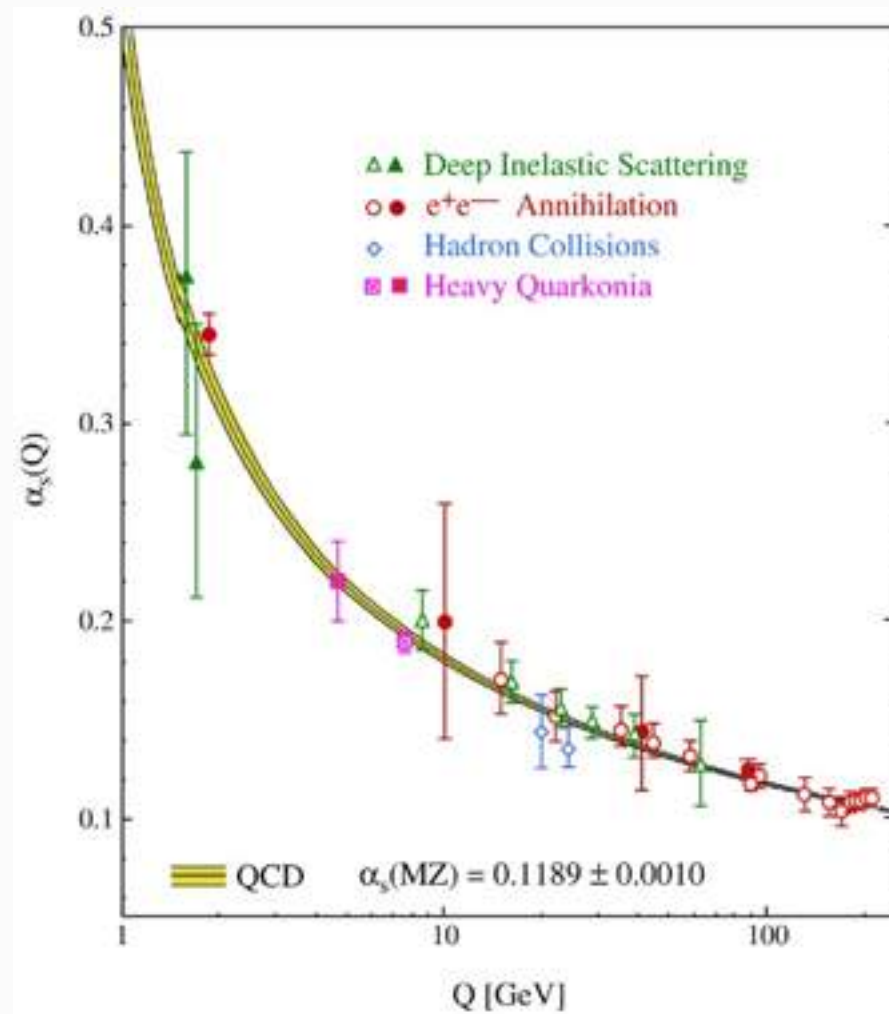
Los quarks no existen como partículas aisladas: sólo *confinados* en hadrones.

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

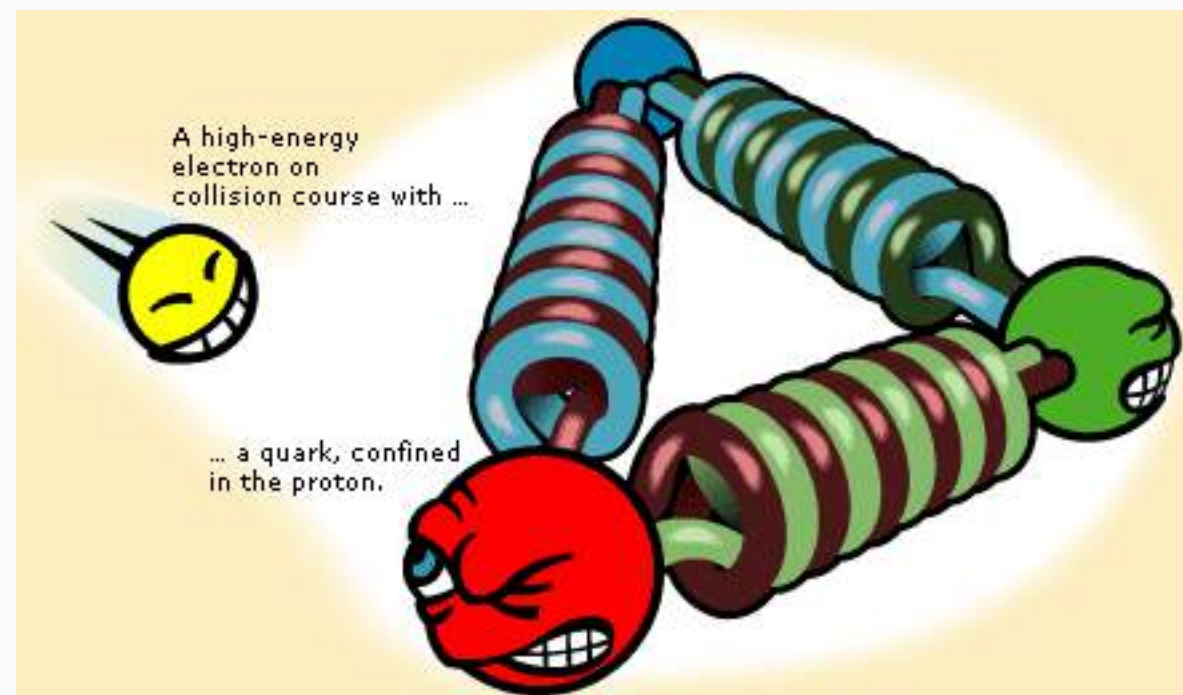
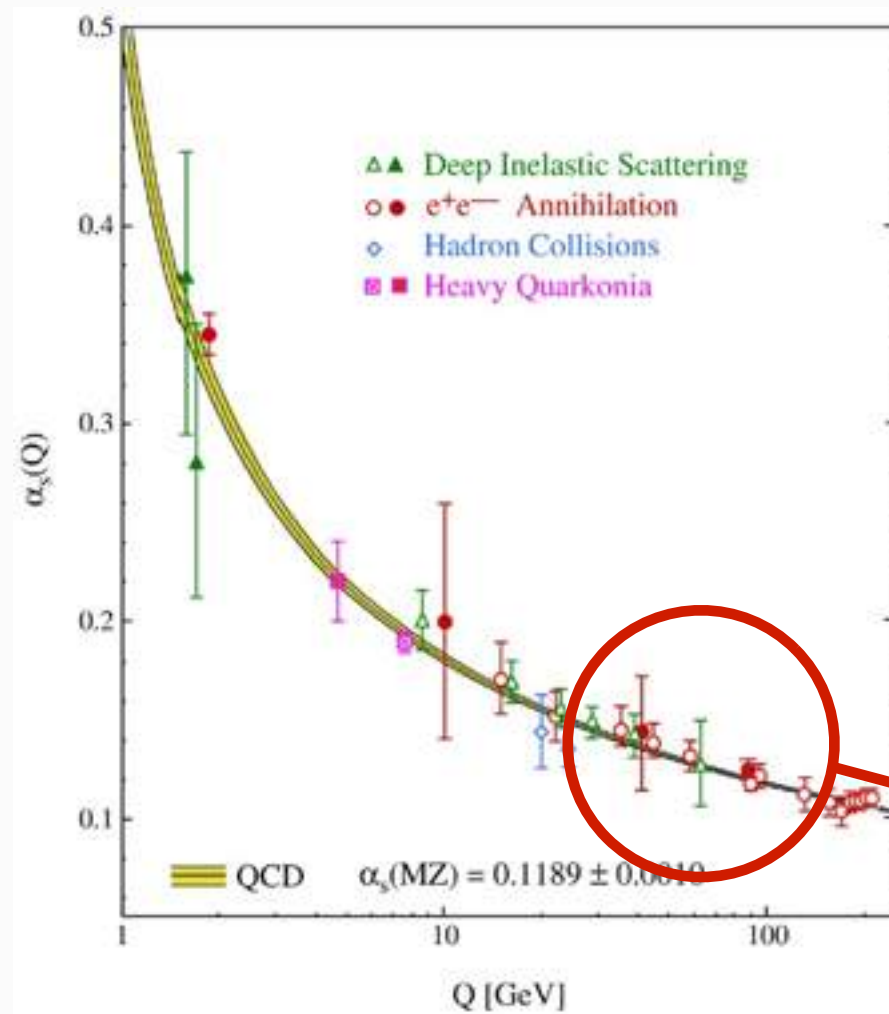
$$\sigma \approx (0.4 \text{ GeV})^2$$



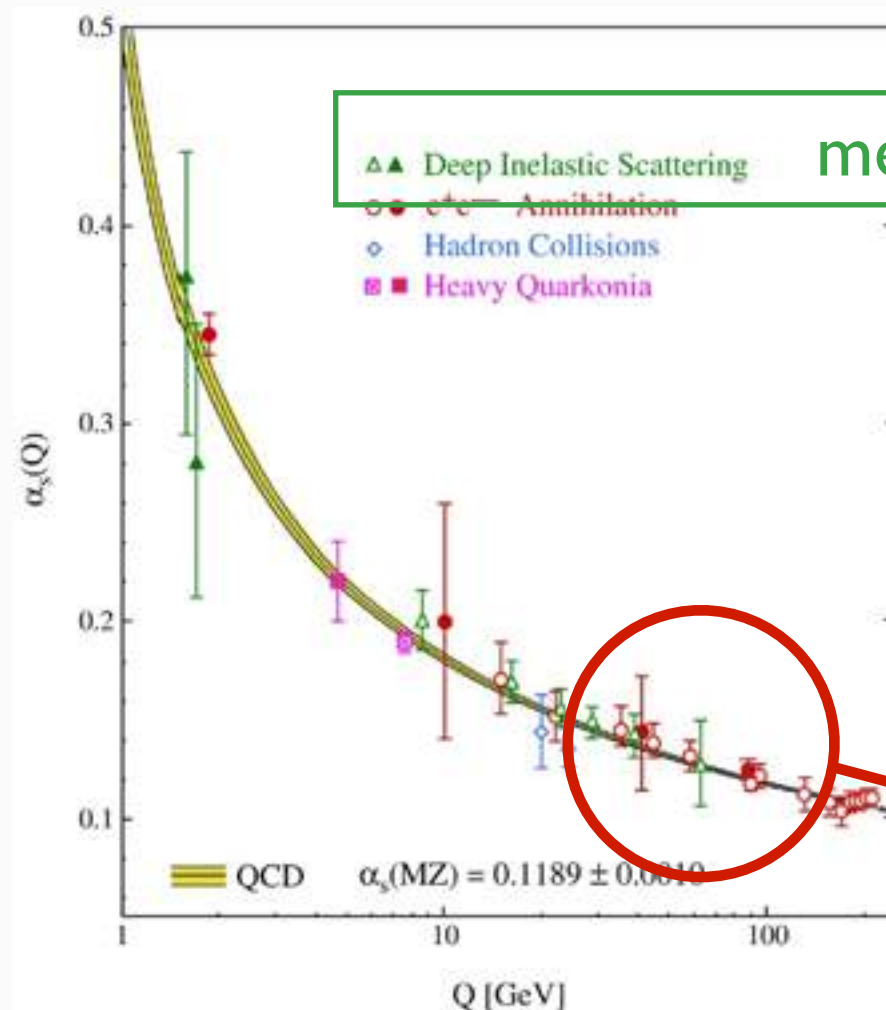
Física de interacción fuerte a cortas distancias



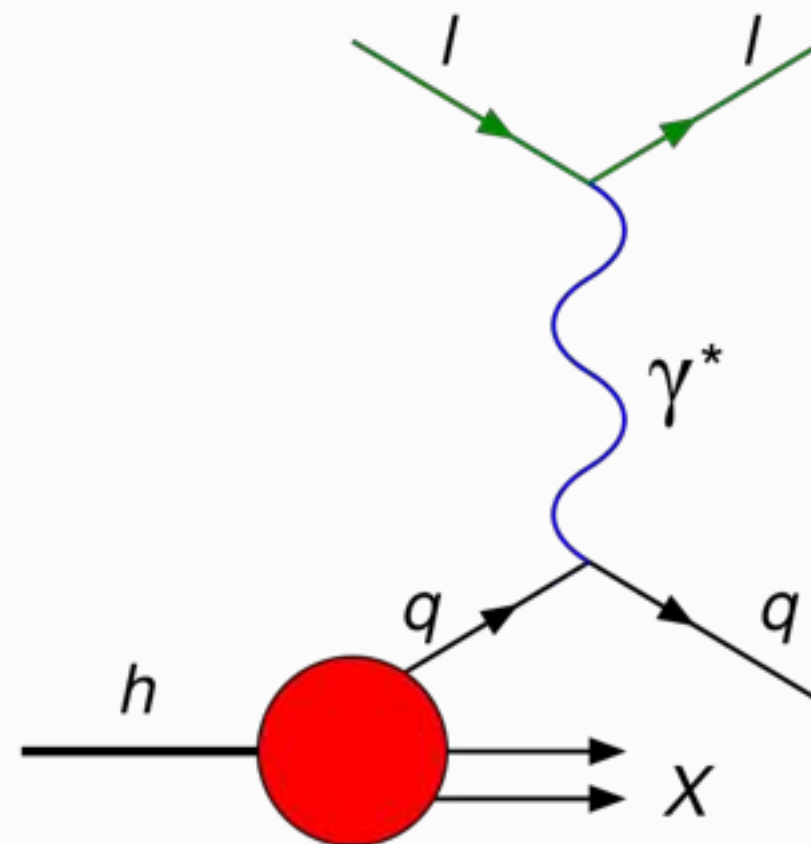
Física de interacción fuerte a cortas distancias



Física de interacción fuerte a cortas distancias

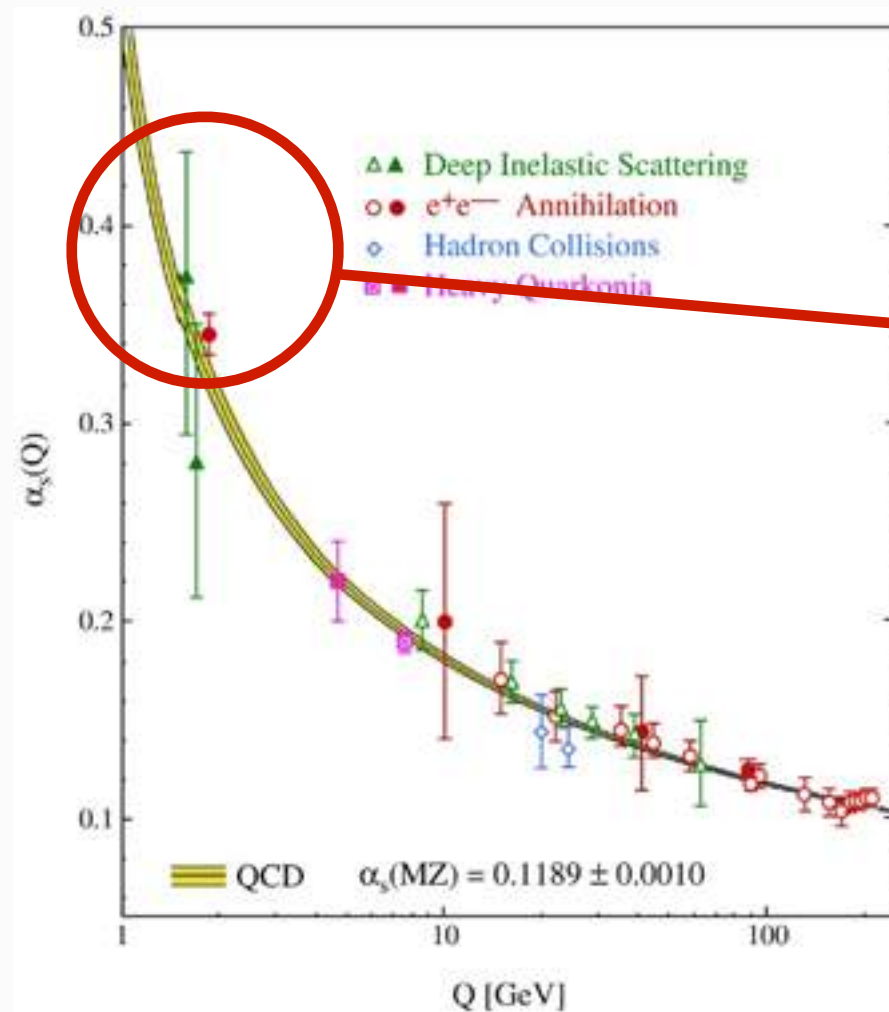


medidas de la constante de acoplamiento



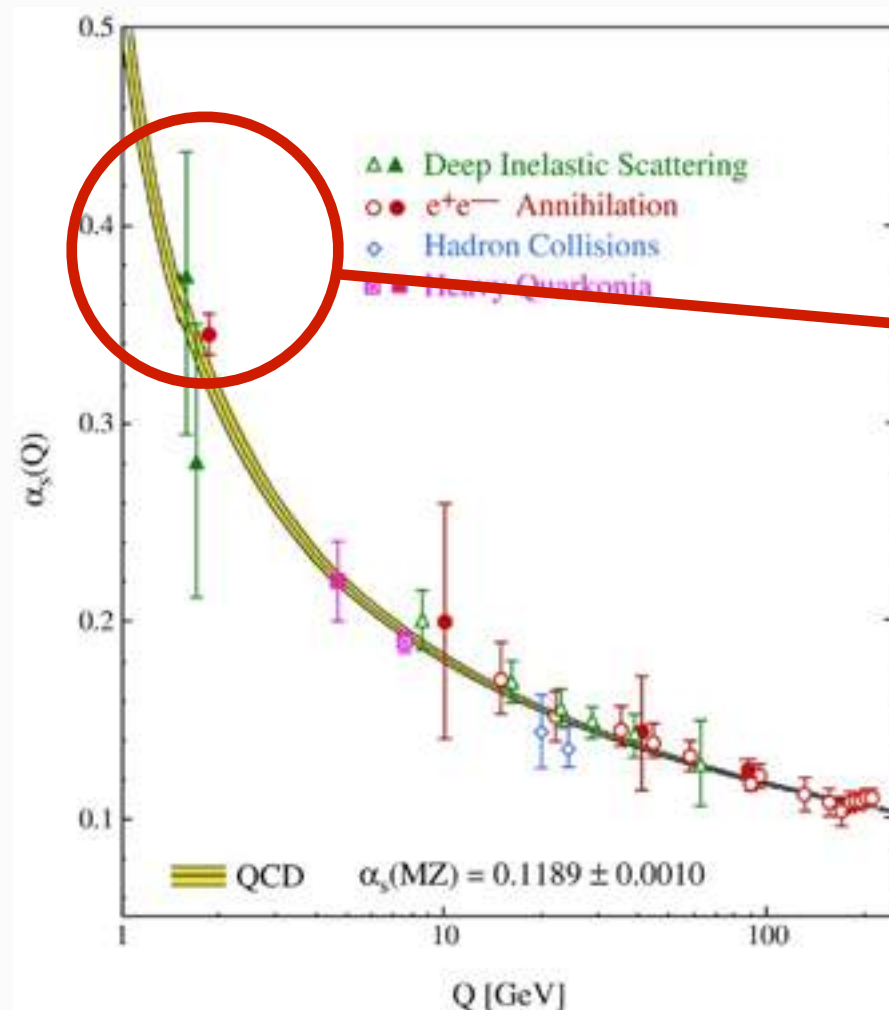
Un electrón de alta energía “ve” los quarks como partículas casi libres, constituyentes del protón (“partones”).

Física de interacción fuerte a largas distancias

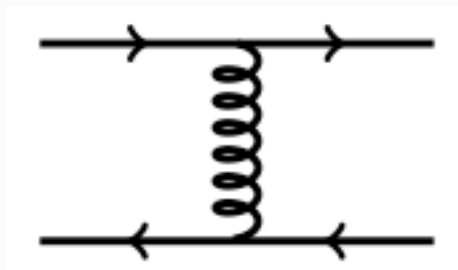


Los diagramas de Feynman (“teoría de perturbaciones”) son inútiles.

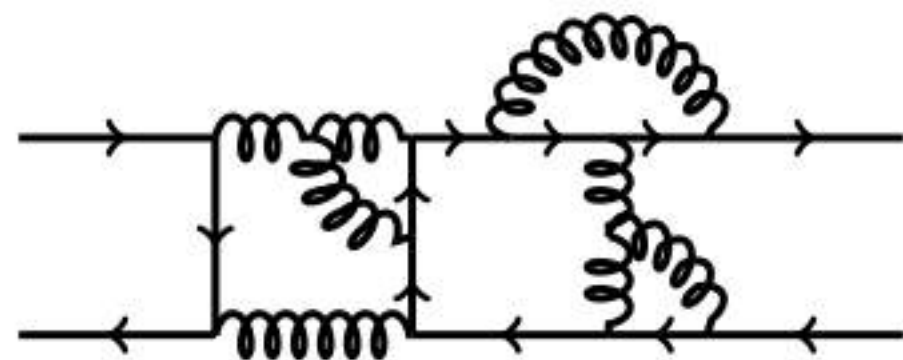
Física de interacción fuerte a largas distancias



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



α_s



α_s^6

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

Física de interacción fuerte a largas distancias

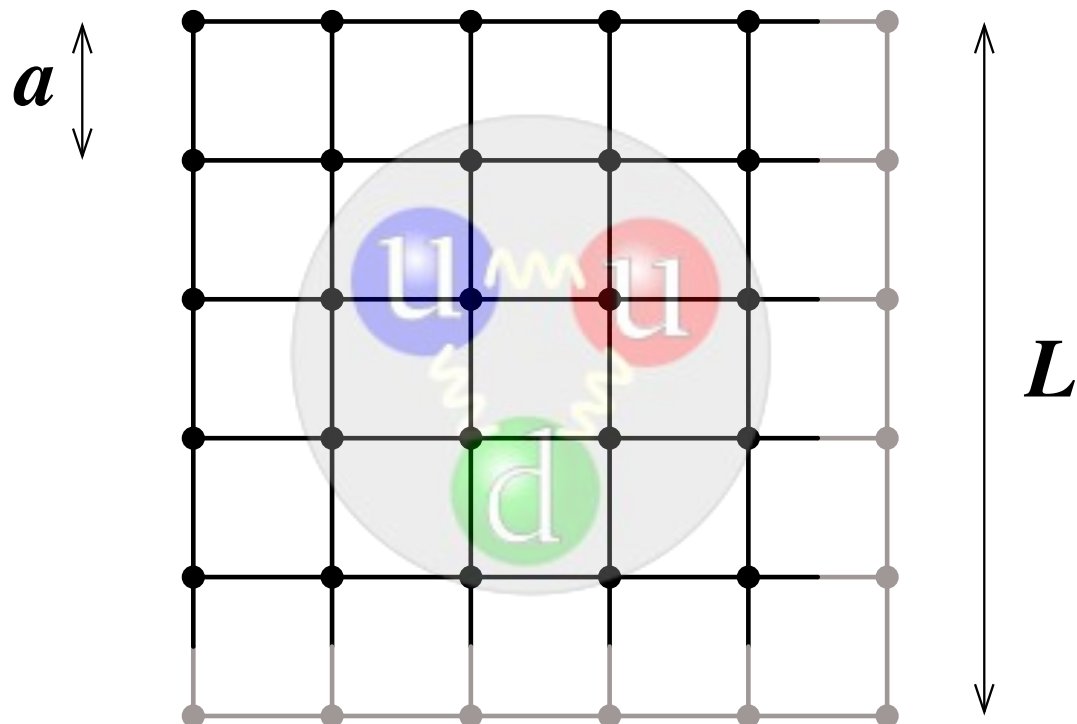
Estudiar las propiedades de los hadrones (protones, neutrones, ...) requiere una formulación nueva de la teoría cuántica de campos, capaz de afrontar el régimen de “acoplamiento fuerte”.

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



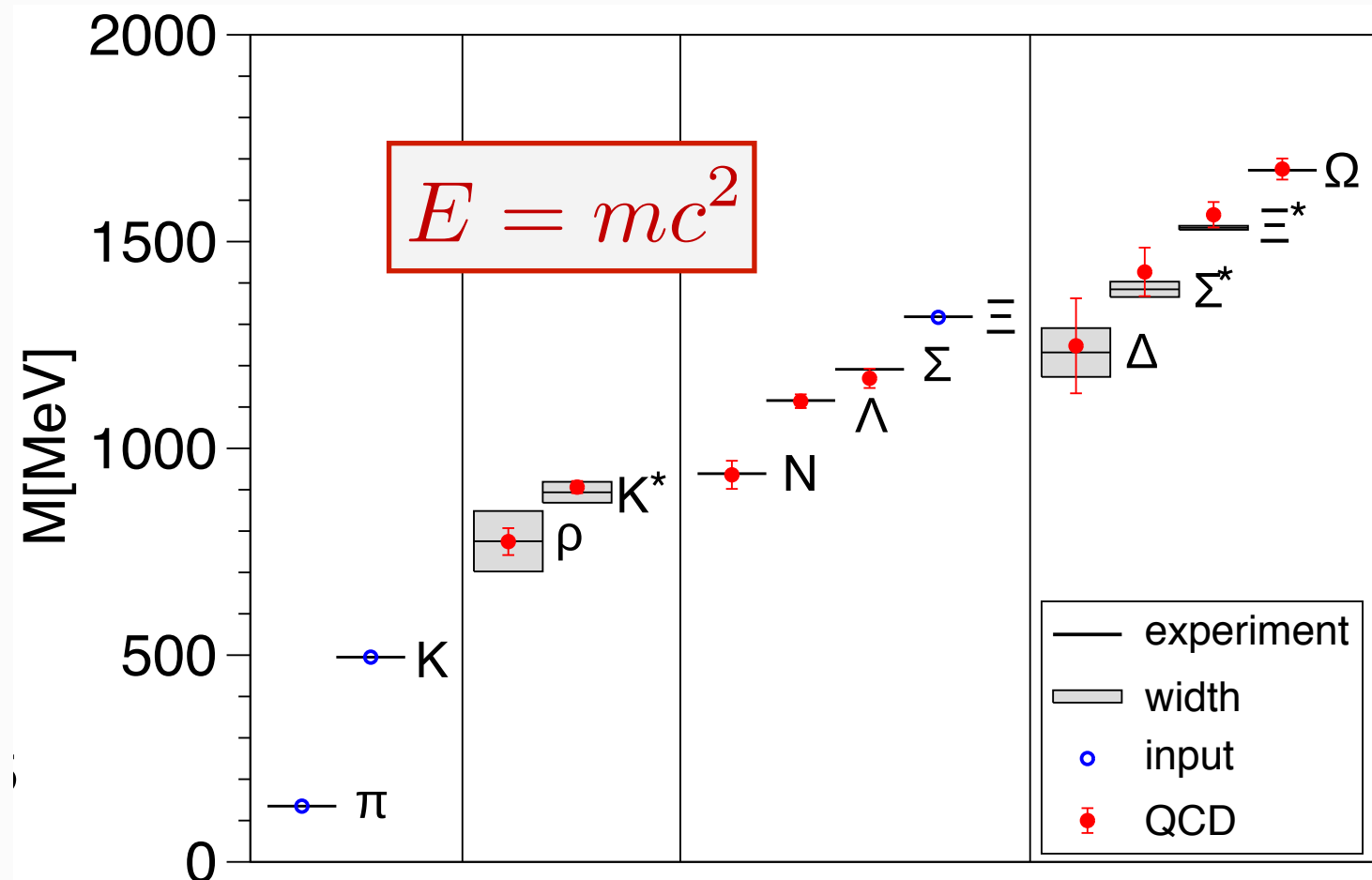
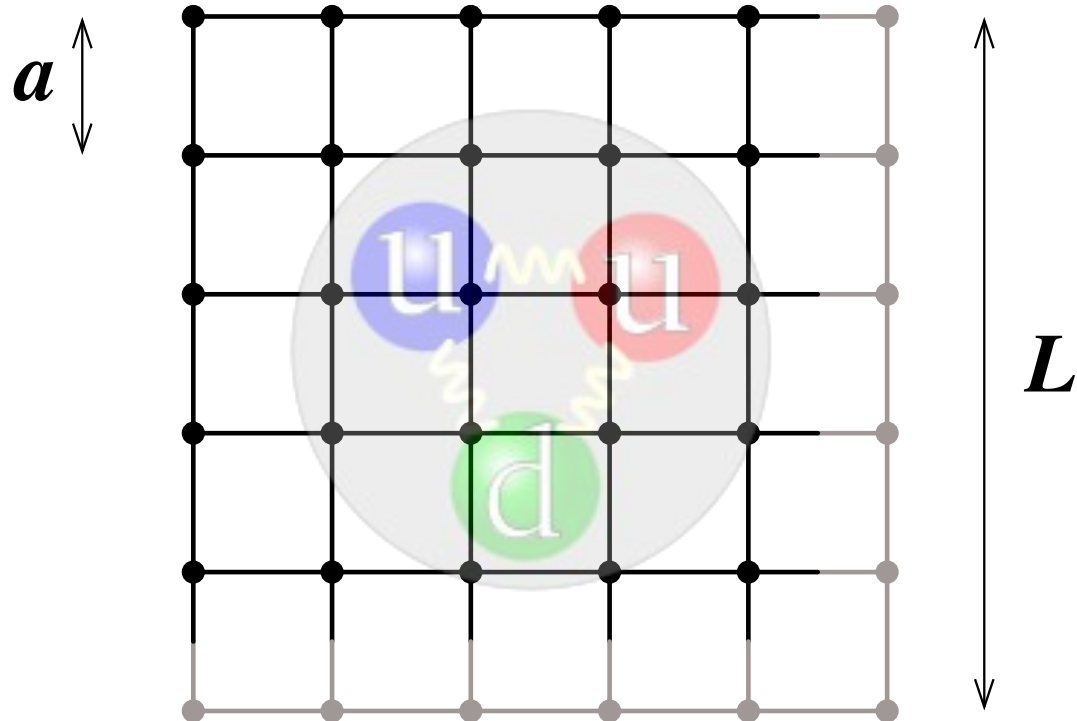
Permite resolver el problema mediante el uso de superordenadores.

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

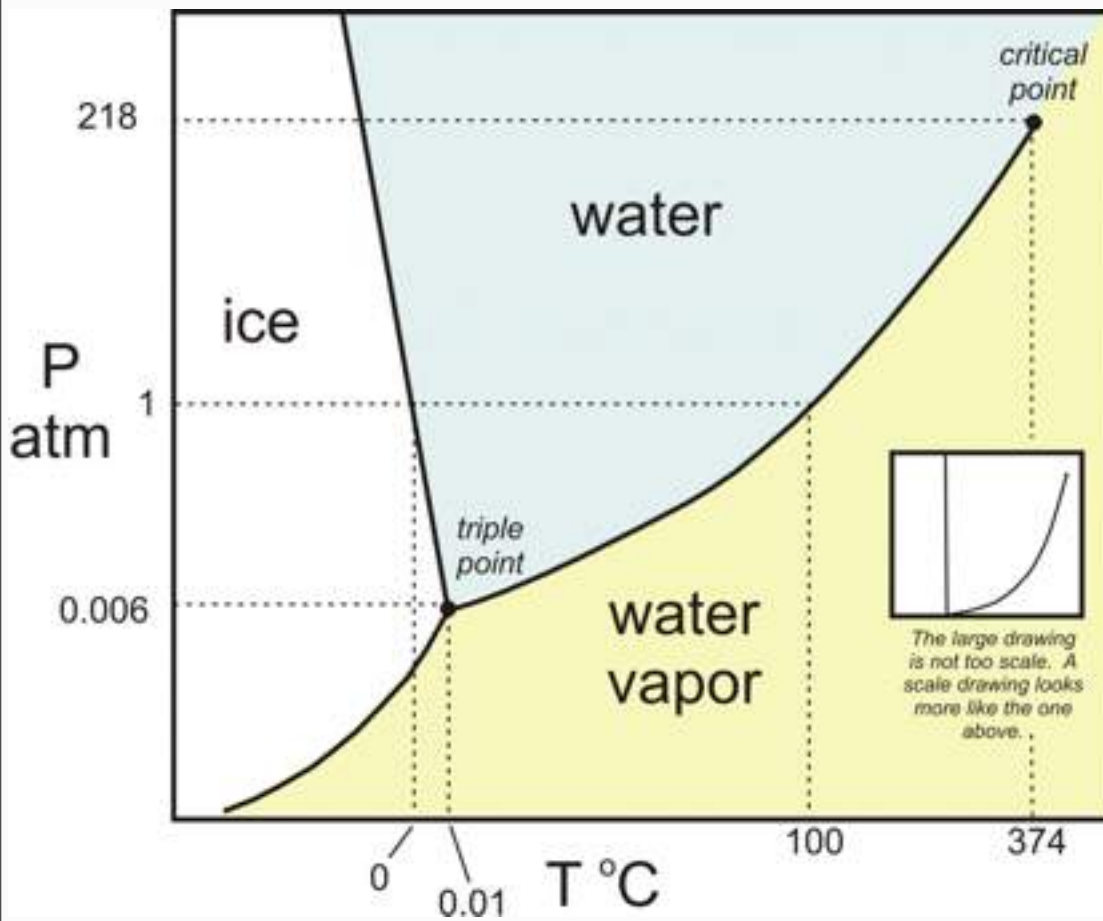


Diagrama de fases del agua

El diagrama de fases de la interacción fuerte

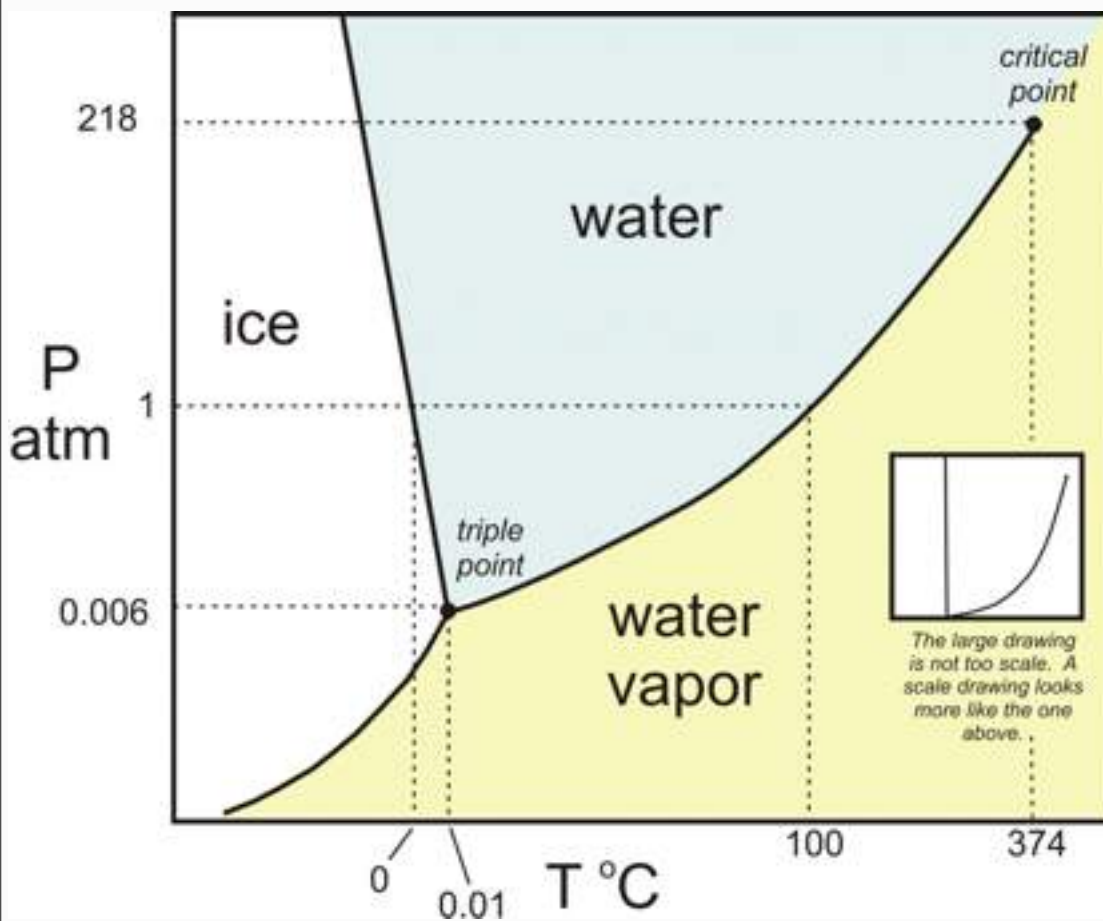


Diagrama de fases del agua

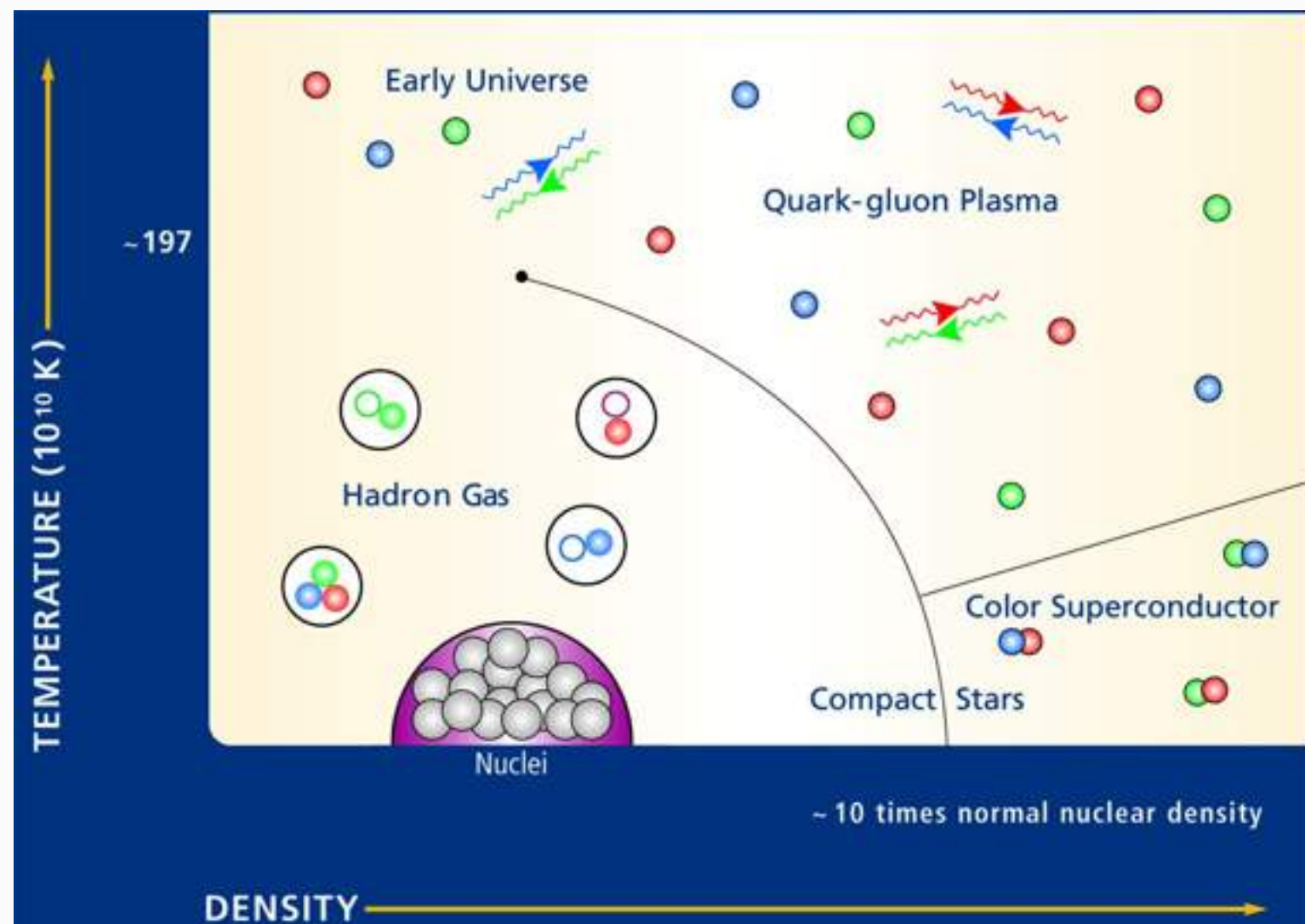


Diagrama de fases de la interacción fuerte

El diagrama de fases de la interacción fuerte

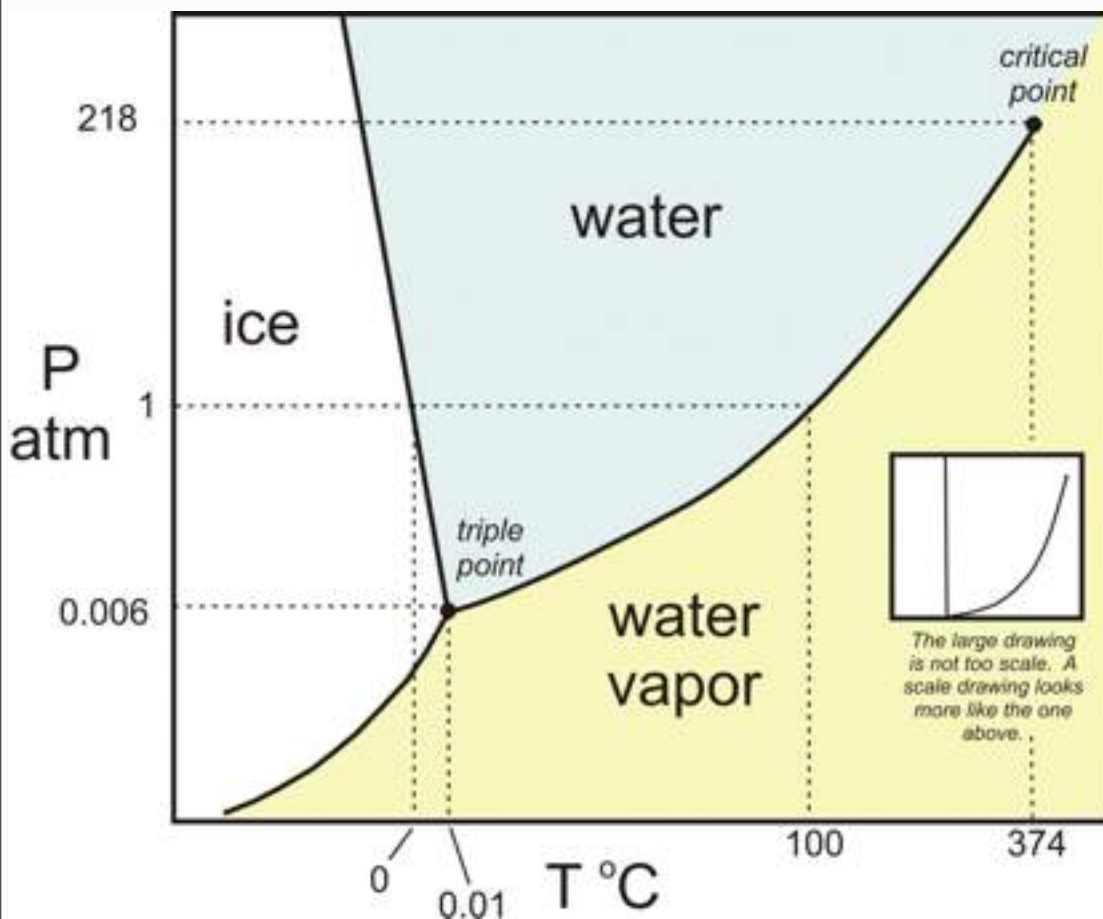


Diagrama de fases del agua

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

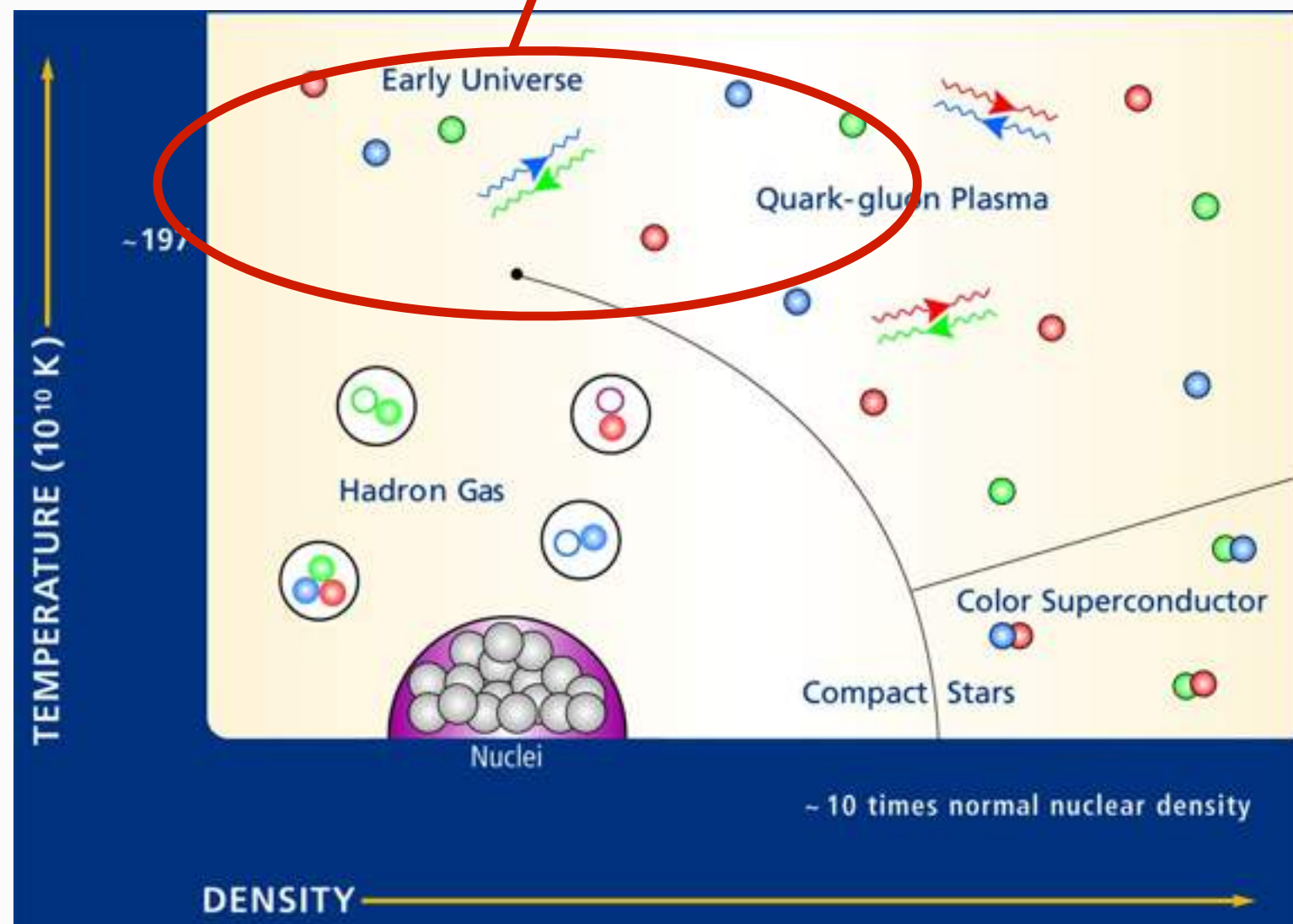


Diagrama de fases de la interacción fuerte

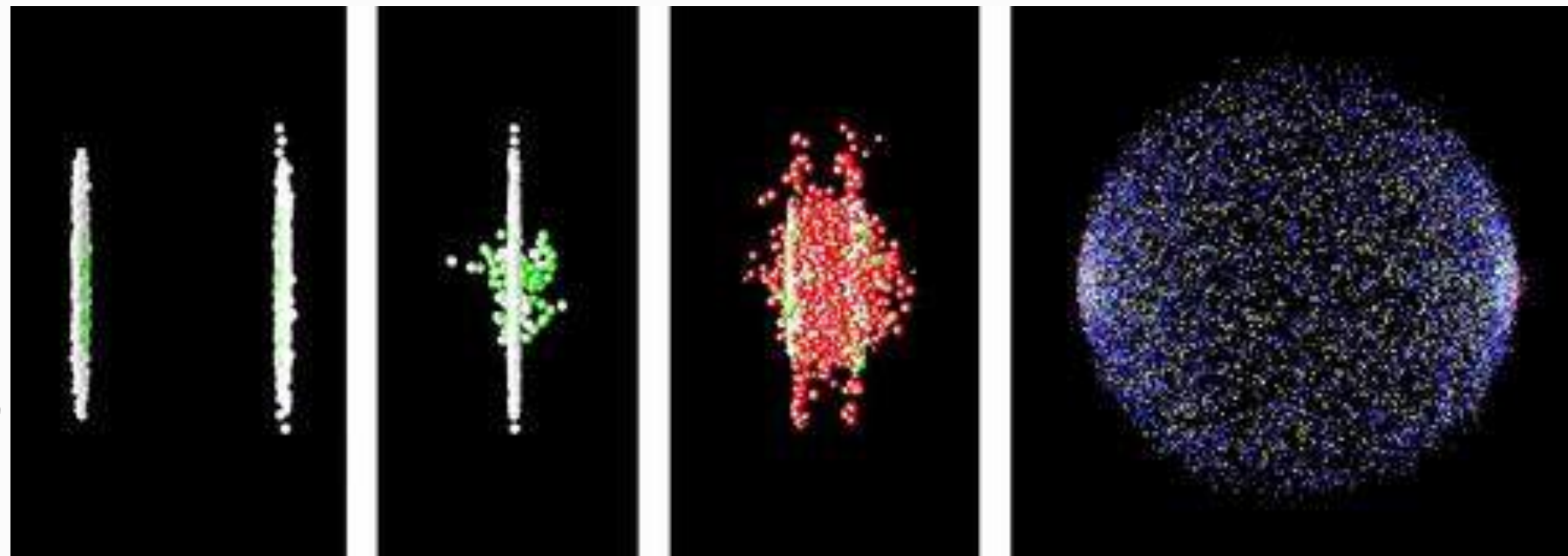
Buscando el plasma de quarks y gluones



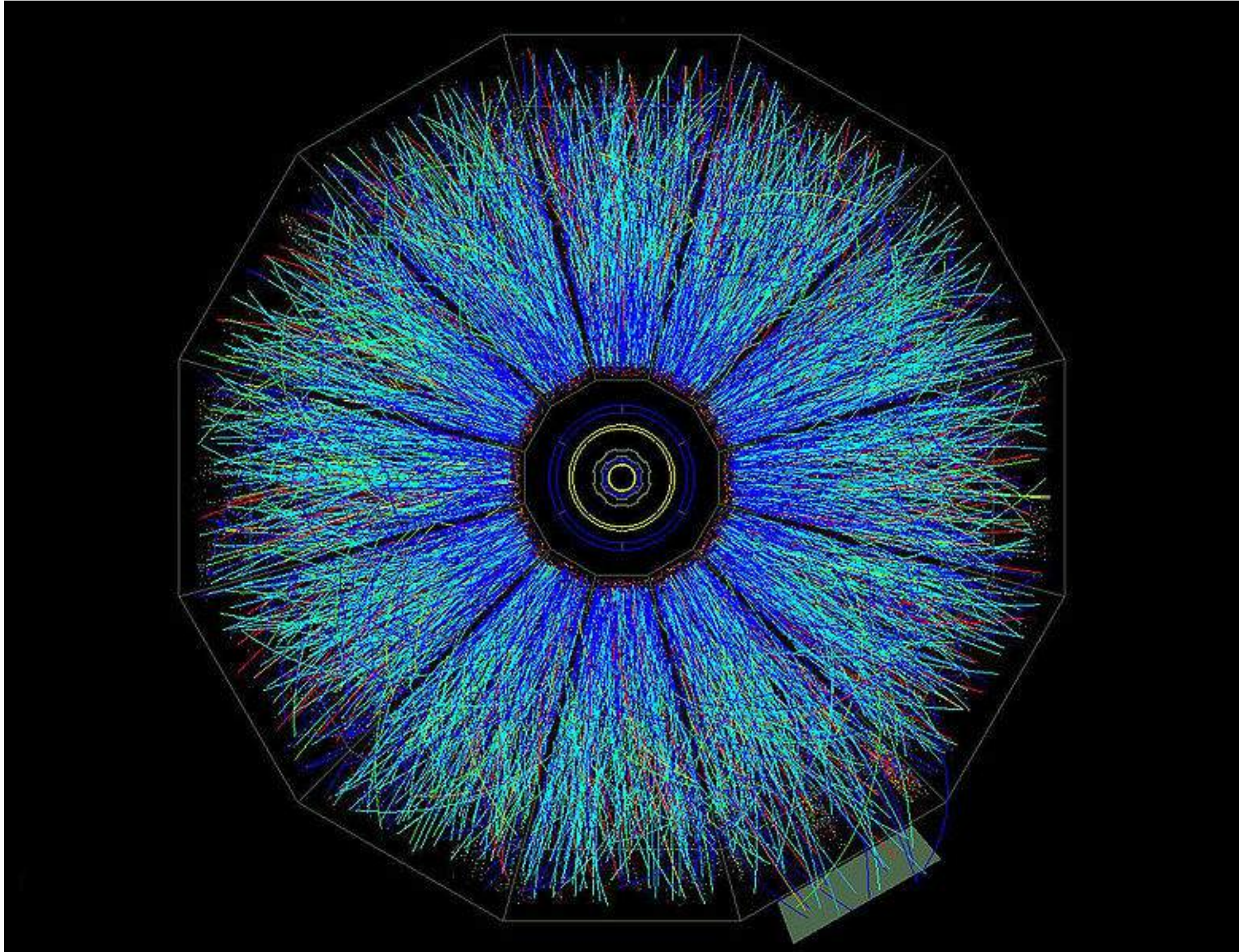
Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC).
Brookhaven, New York.

Colisiona núcleos de oro

(79 protones, 118 neutrones)



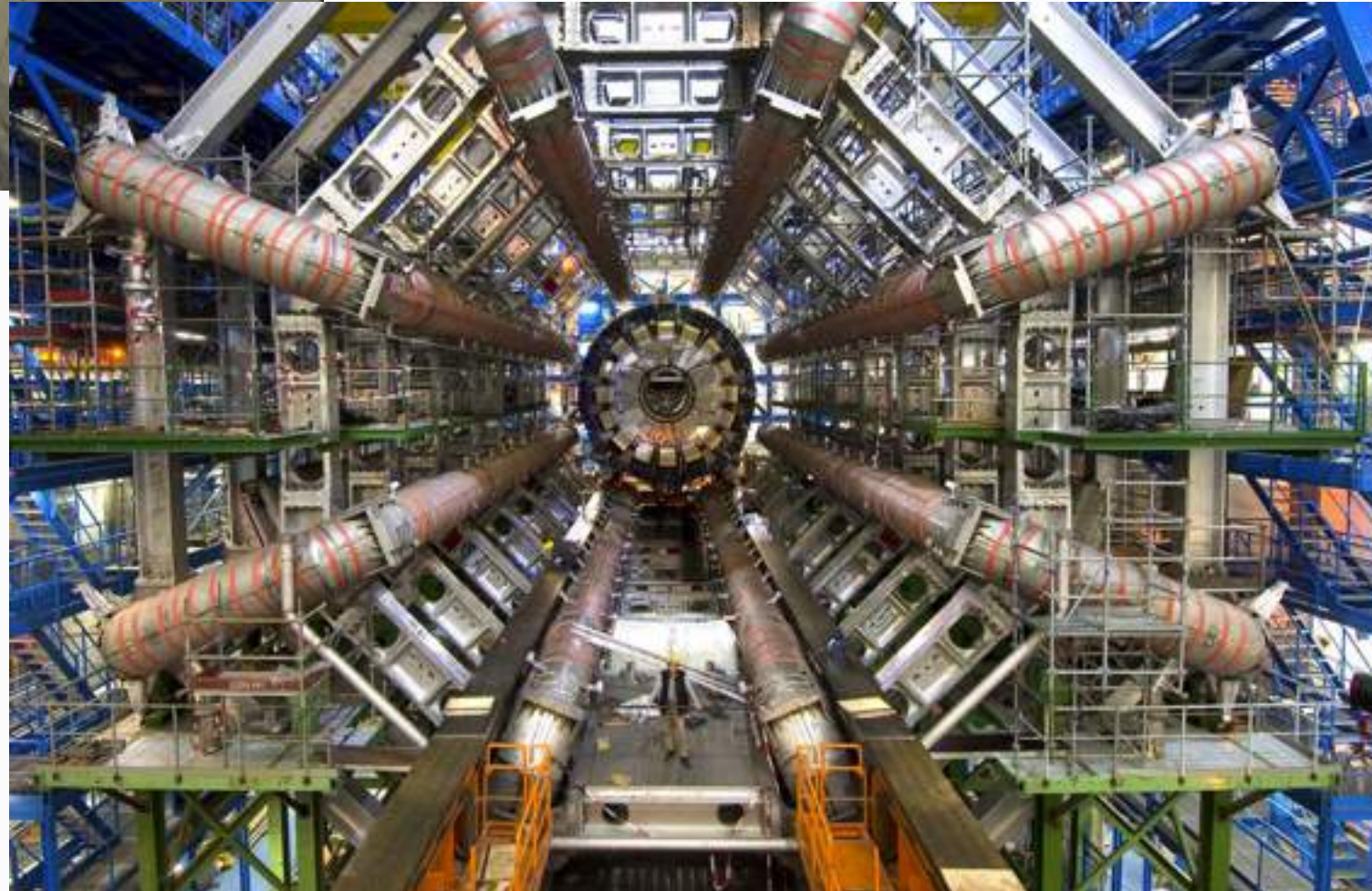
Buscando el plasma de quarks y gluones



La interacción fuerte en LHC

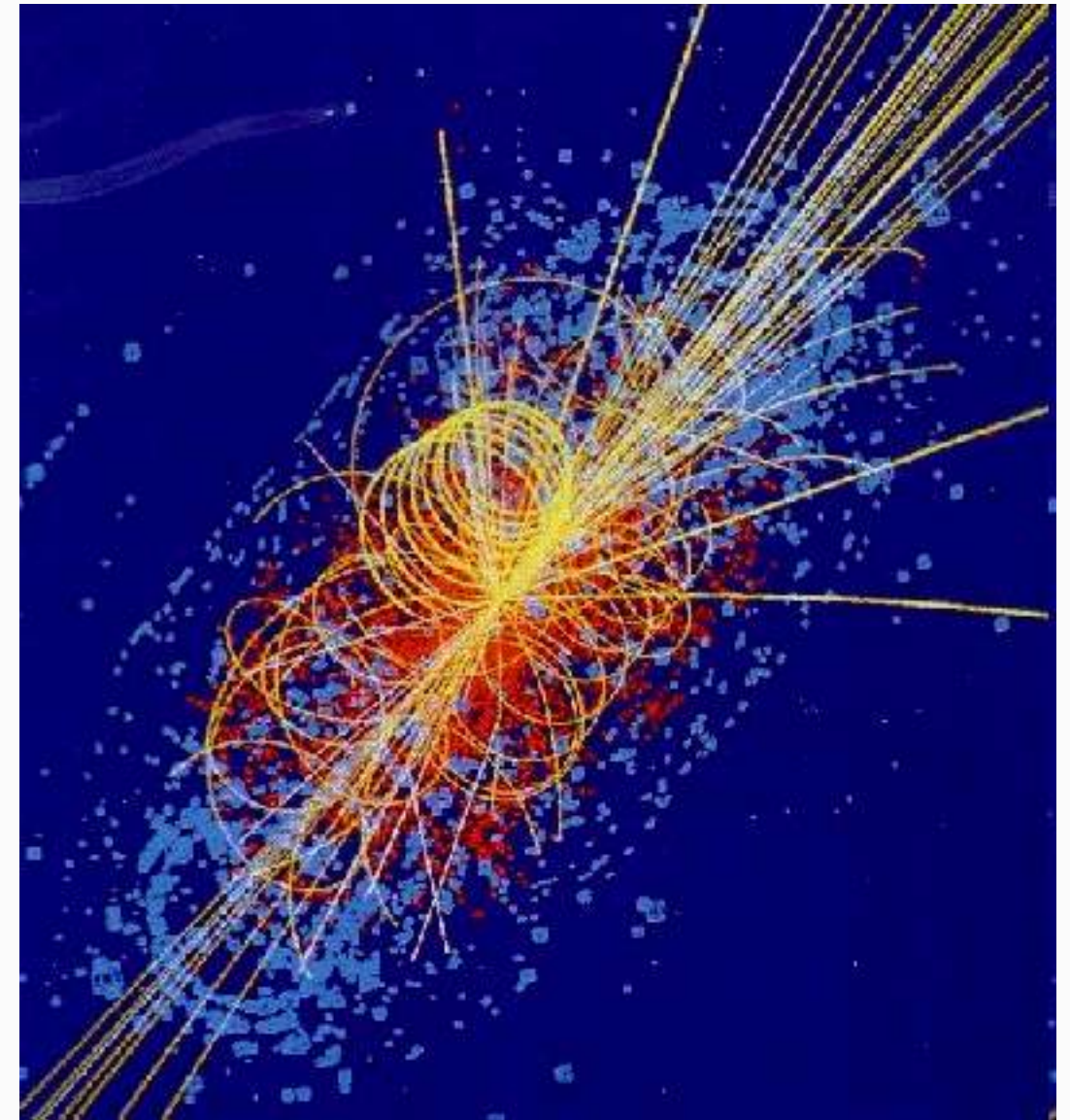
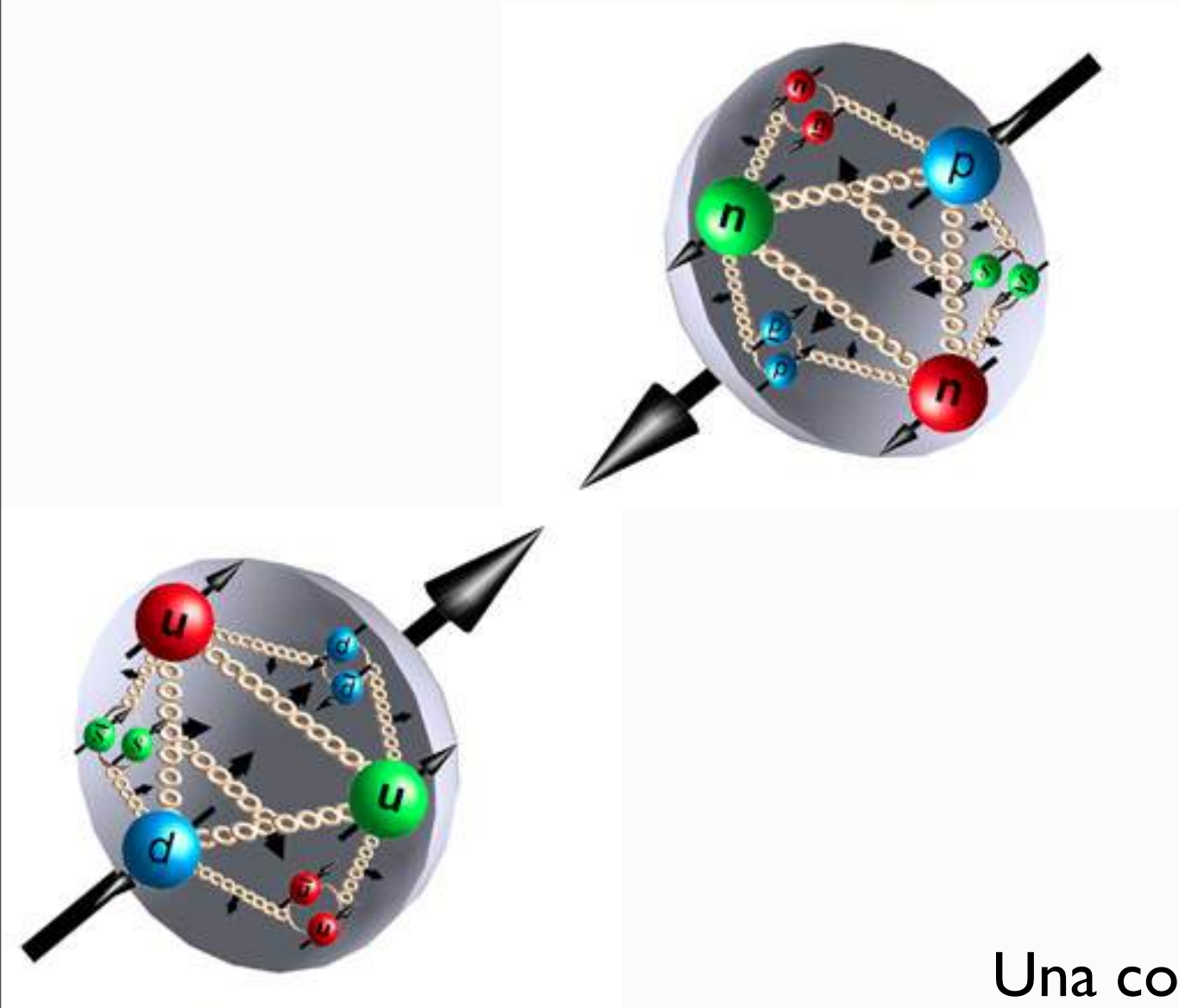


La interacción fuerte en LHC



La interacción fuerte en LHC

LHC acelera protones a altísimas energías

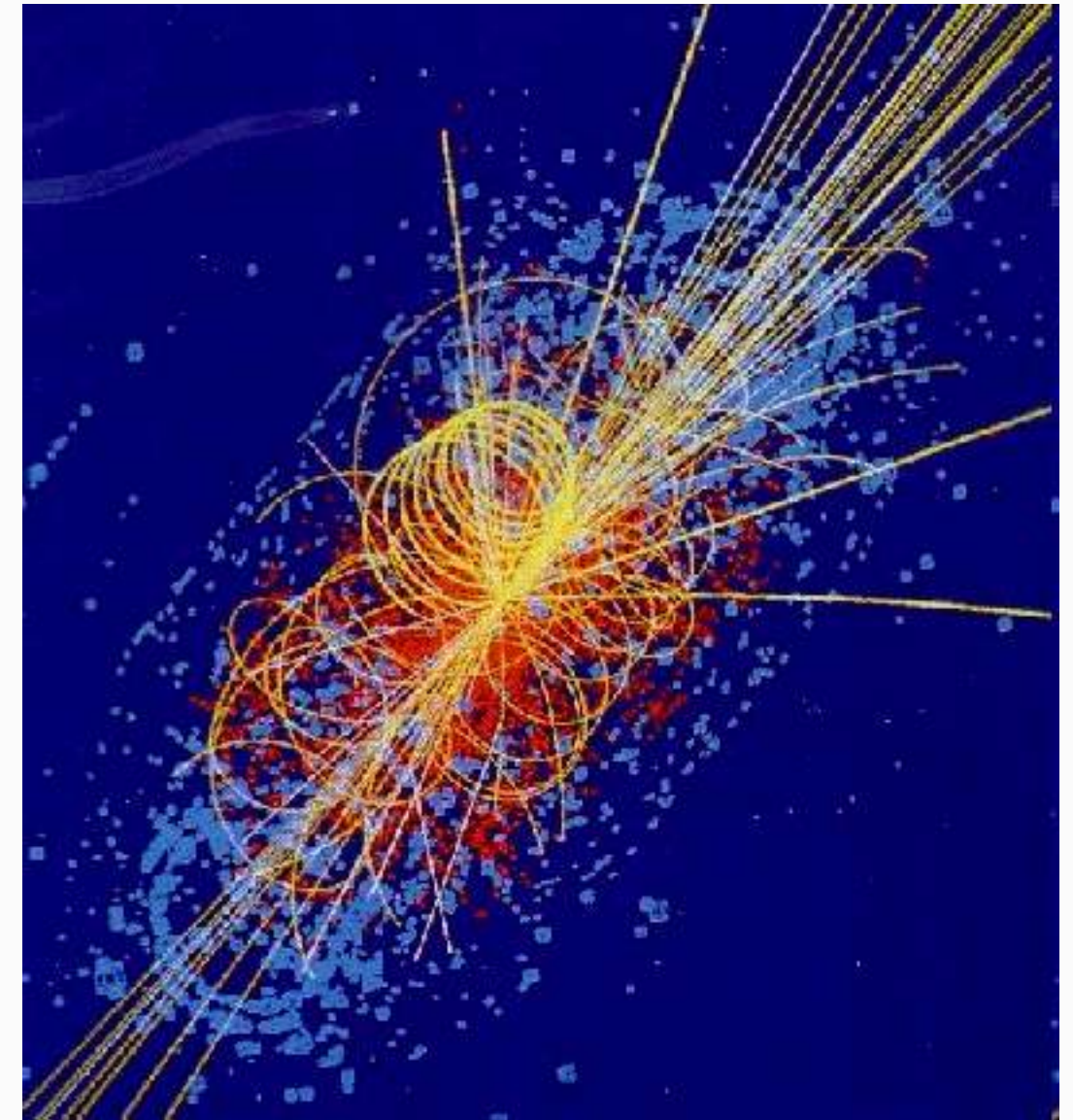
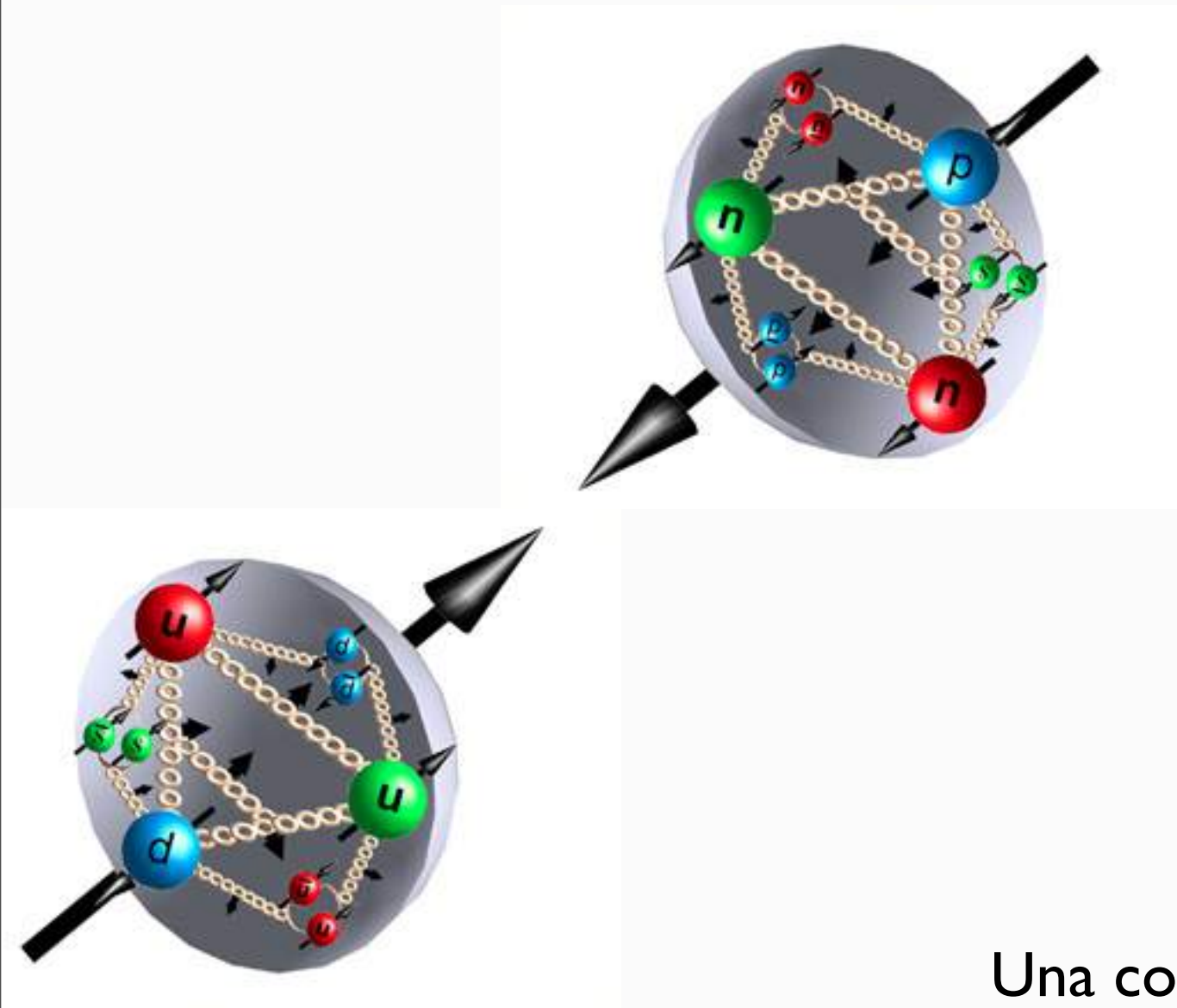


Una colisión típica produce cientos de partículas.

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.

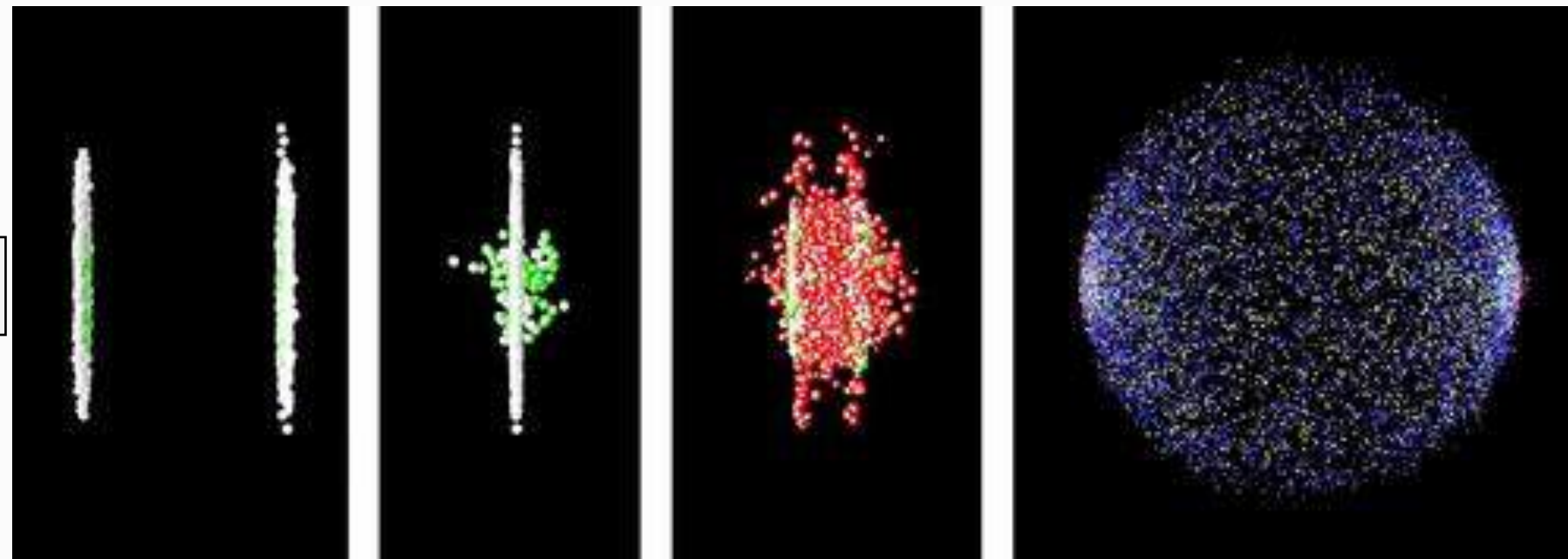
La interacción fuerte es la que domina estas colisiones. Es esencial controlar sus efectos con suficiente precisión para desentrañar la física que desconocemos.

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.

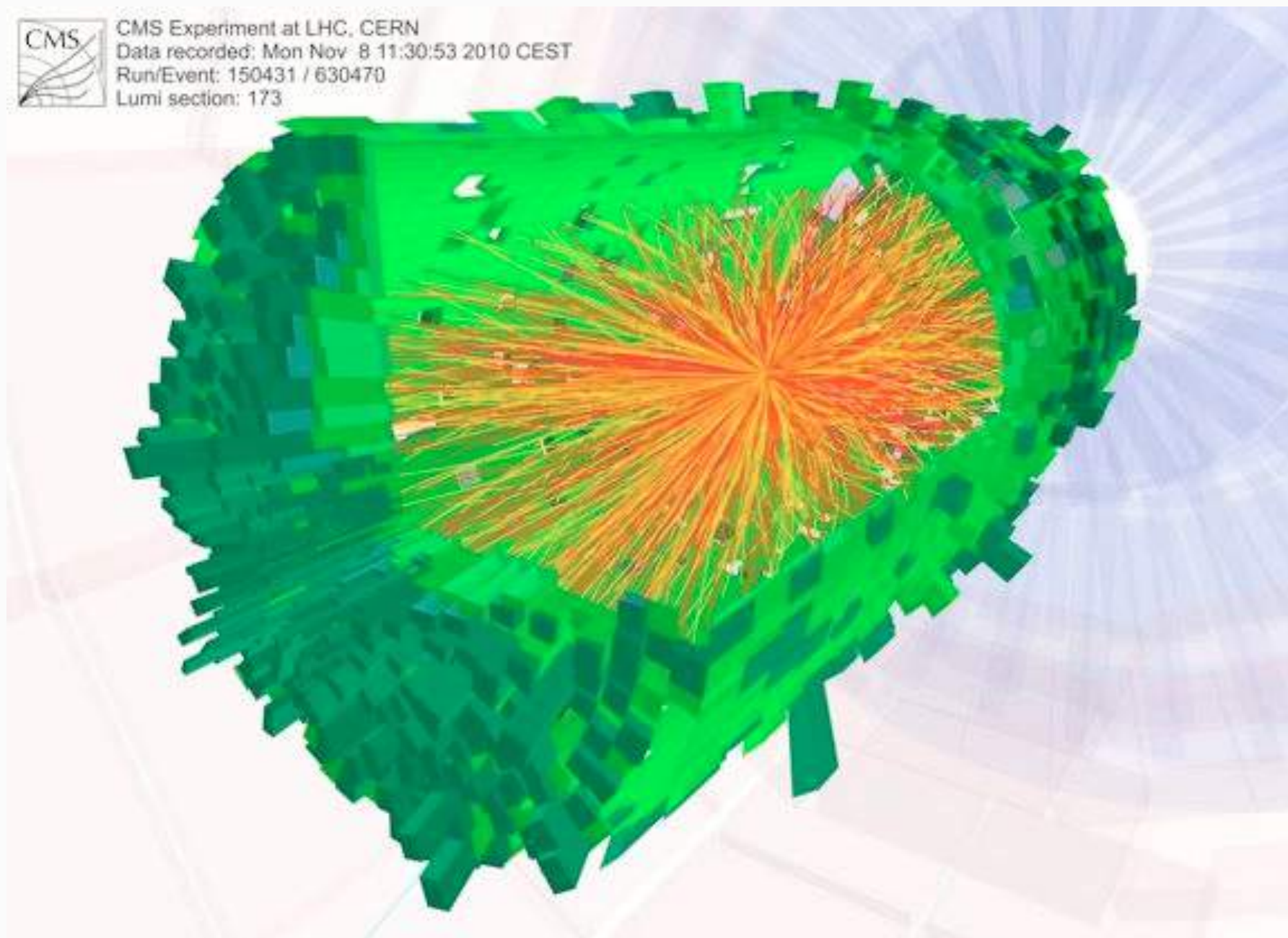
Colisiona núcleos de plomo

(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

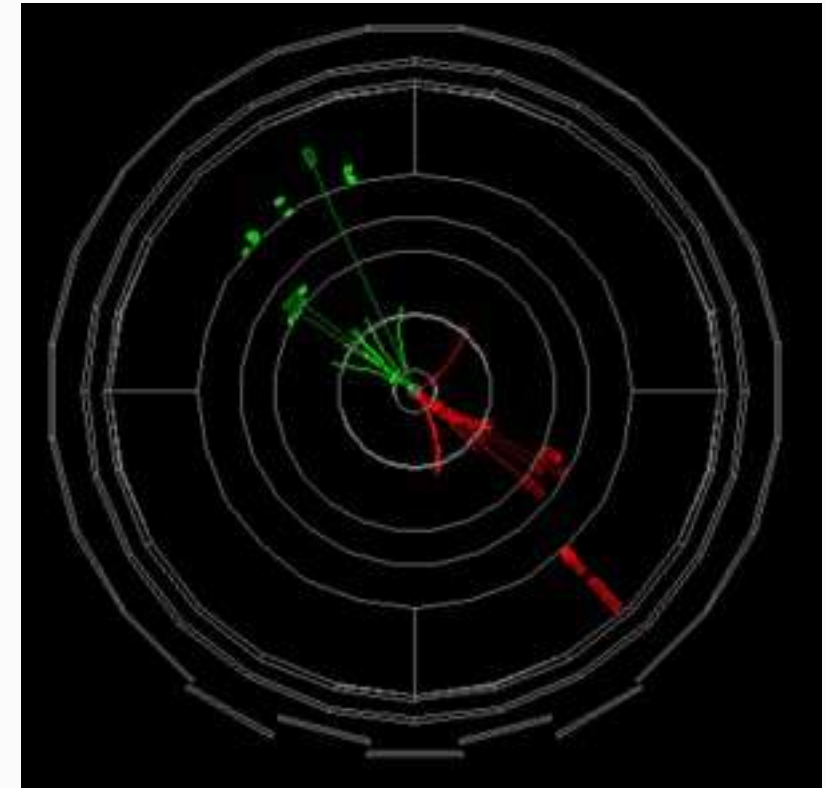
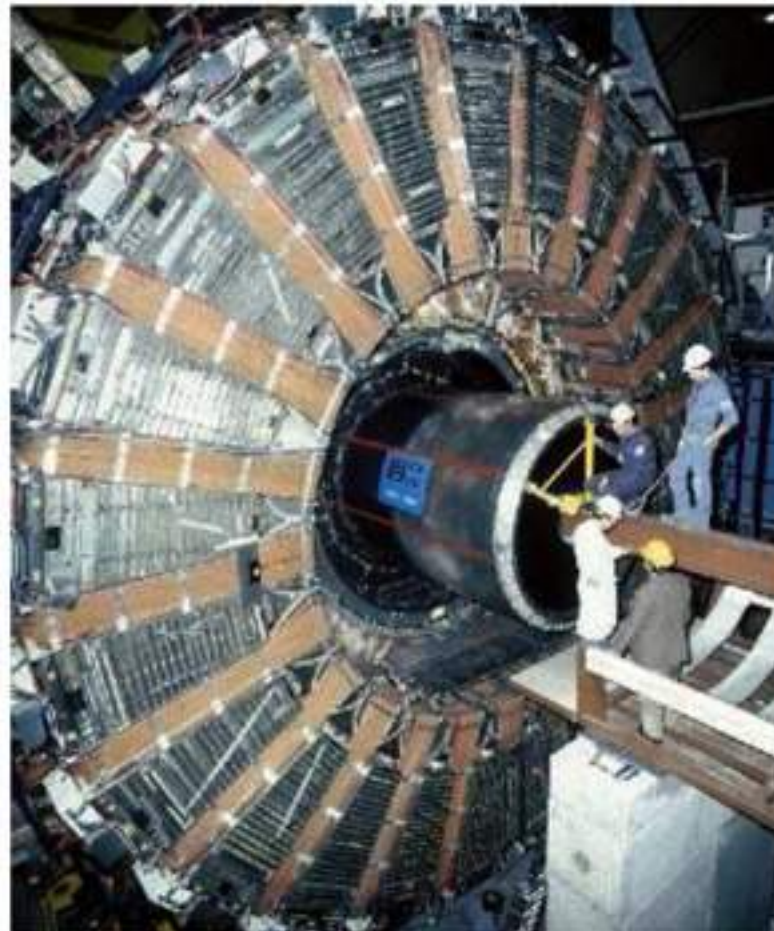


Acelerador

acelera partículas subatómicas a velocidades comparables a c

Detectores

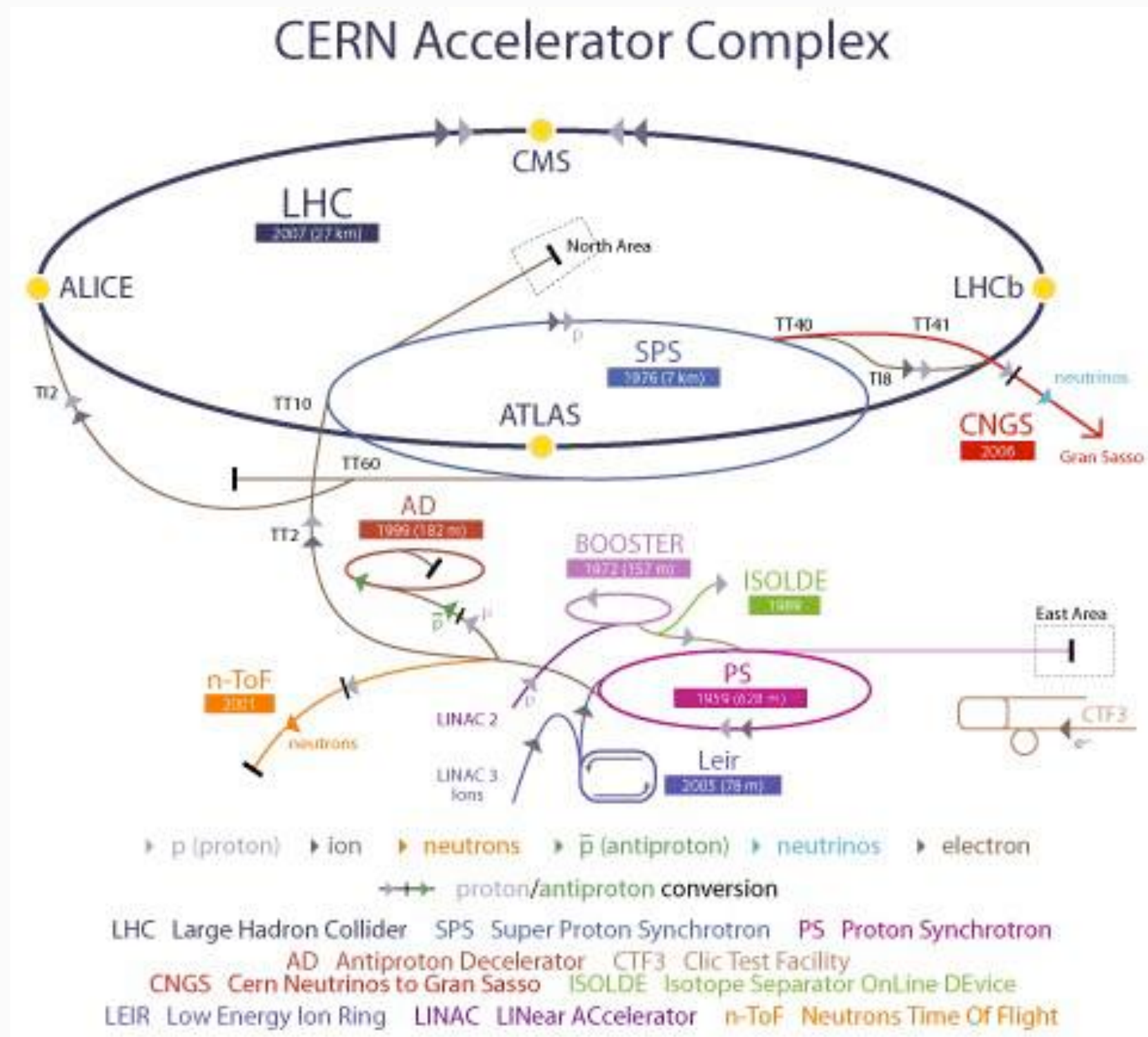
registra los productos de las colisiones en puntos concretos del acelerador



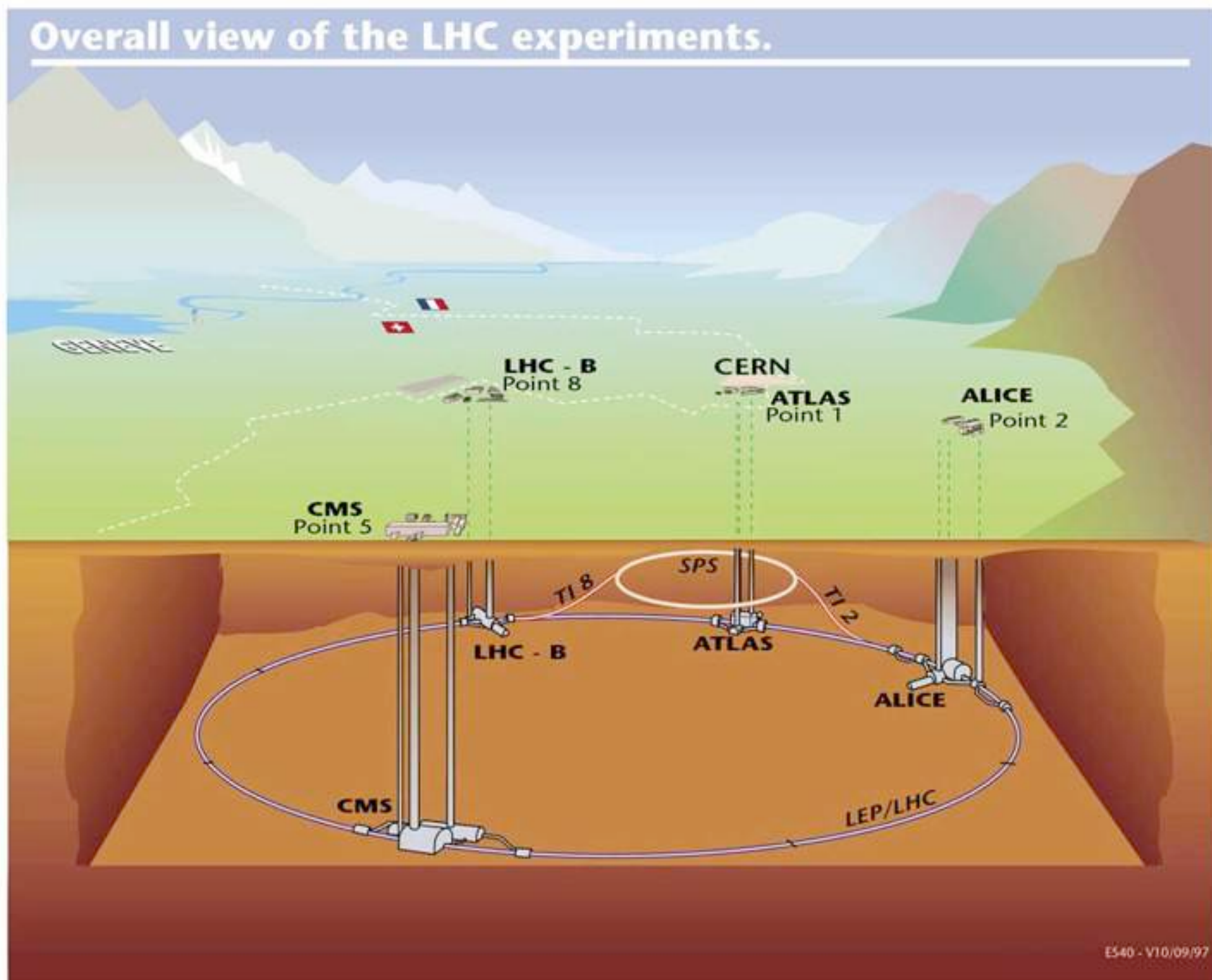
Análisis

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

LHC



LHC

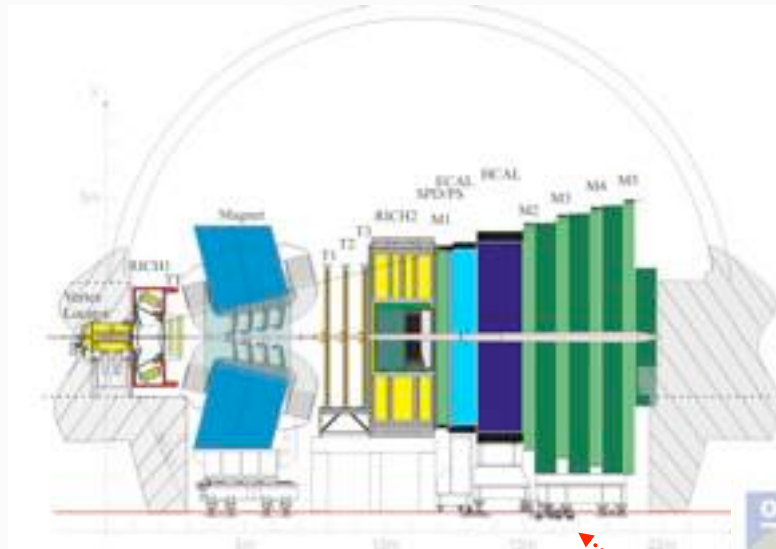


LHC

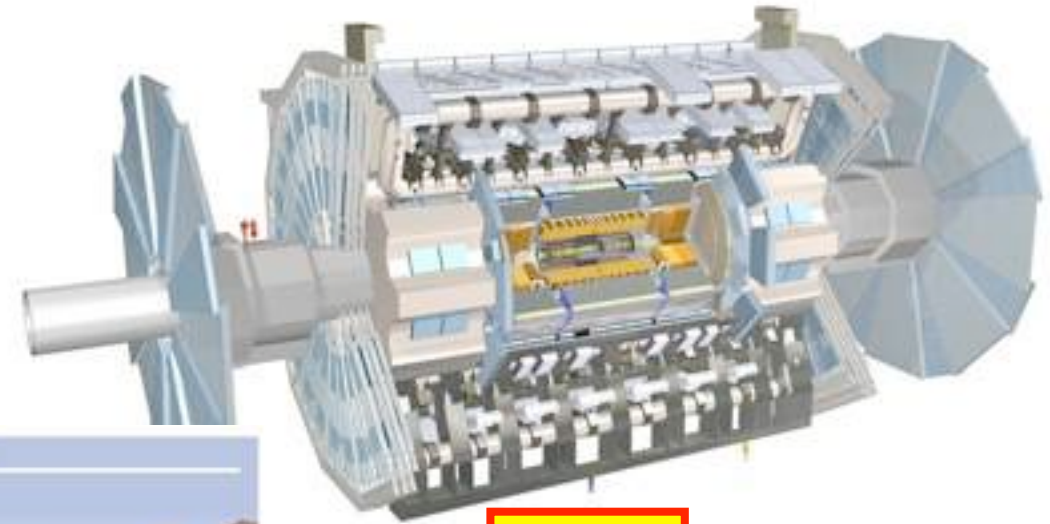
Quantity	number
Circunferencia	26 659 m
Temperatura de los dipolos	1.9 K (-271.3°C)
Número de imanes	9593
Nº de dipolos principales	1232
Nº de cuadrupolos principales	392
Nº de cavidades de radiofrecuencia	8 per beam
Energía nominal (protones)	7 TeV
Energía nominal (iones)	2.76 TeV/u (*)
Intensidad campo 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	1.1×10^{11}
Nº de vueltas por segundo	11 245
Nº de colisiones por segundo	600 million

(*) Energía por nucleón

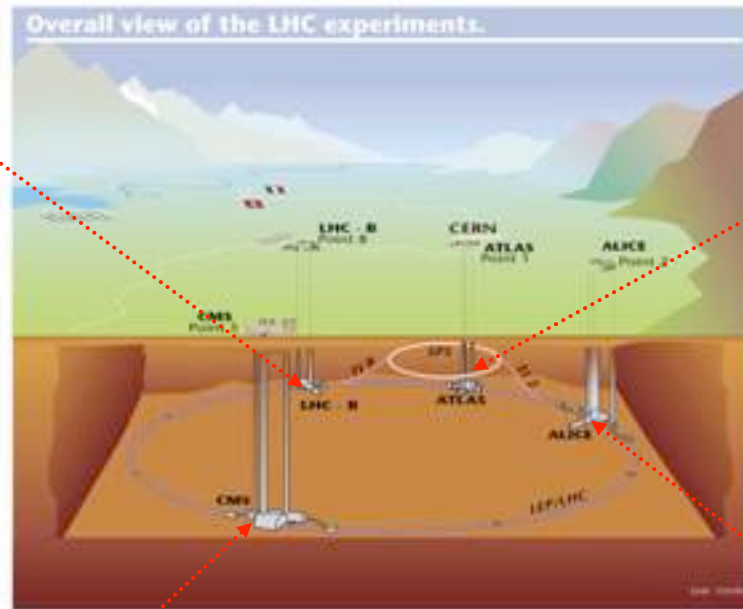
LHC



LHCb

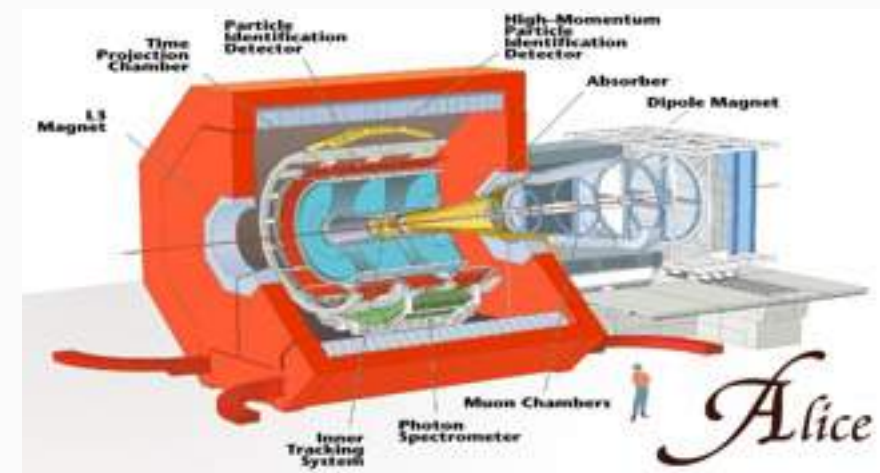
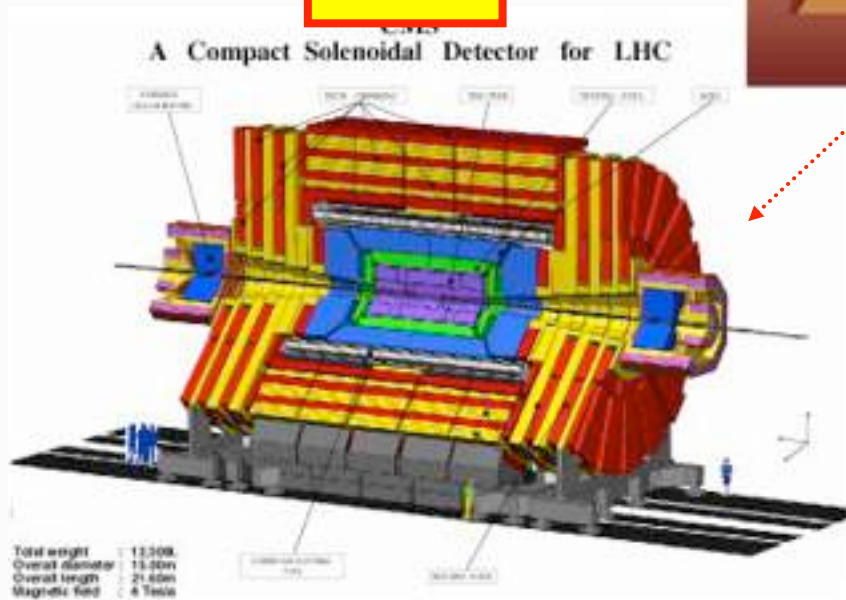


Atlas

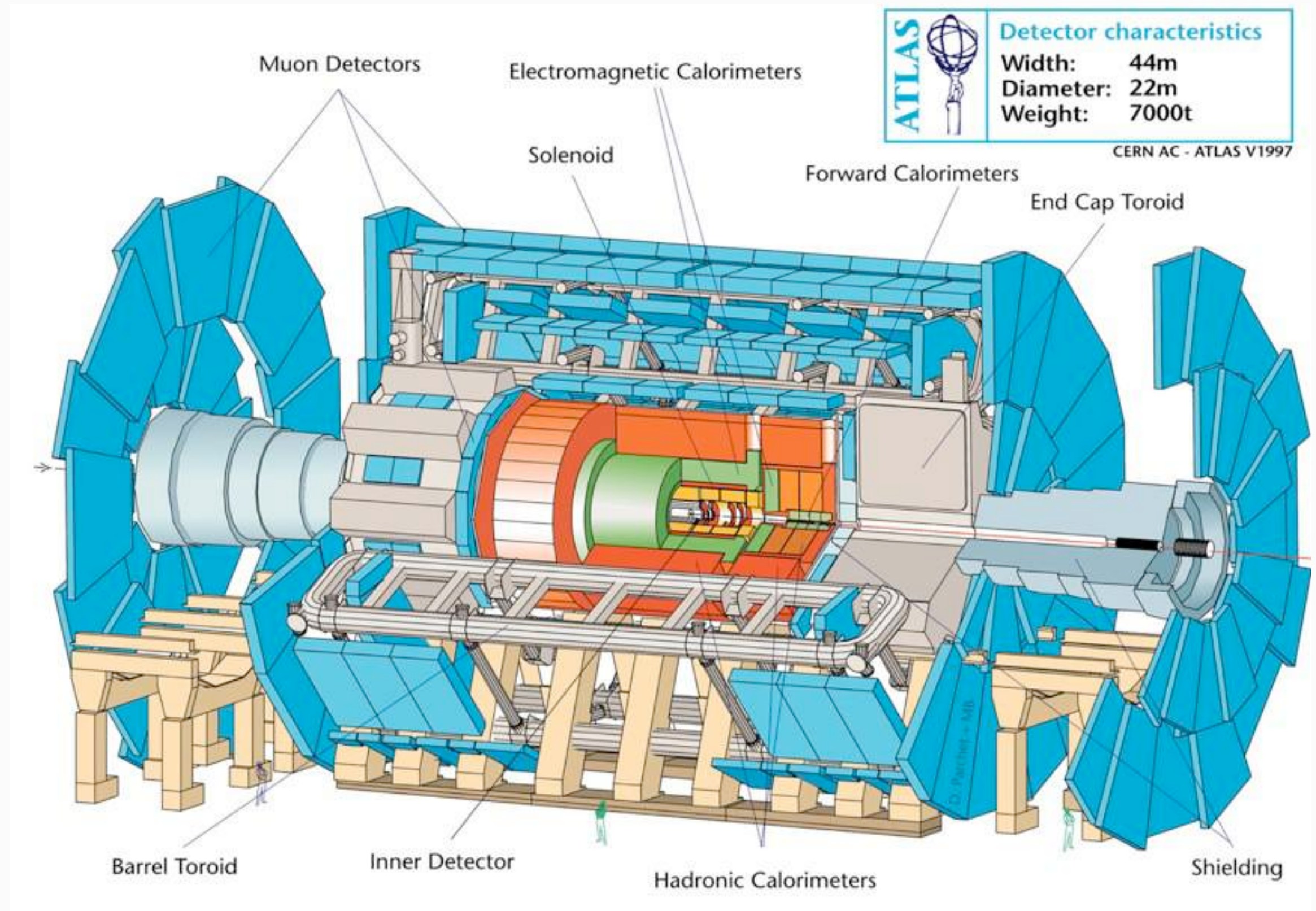


CMS

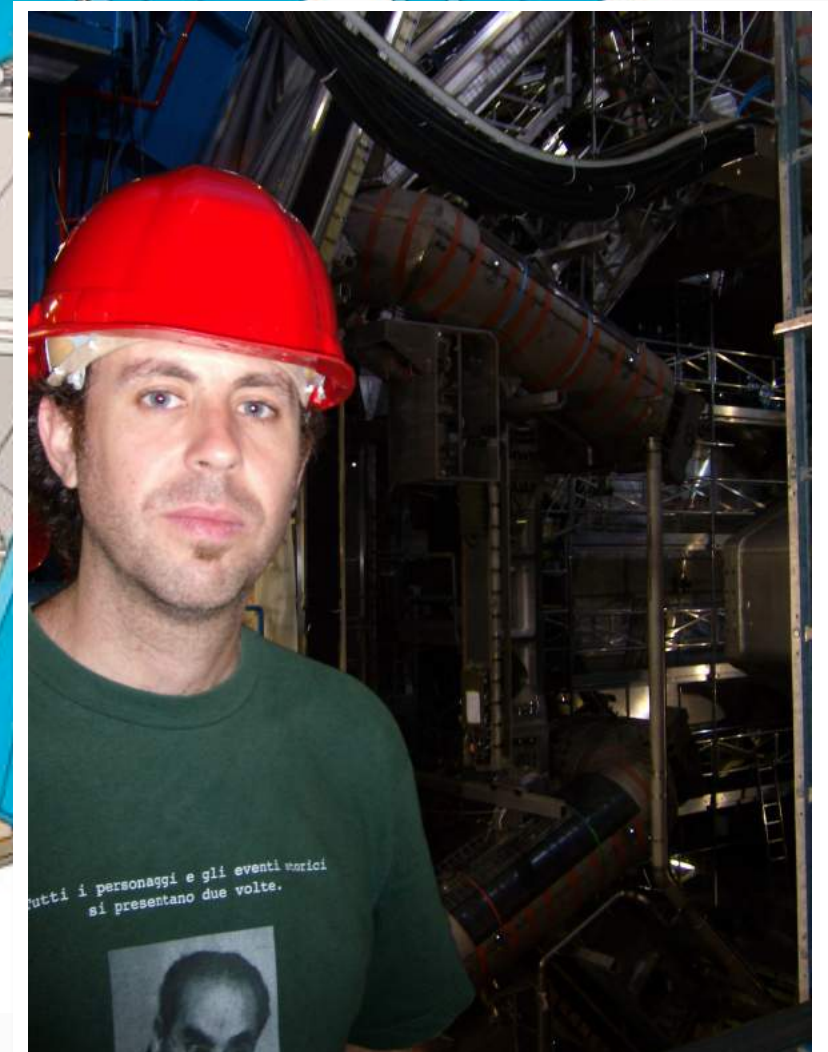
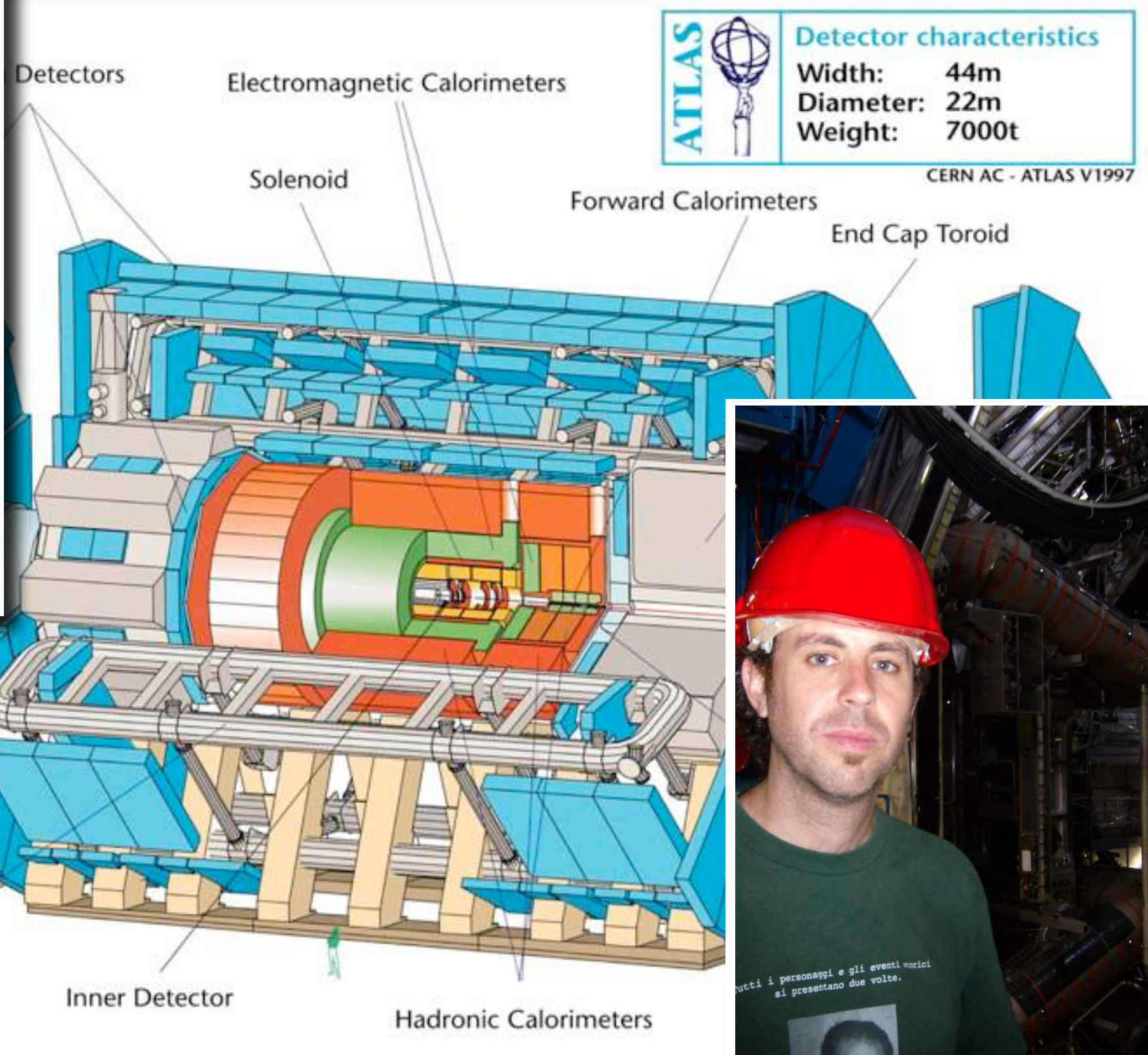
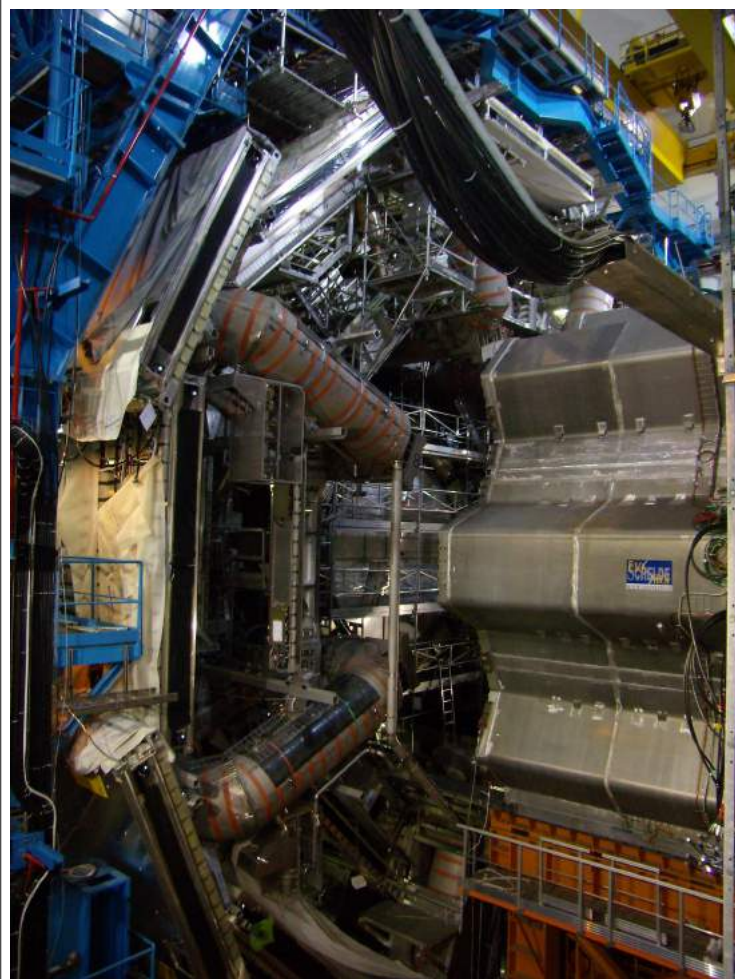
Alice



LHC

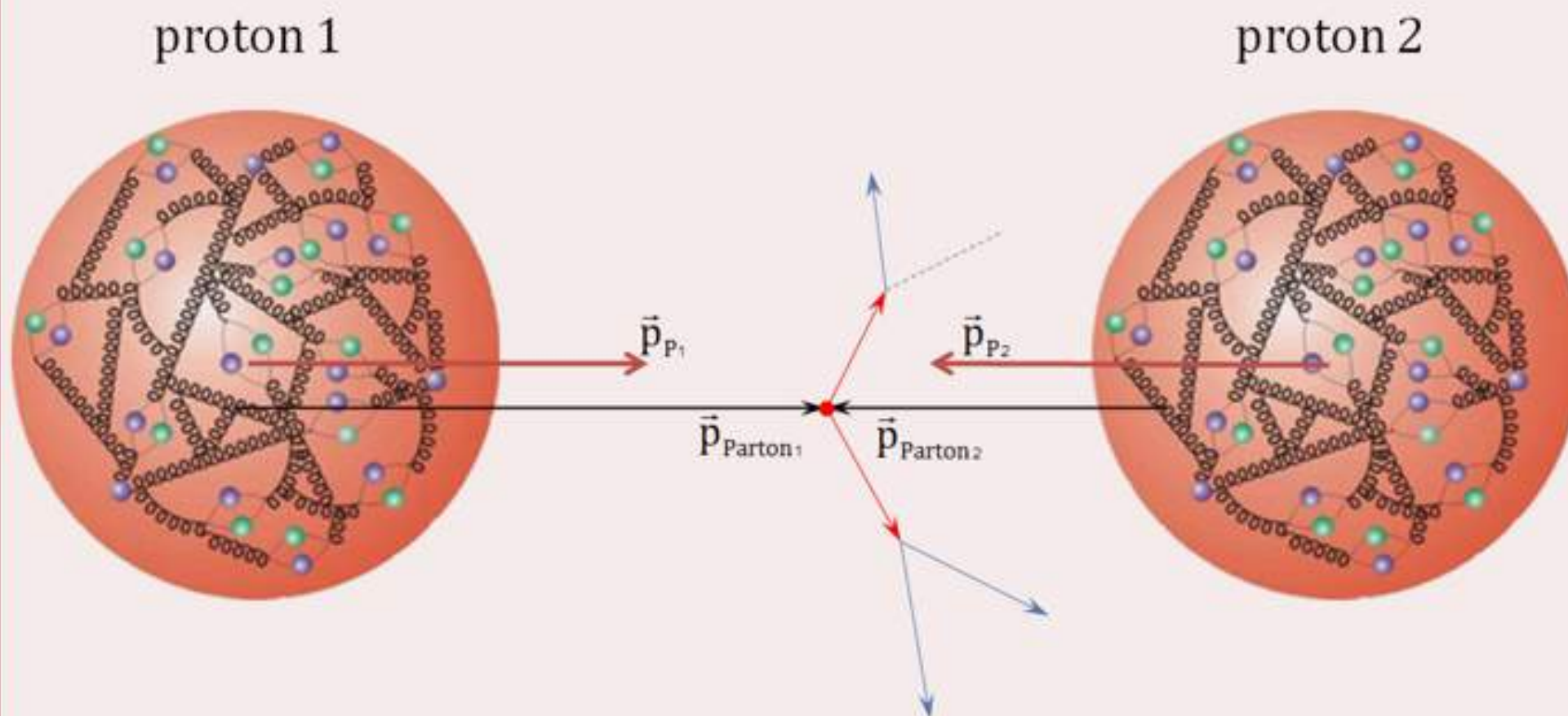


LHC



LHC

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



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

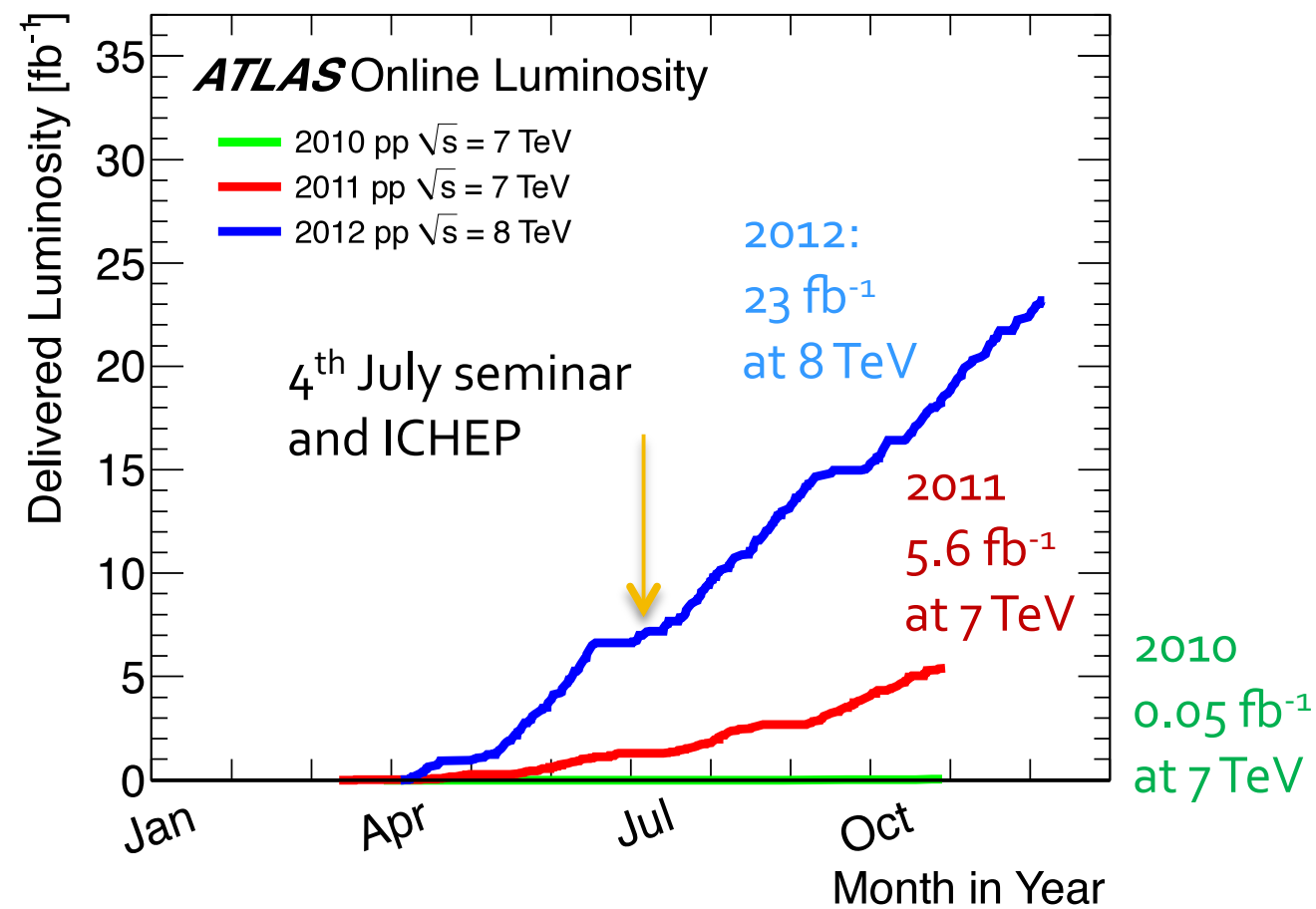
$\vec{p}_{P_2}$... momentum proton 2

• interaction vertex

$\vec{p}_{Parton1}$... momentum parton 1

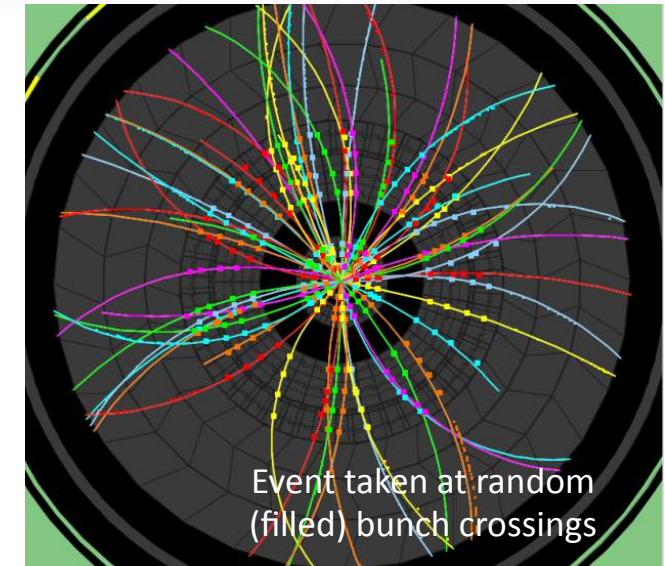
$\vec{p}_{Parton2}$... momentum parton 2

LHC



2010
 O(2) Pile-up events

150 ns inter-bunch spacing



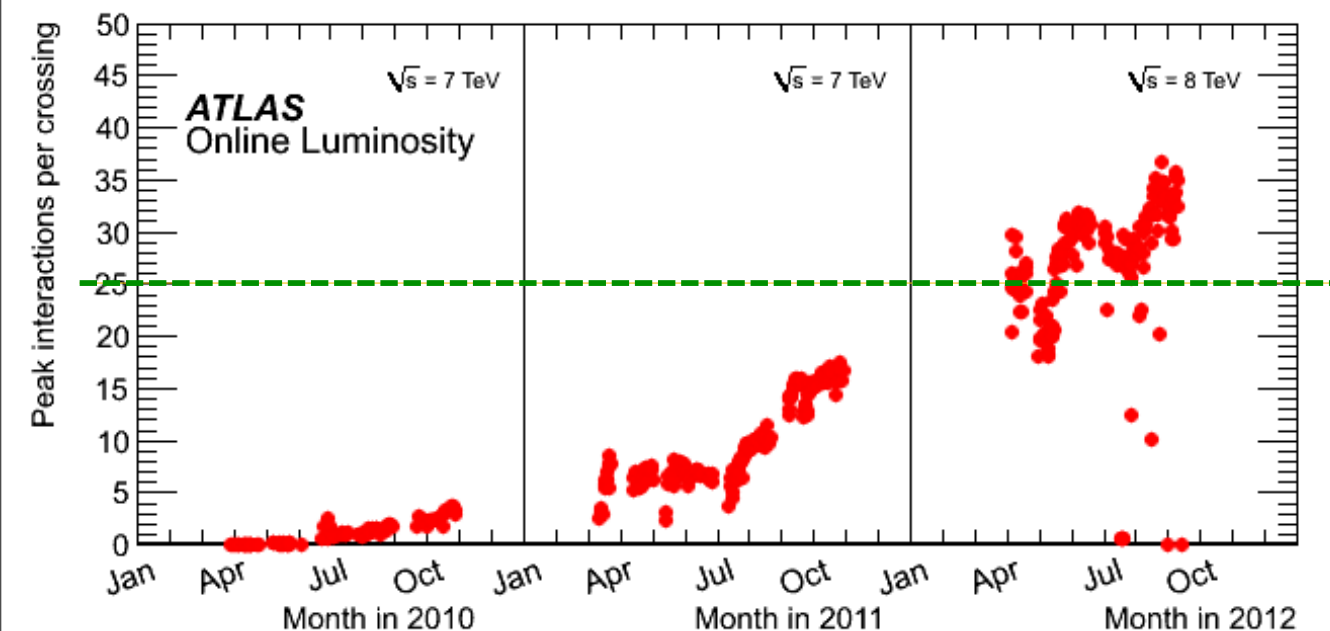
2011
 10) Pile-up events

50 ns inter-bunch spacing



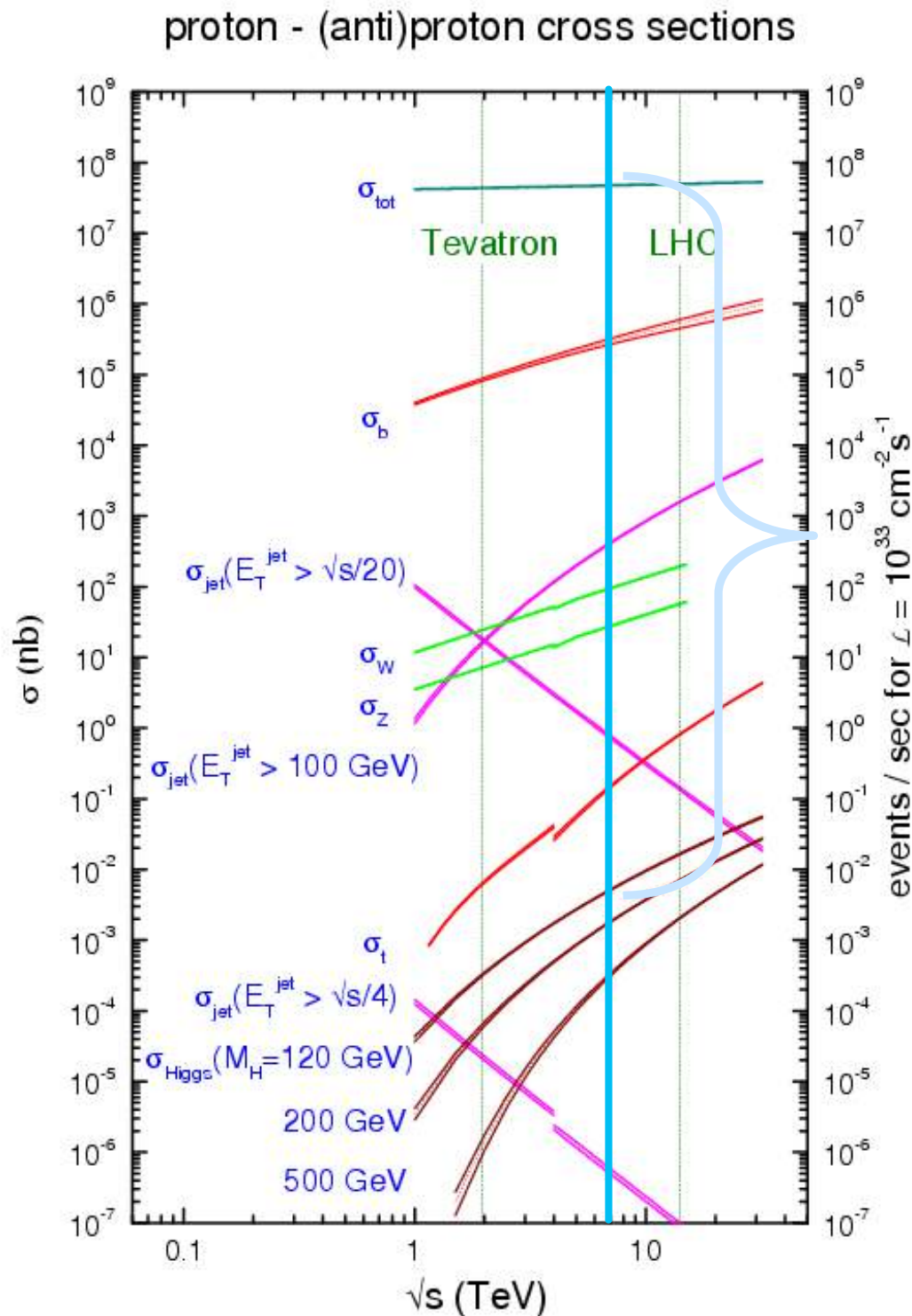
2012
 (20) Pile-up events

50 ns inter-bunch spacing

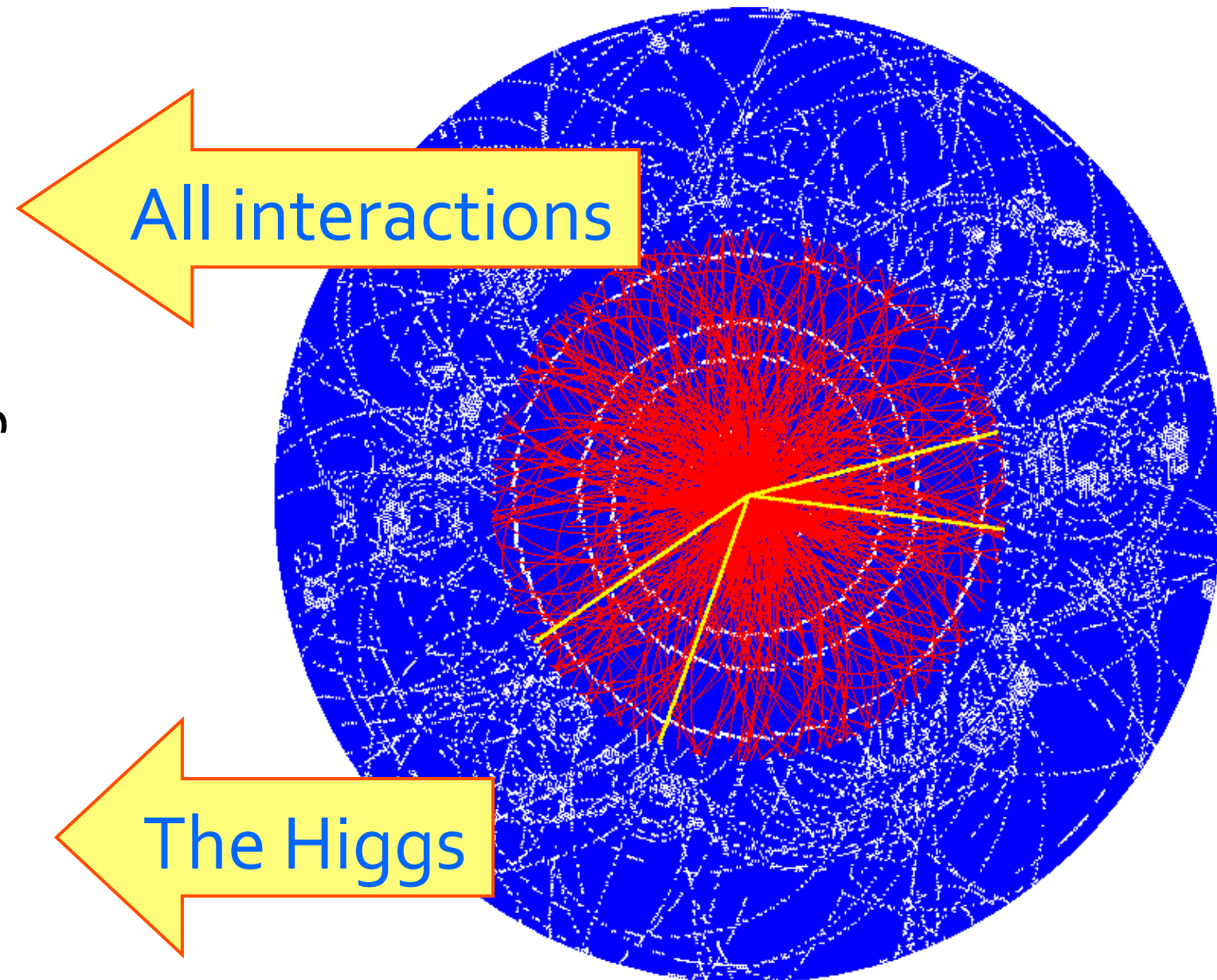


LHC

a. Rare Phenomena Huge Background



b. Complexity



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

LHC

