Introducción a la Física de Partículas

El *Modelo Estándar*

Luis Roberto Flores Castillo

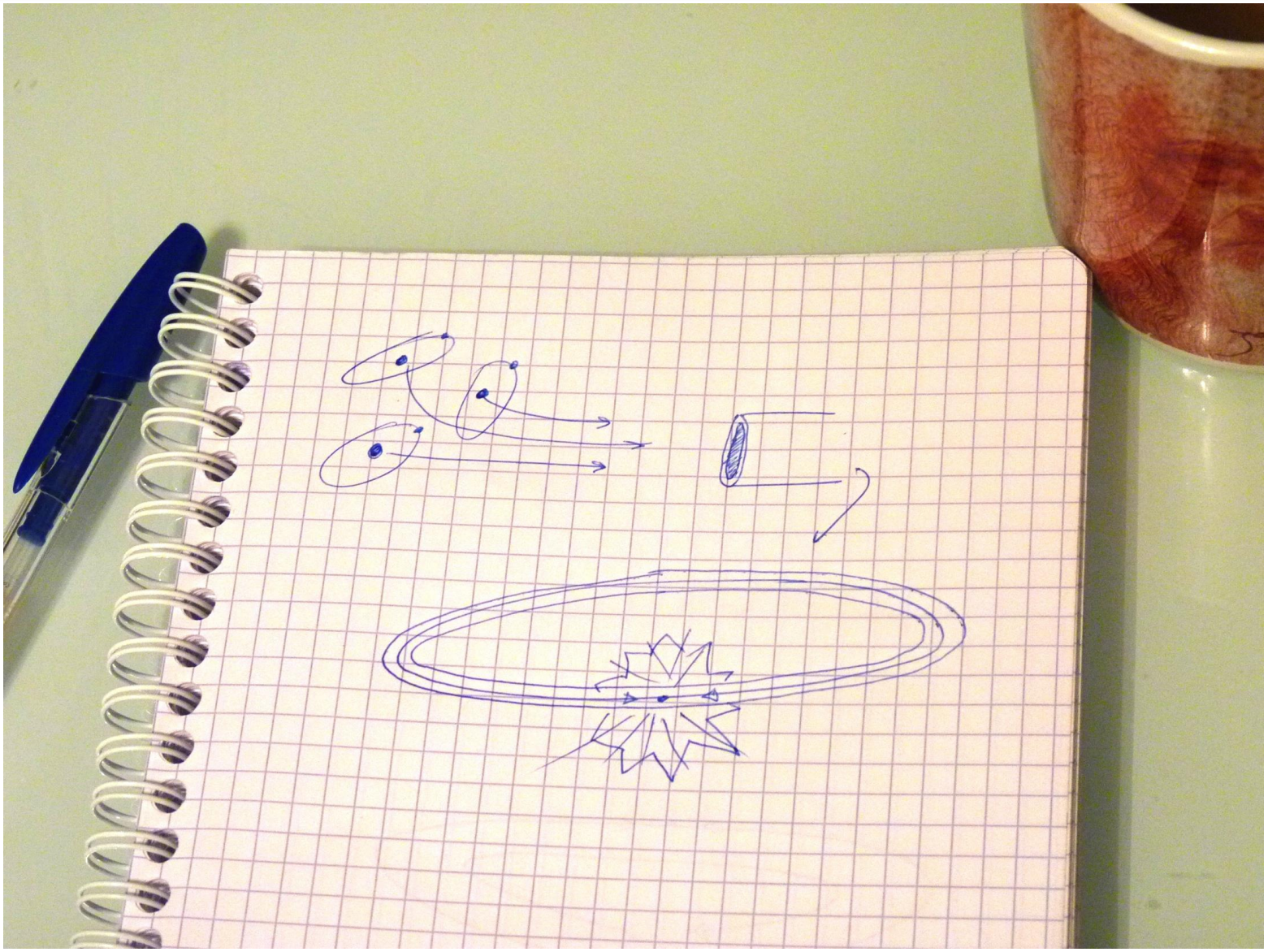
Chinese University of Hong Kong

Spanish Language Teacher Program

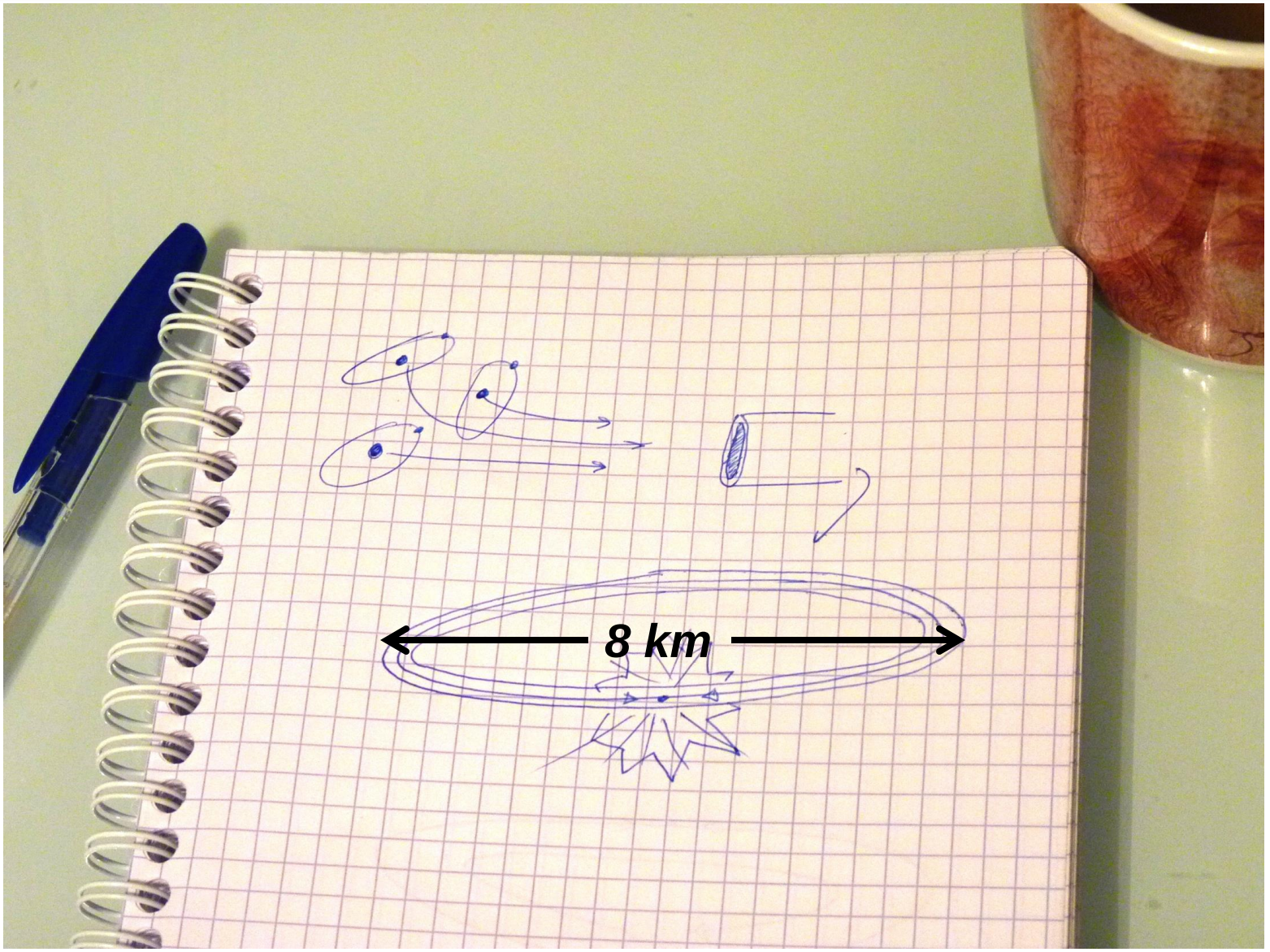
CERN

June 22, 2015

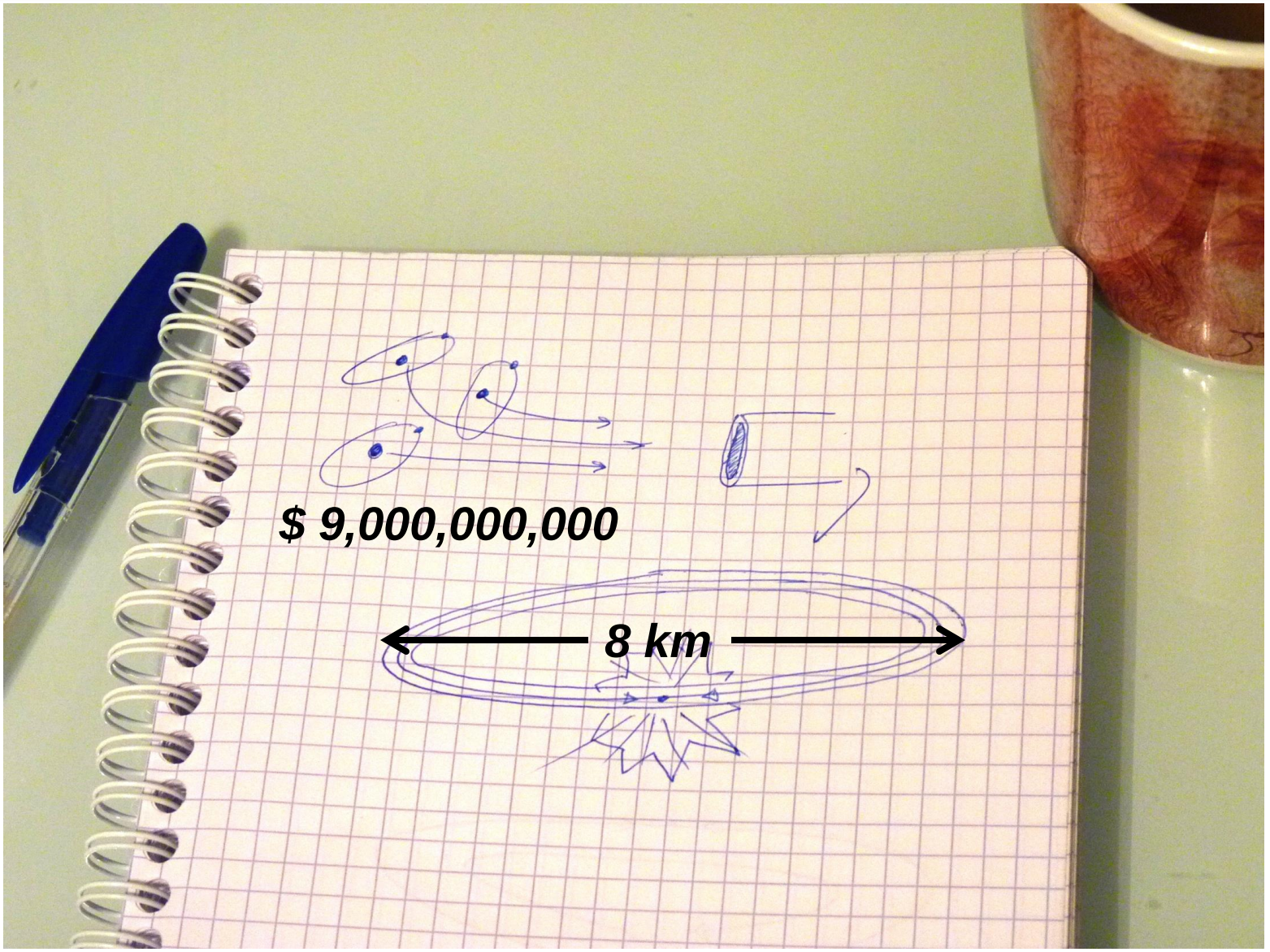
Soñando en grande



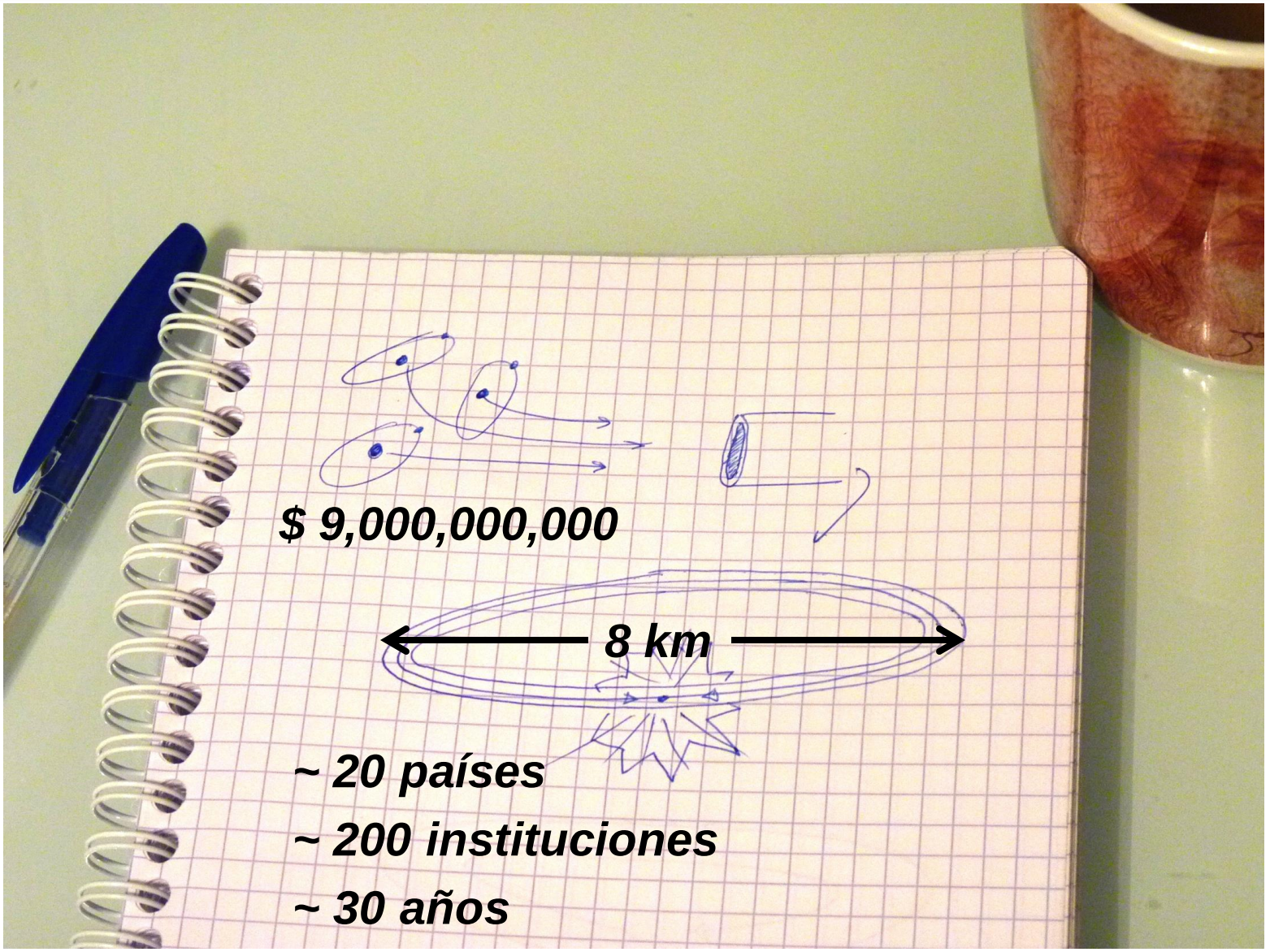
Soñando en grande



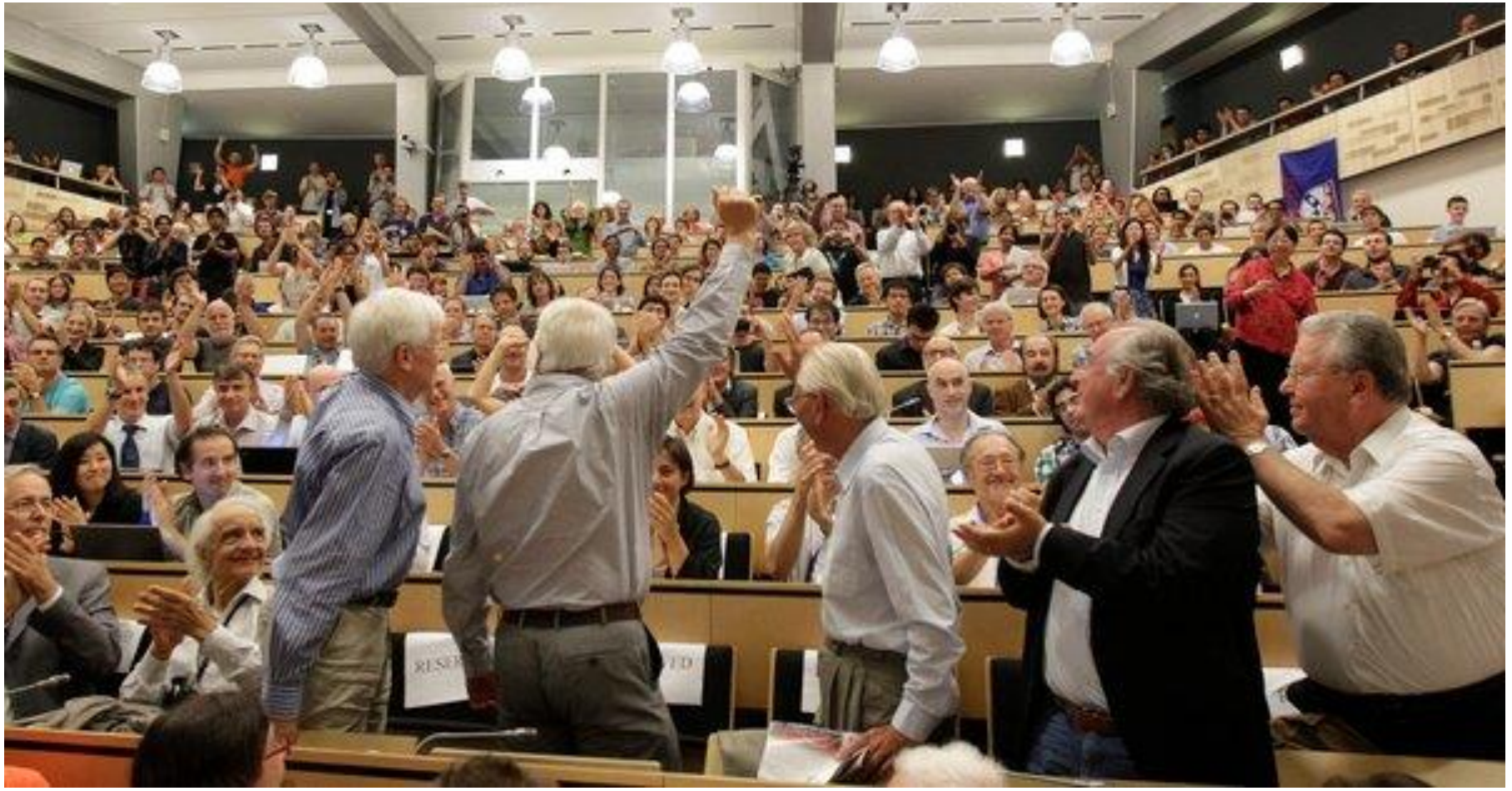
Soñando en grande



Soñando en grande



4 de Julio de 2012



"I think we have it" – Rolf Heuer, Director General de CERN

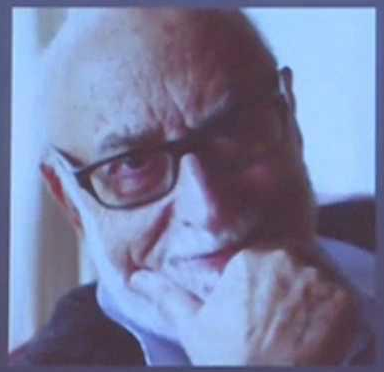
8 de octubre de 2013

Nobelpriset 2013

The Nobel Prize 2013

The Nobel Prize in Physics 2013

KUNGL. VETENSKAPS AKADEMIEN



François Englert
Université Libre de Bruxelles, Belgium

Peter W. Higgs
University of Edinburgh, UK

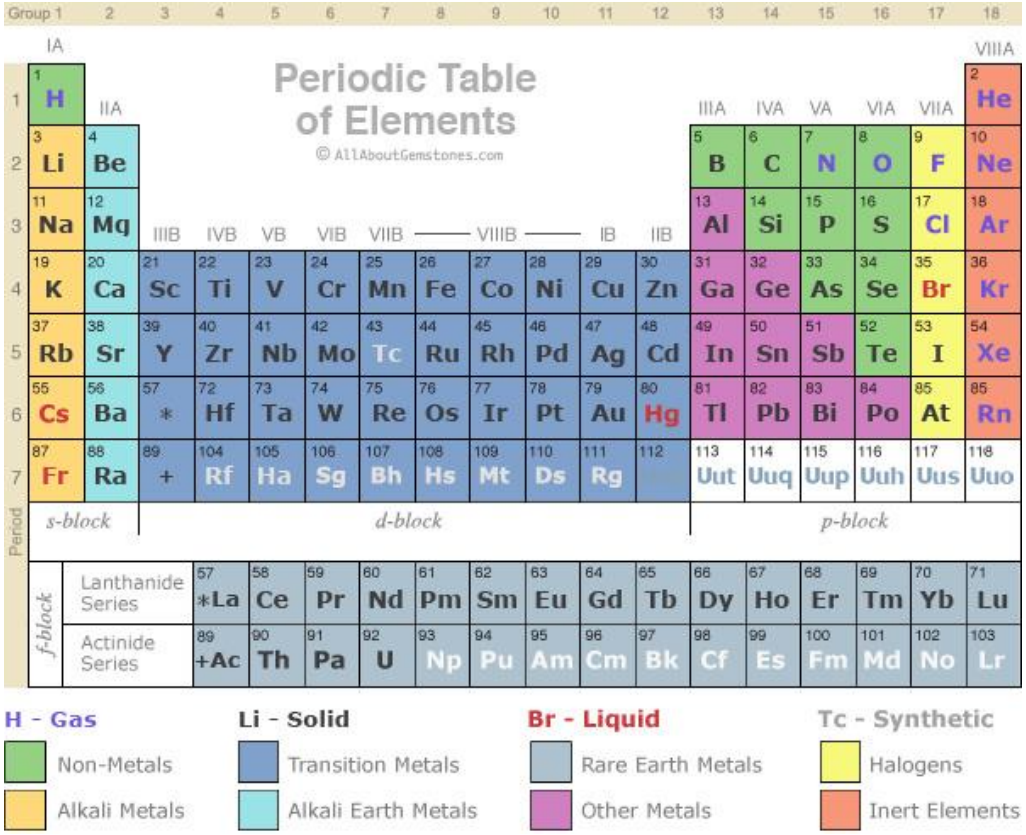
"För den teoretiska upptäckten av en mekanism som bidrar till förståelsen av massans ursprung hos subatomära partiklar, och som nyligen, genom upptäckten av den förutsagda fundamentala partikeln, bekräftats av ATLAS- och CMS-experimenten vid CERN:s accelerator LHC."

"For the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider."

Nobelprize.org

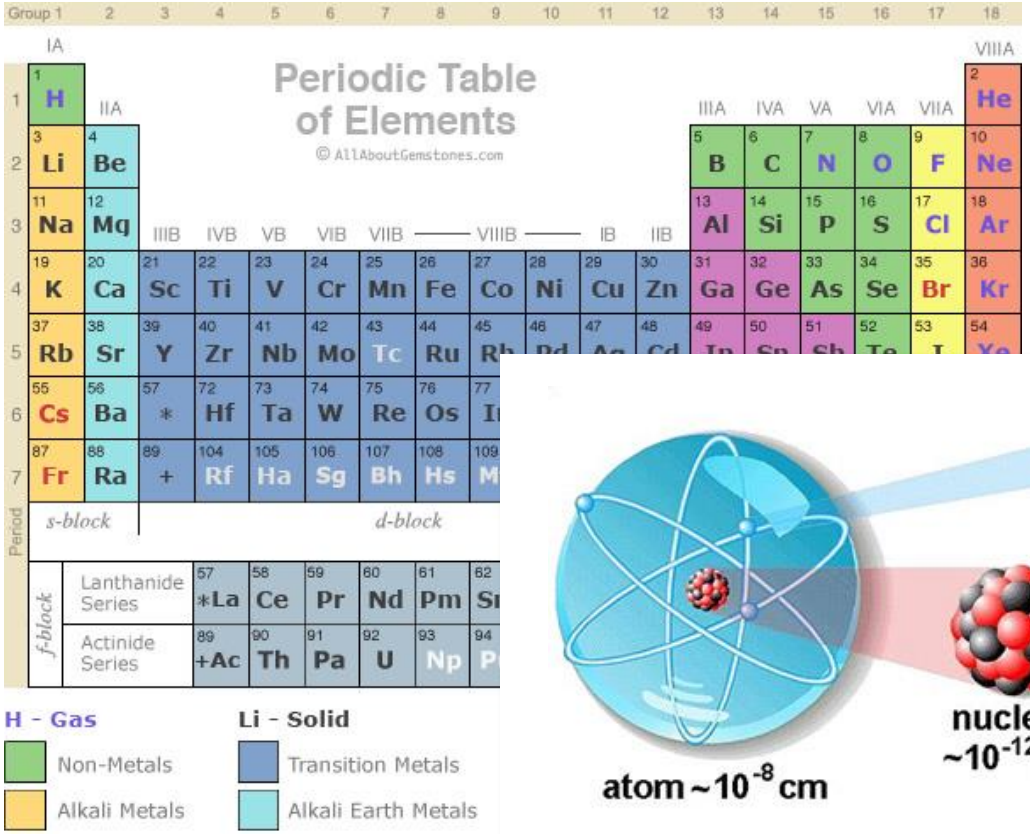
Piezas fundamentales

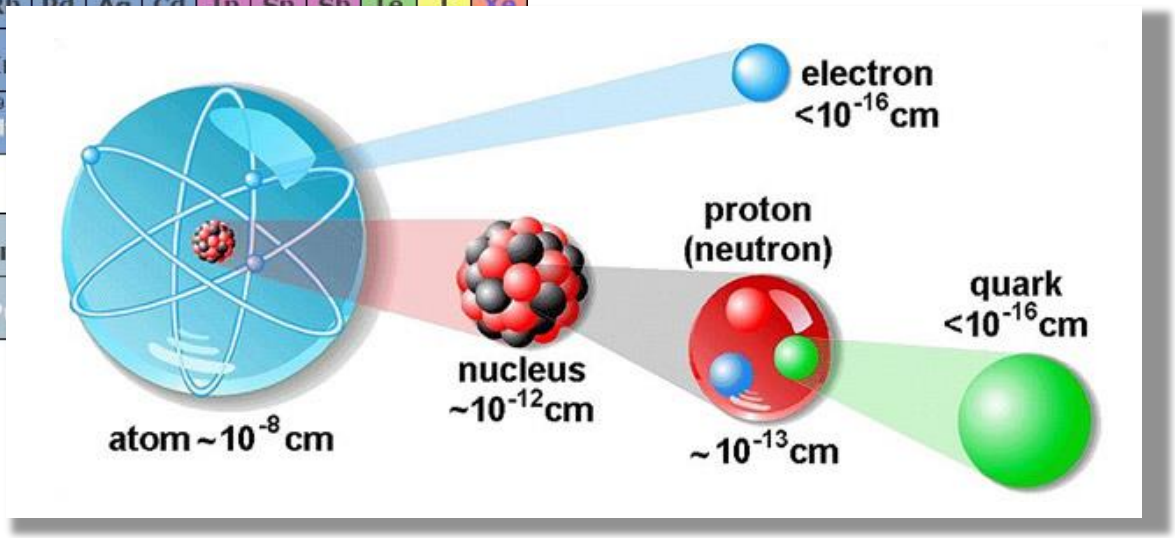
¿Piezas fundamentales?



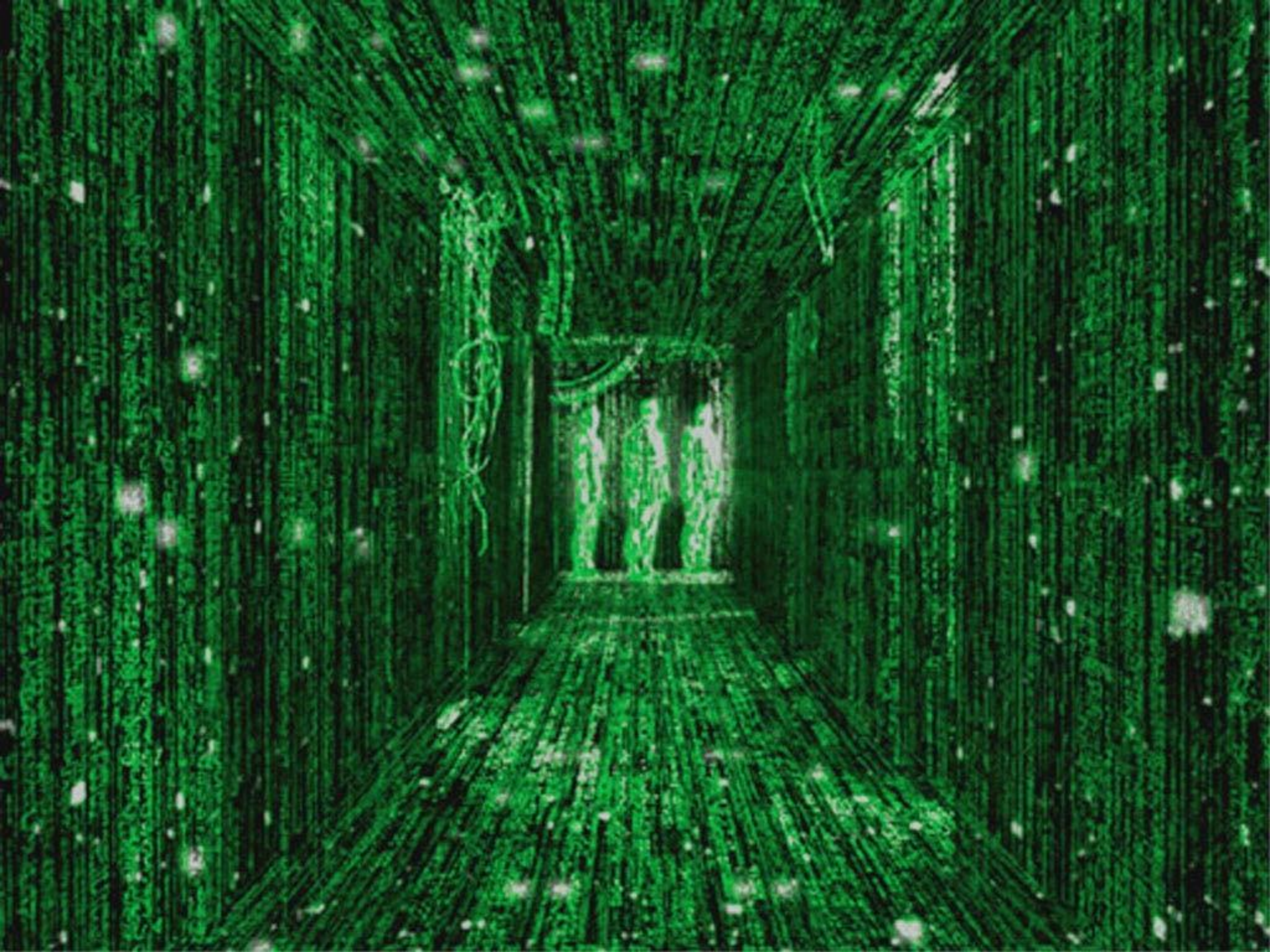
- ~1869, Mendeleyev publicó “Principios de la química”
- Toda esa complejidad a partir de ~100 “elementos”

¿Piezas fundamentales?





… pero todos ellos son combinaciones de TRES partículas.

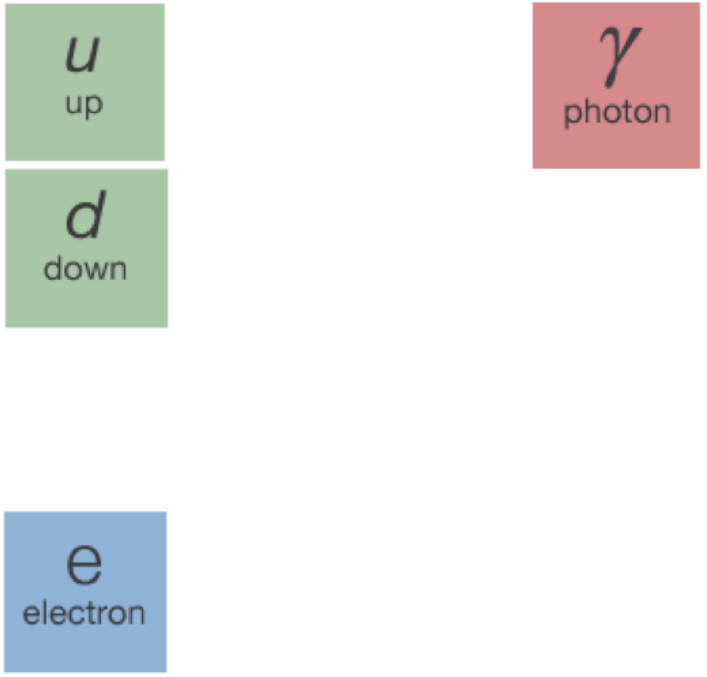


Piezas fundamentales

- Además de esas tres, …

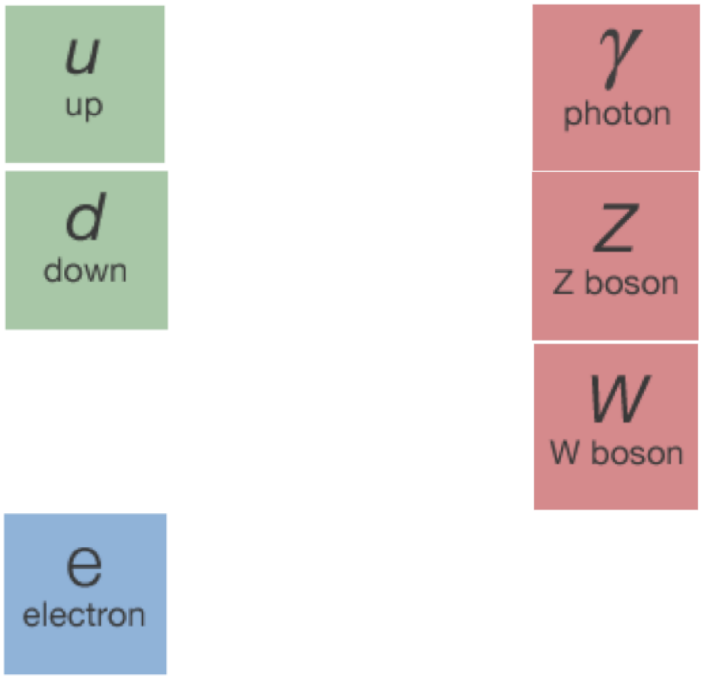
Piezas fundamentales

- Además de esas tres, …



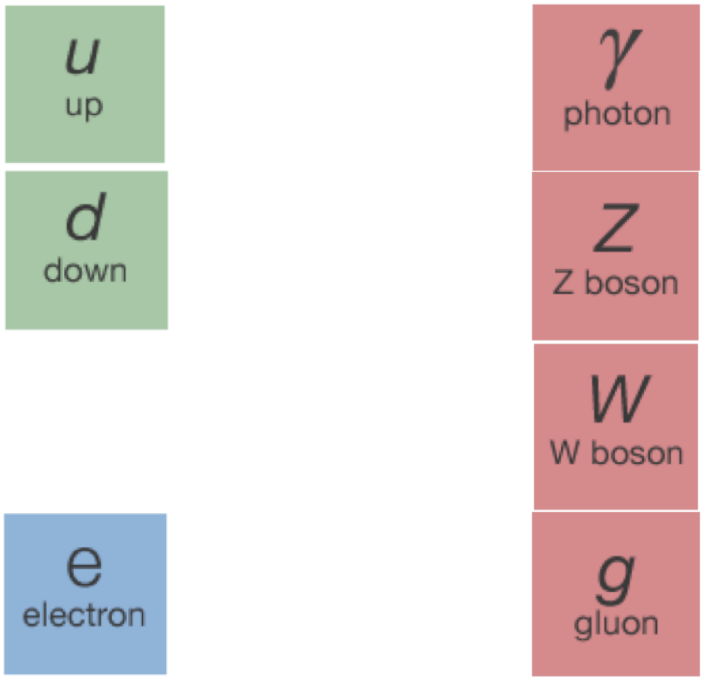
Piezas fundamentales

- Además de esas tres, …



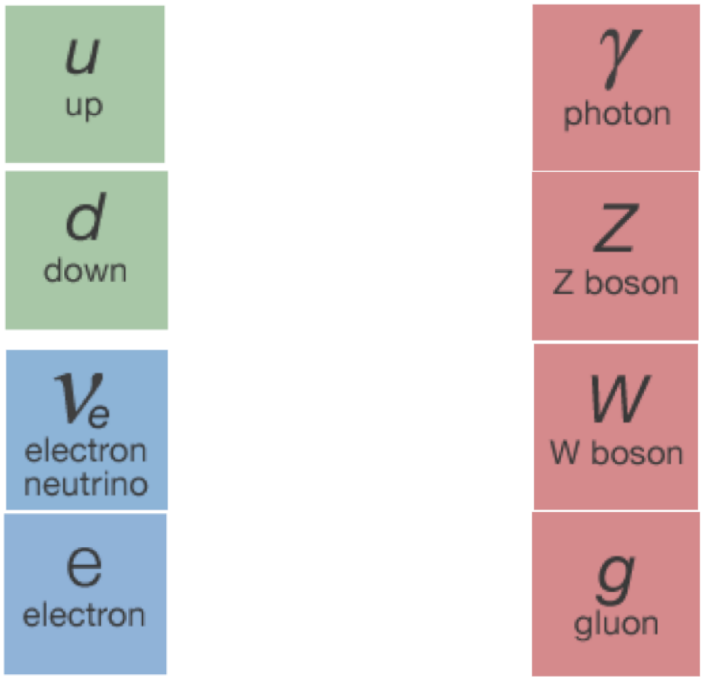
Piezas fundamentales

- Además de esas tres, …



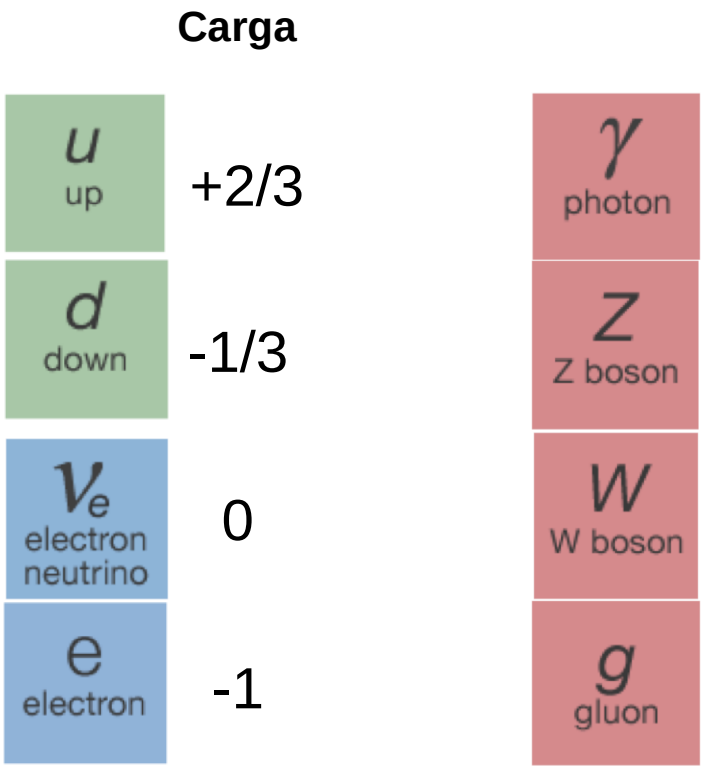
Piezas fundamentales

- Además de esas tres, …



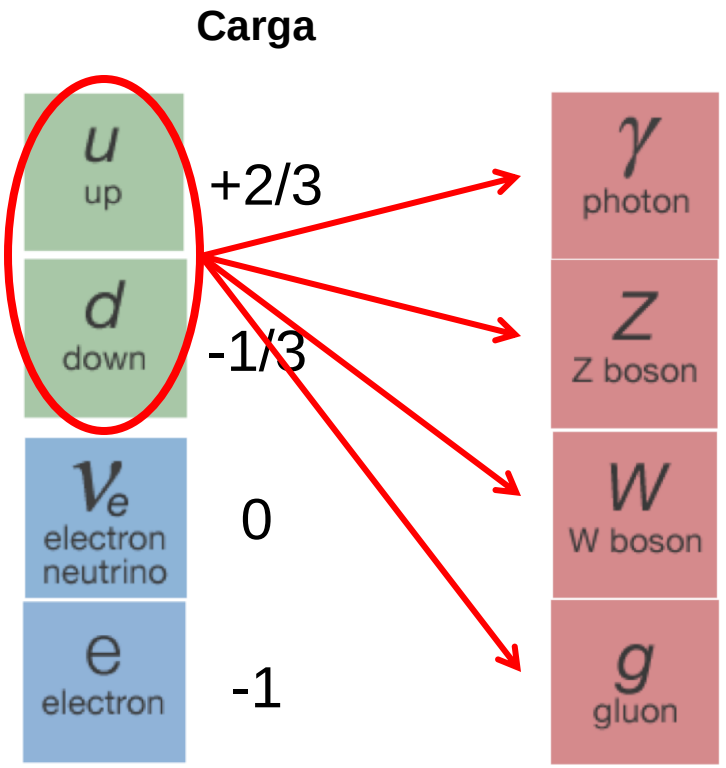
Piezas fundamentales

- Además de esas tres, …



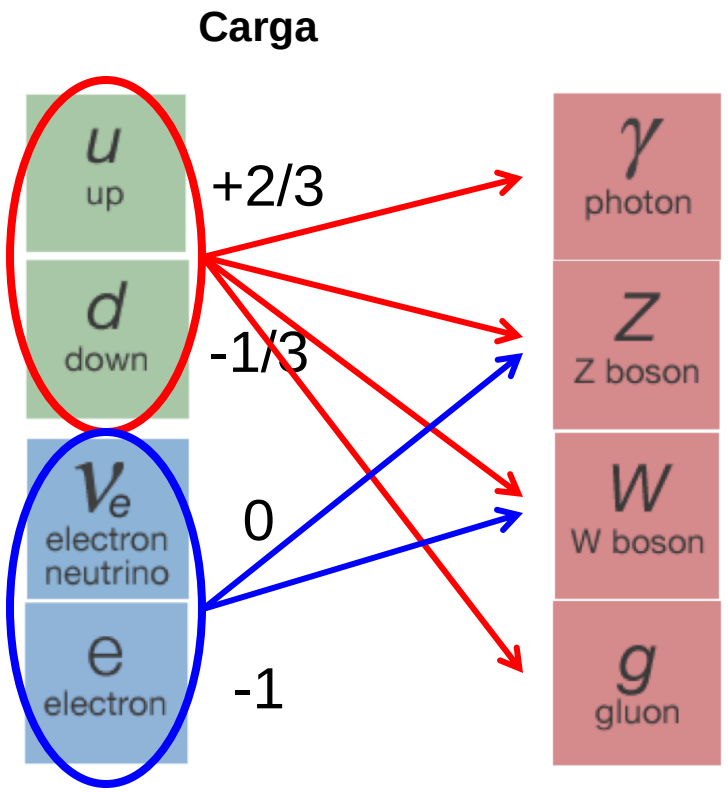
Piezas fundamentales

- Además de esas tres, …



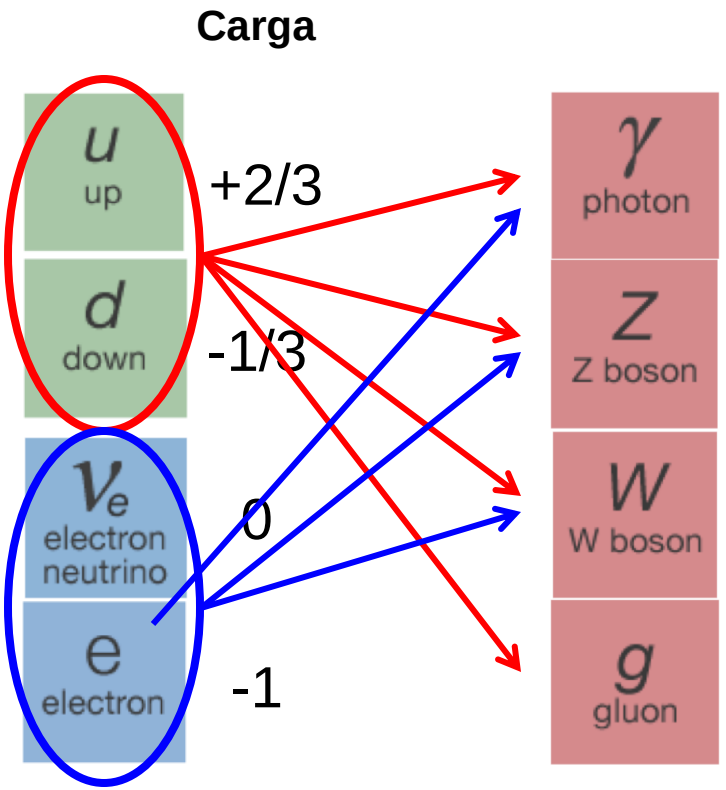
Piezas fundamentales

- Además de esas tres, …



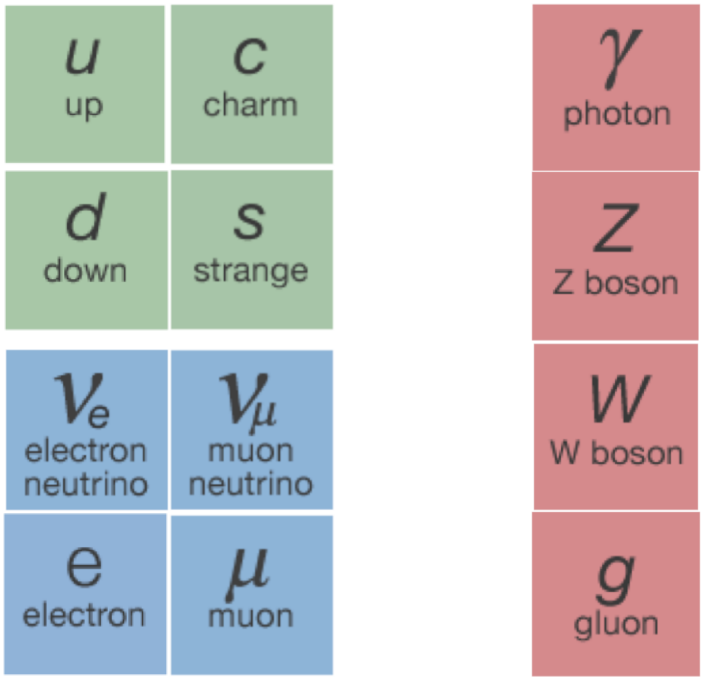
Piezas fundamentales

- Además de esas tres, …



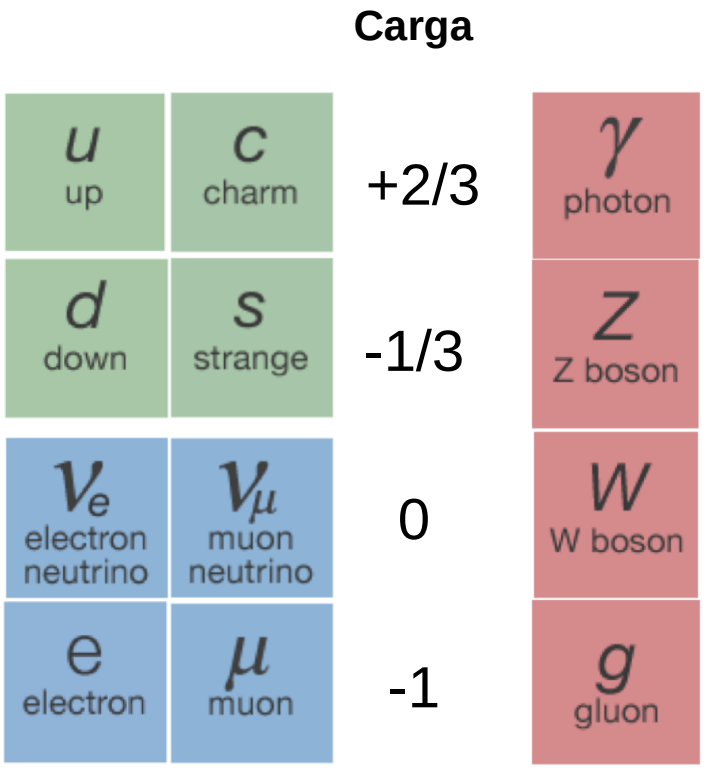
Piezas fundamentales

- Además de esas tres, …



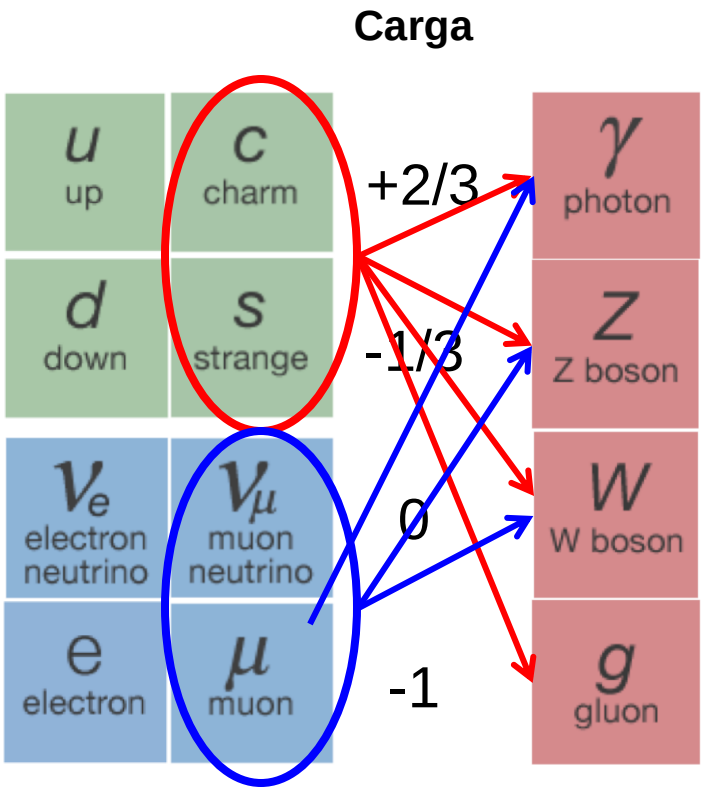
Piezas fundamentales

- Además de esas tres, …



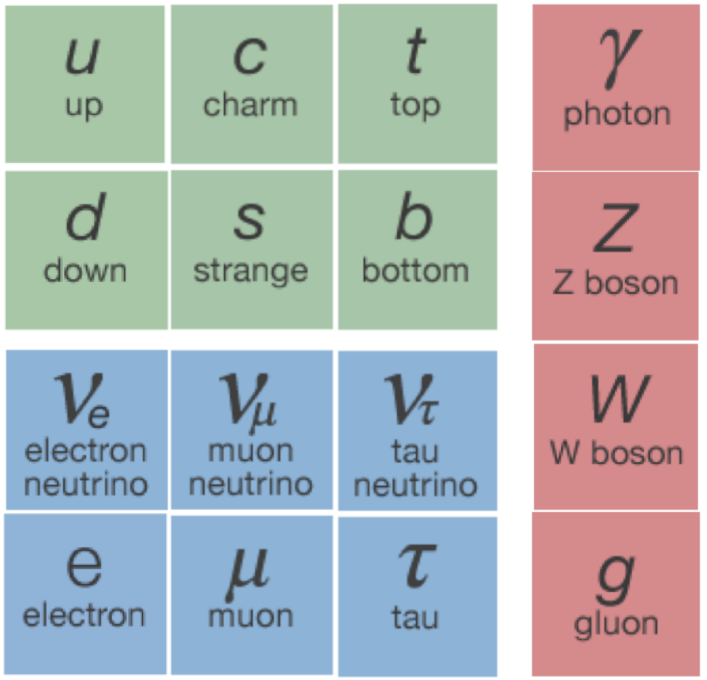
Piezas fundamentales

- Además de esas tres, …



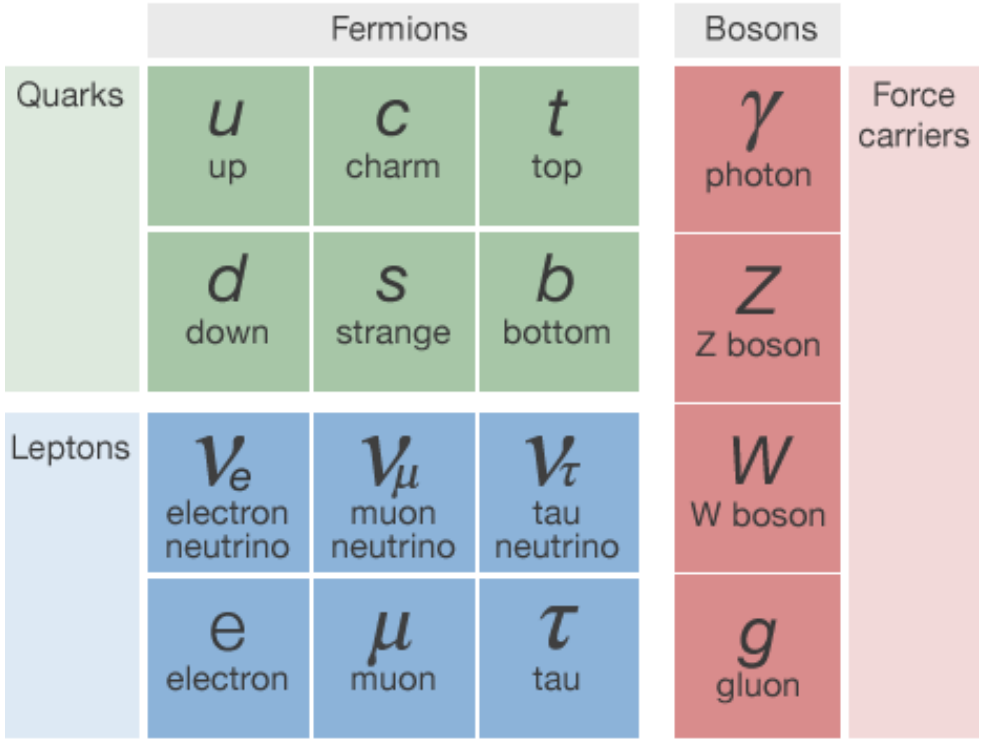
Piezas fundamentales

- Además de esas tres, …



Piezas fundamentales

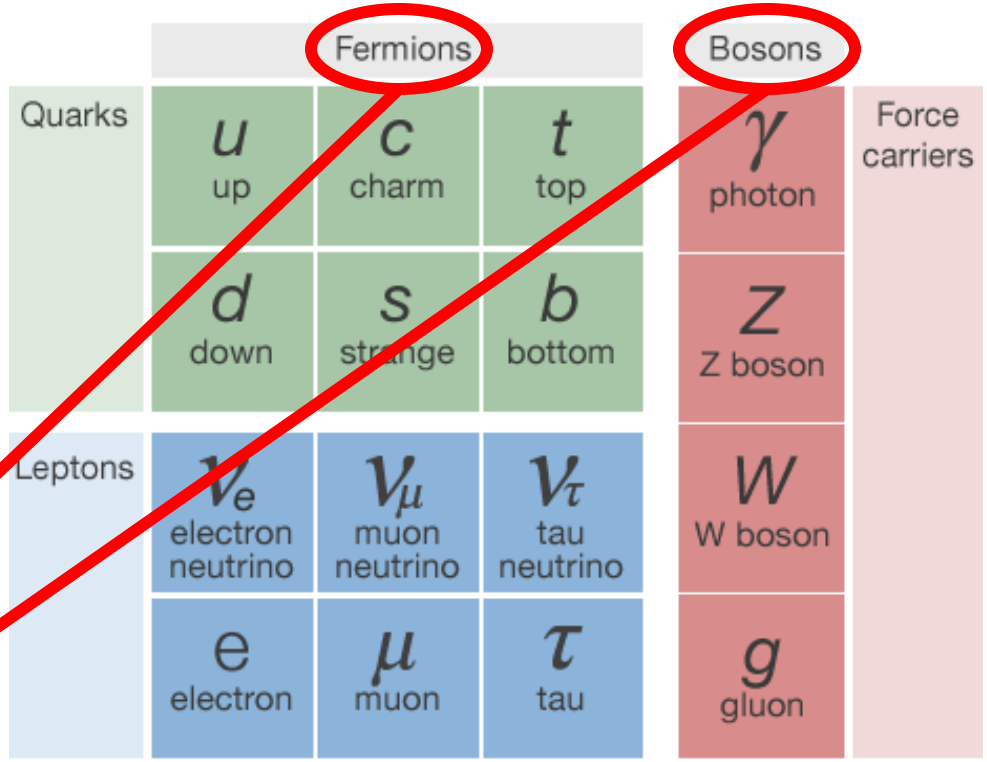
- Además de esas tres, hay 14 adicionales
- Describen casi todos los fenómenos físicos conocidos



Source: AAAS

Piezas fundamentales

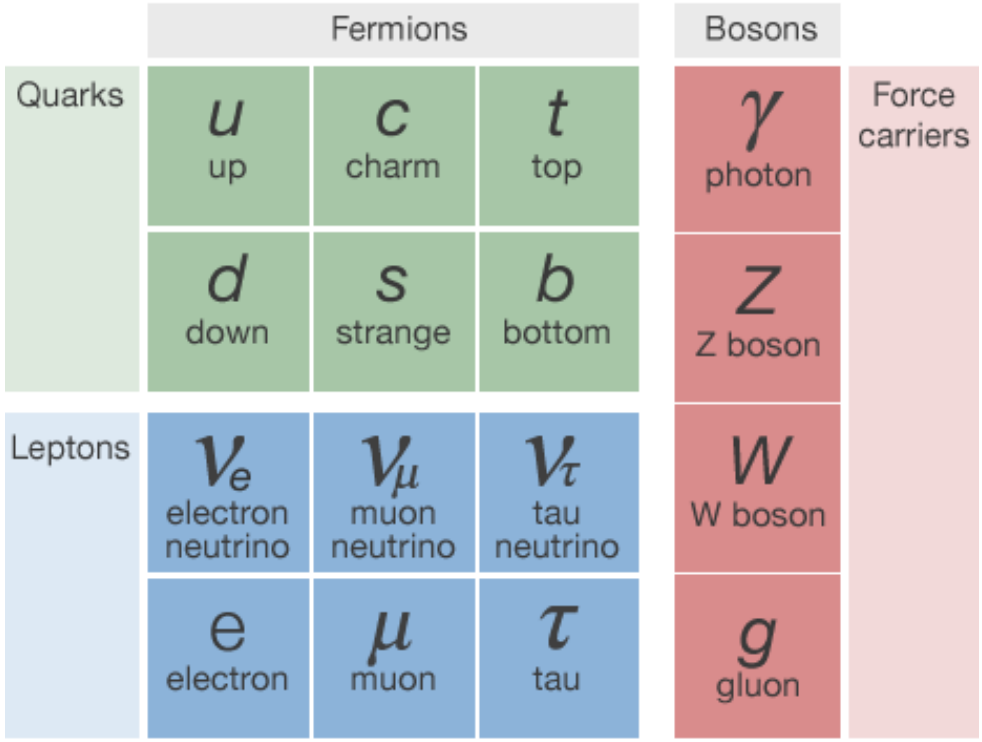
- Además de esas tres, hay 14 adicionales
- Describen casi todos los fenómenos físicos conocidos
- Dos grandes familias:
  - "materia" (espín 1/2, 3/2, …)
  - "fuerza" (espín 0, 1, 2, …)



Source: AAAS

Piezas fundamentales

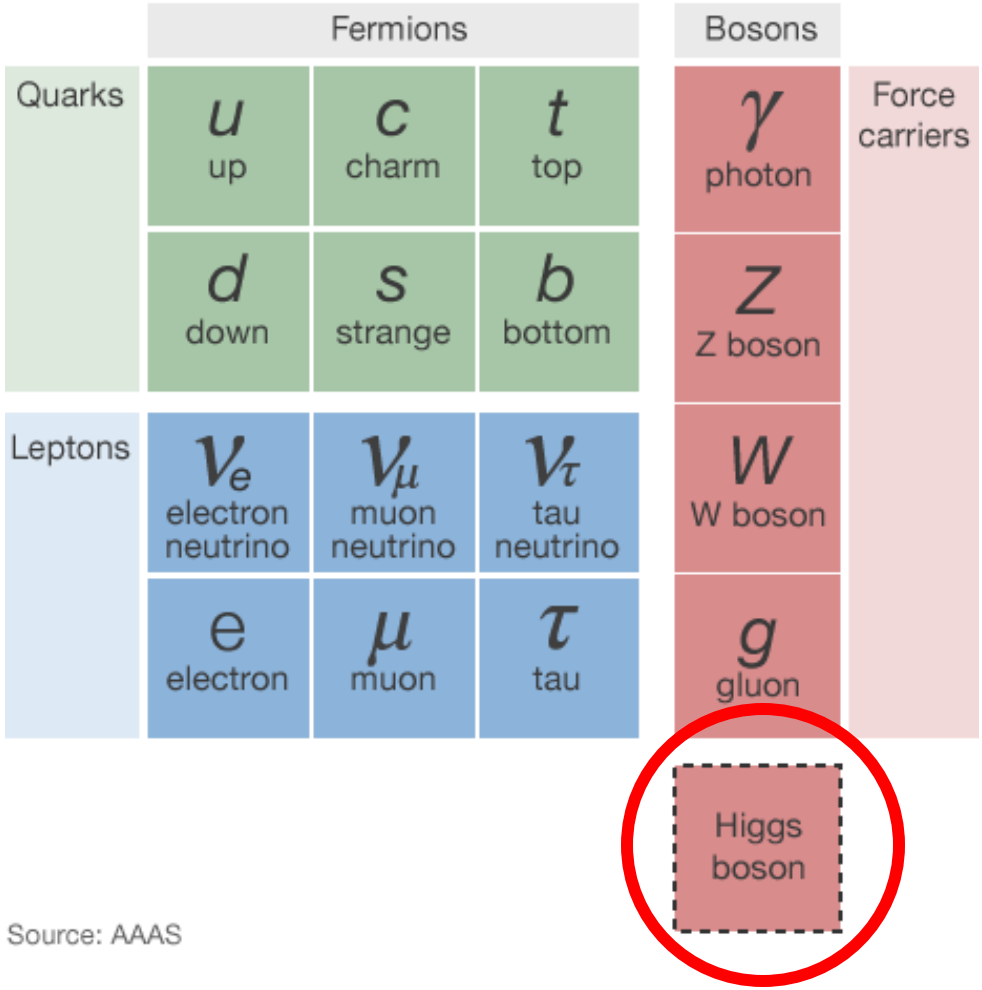
- Además de esas tres, hay 14 adicionales
- Describen casi todos los fenómenos físicos conocidos
- Dos grandes familias:
  - "materia" (espín 1/2, 3/2, …)
  - "fuerza" (espín 0, 1, 2, …)
- Hacia 1964, había un problema: sólo funcionaba si las partículas elementales tuvieran masa CERO



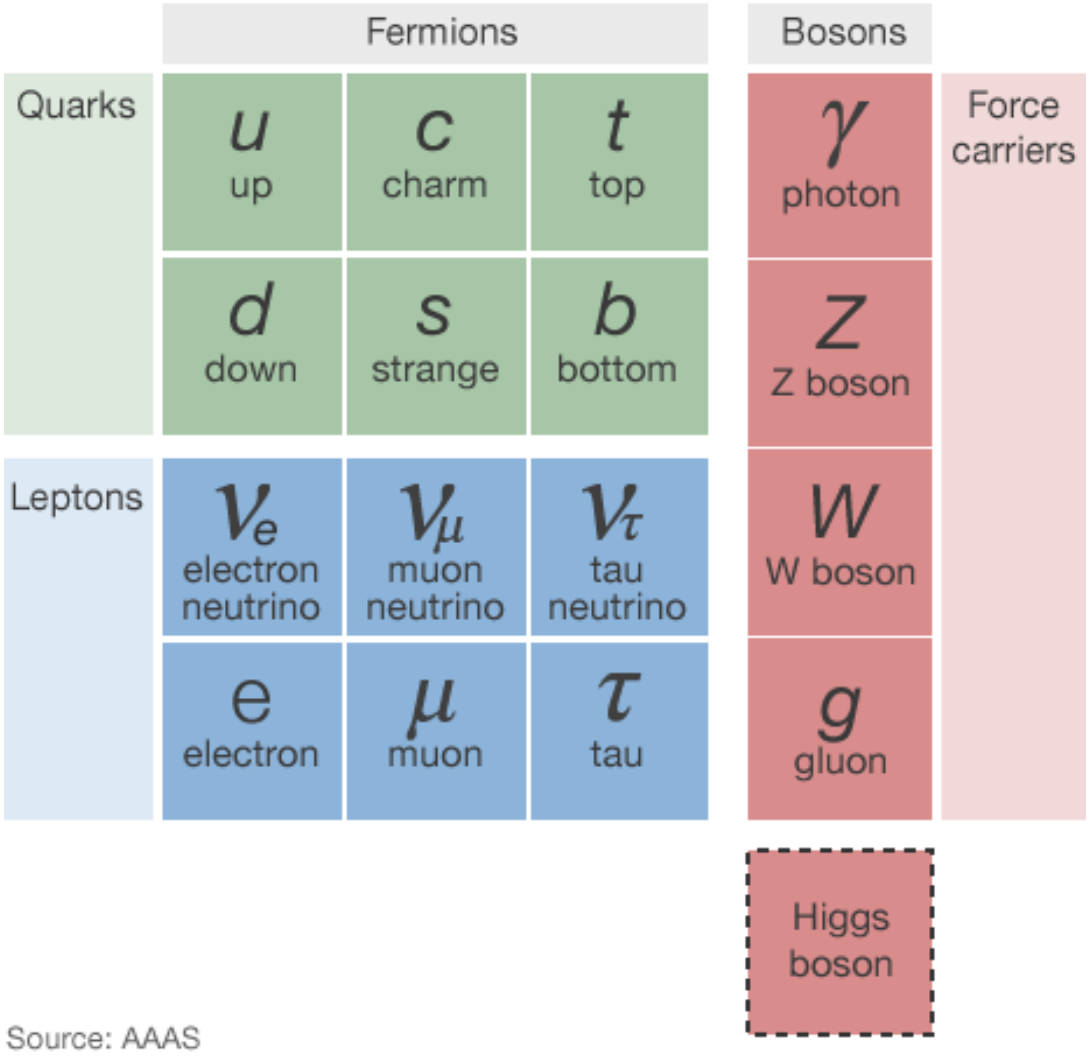
Source: AAAS

Piezas fundamentales

- Además de esas tres, hay 14 adicionales
- Describen casi todos los fenómenos físicos conocidos
- Dos grandes familias:
  - "materia" (espín 1/2, 3/2, …)
  - "fuerza" (espín 0, 1, 2, …)
- Hacia 1964, había un problema: sólo funcionaba si las partículas elementales tuvieran masa CERO



Piezas fundamentales



- Materia: **quarks** y **leptones**
- Interacciones: **Bosones vectoriales (más el Higgs)**
- Tres generaciones
  - Un neutrino por cada leptón cargado
  - Quarks ‘tipo up’, quarks ‘tipo down’
- **¿Qué combinaciones son posibles?**

Algunas partículas compuestas

The baryon decuplet

qqq	Q	S	Baryon
uuu	2	0	Δ^{++}
uud	1	0	Δ^{+}
udd	0	0	Δ^{0}
ddd	−1	0	Δ^{-}
uus	1	−1	Σ^{*+}
uds	0	−1	Σ^{*0}
dds	−1	−1	Σ^{*-}
uss	0	−2	Ξ^{*0}
dss	−1	−2	Ξ^{*-}
sss	−1	−3	Ω^{-}

The meson nonet

$q\bar{q}$	Q	S	Meson
$u\bar{u}$	0	0	π^{0}
$u\bar{d}$	1	0	π^{+}
$d\bar{u}$	−1	0	π^{-}
$d\bar{d}$	0	0	η
$u\bar{s}$	1	1	K^{+}
$d\bar{s}$	0	1	K^{0}
$s\bar{u}$	−1	−1	K^{-}
$s\bar{d}$	0	−1	$\bar{K}^{0}$
$s\bar{s}$	0	0	??

- Cada combinación también puede tener estados excitados

Procesos fundamentales

Nanocurso de Mecánica Cuántica

- **Ni partículas ni ondas**

  (video)

- **Indeterminación** (no “incertidumbre”)

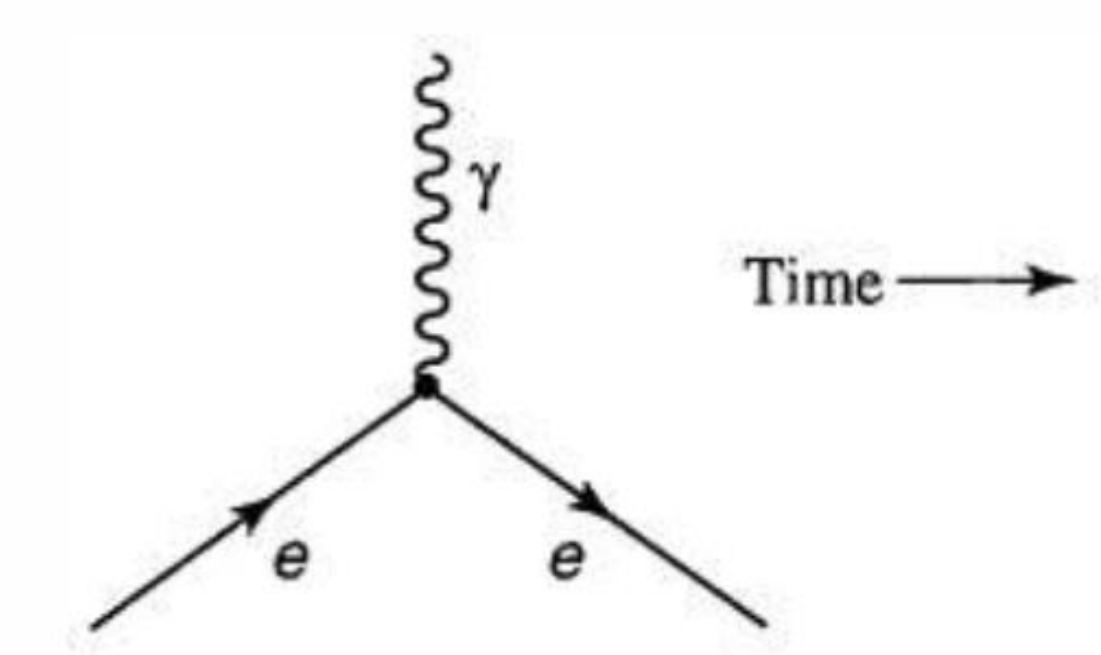
  Entre dos estados observables, los sistemas cuánticos existen en una superposición de los estados posibles.

- Sólo podemos calcular la **probabilidad** de cada posible resultado

Interacción electromagnética (Electrodinámica cuántica)

Interacción electromagnética

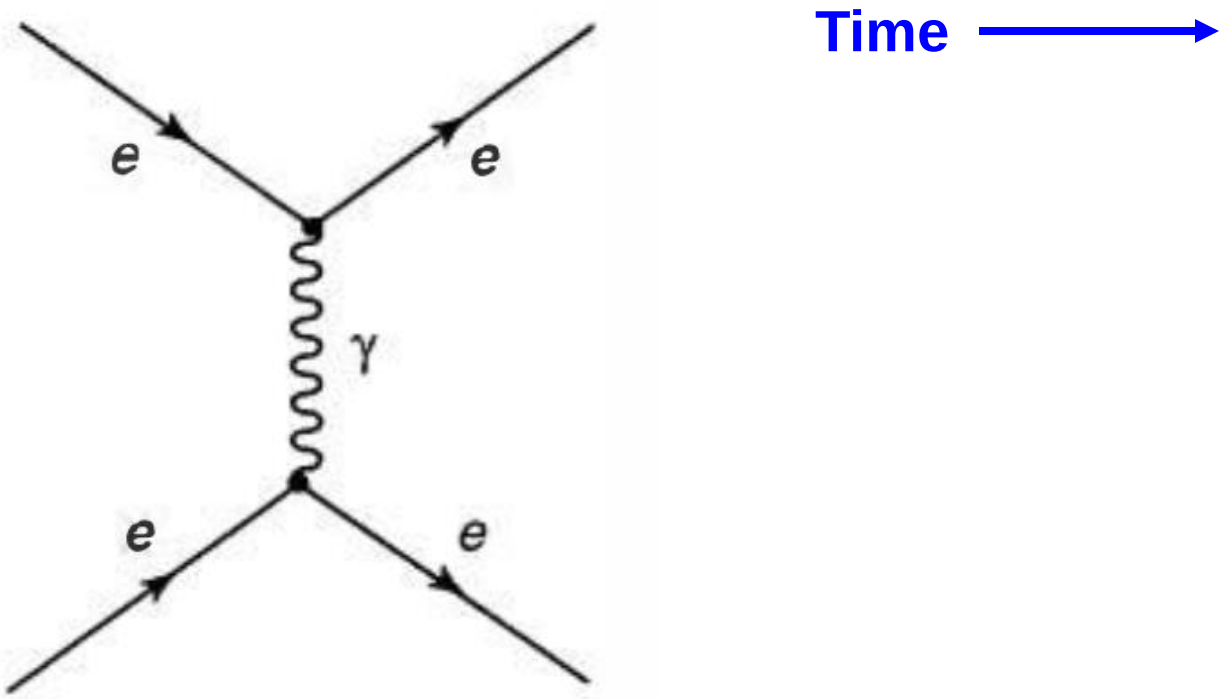
Todos los fenómenos electromagnéticos se pueden reducir a combinaciones de vértices como el siguiente:



- El tiempo fluye hacia la derecha
- En este caso, un electrón emite (or absorbe) un fotón
- Con cualquier partícula cargada (leptón, quark, W)

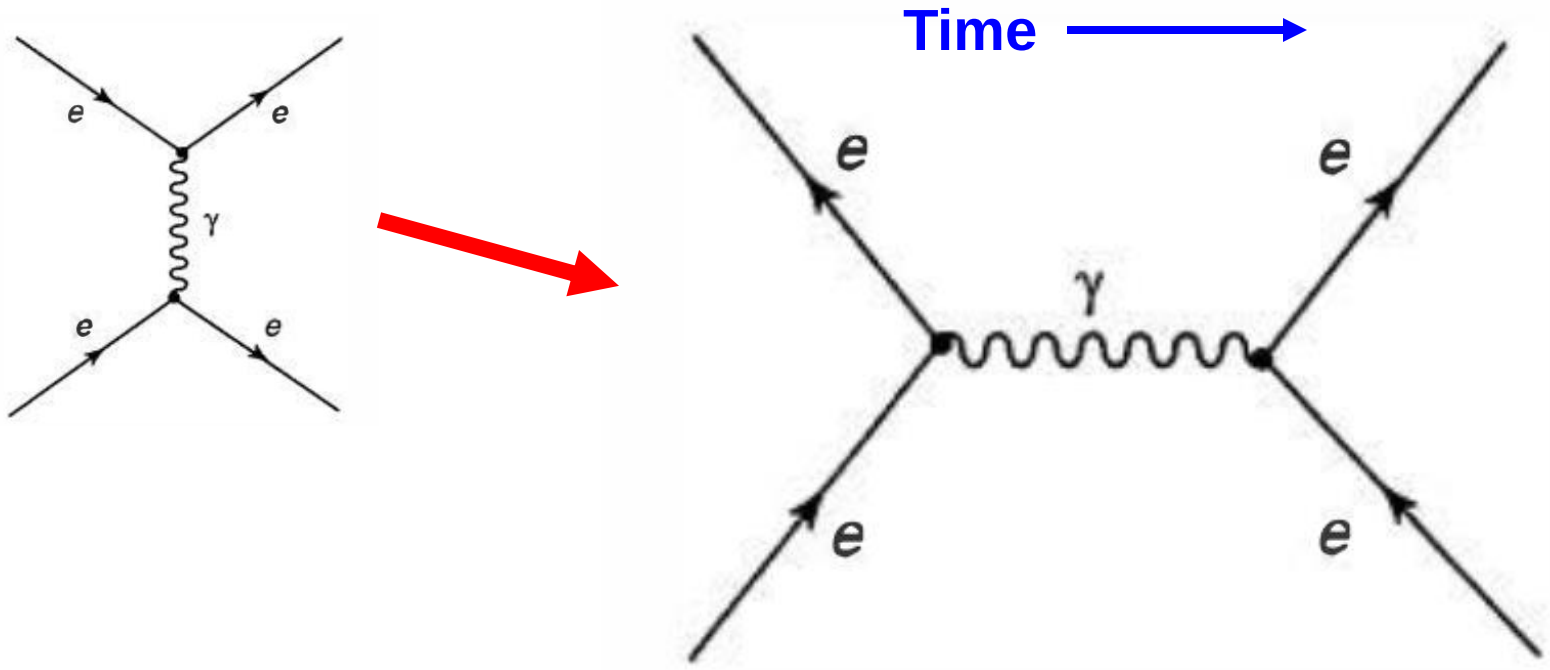
Interacción electromagnética

Combinando dos vértices:



- inicio: ee; intercambian un fotón (hacia donde?), final: ee
- Repulsión de Coulomb, o “Møller scattering”

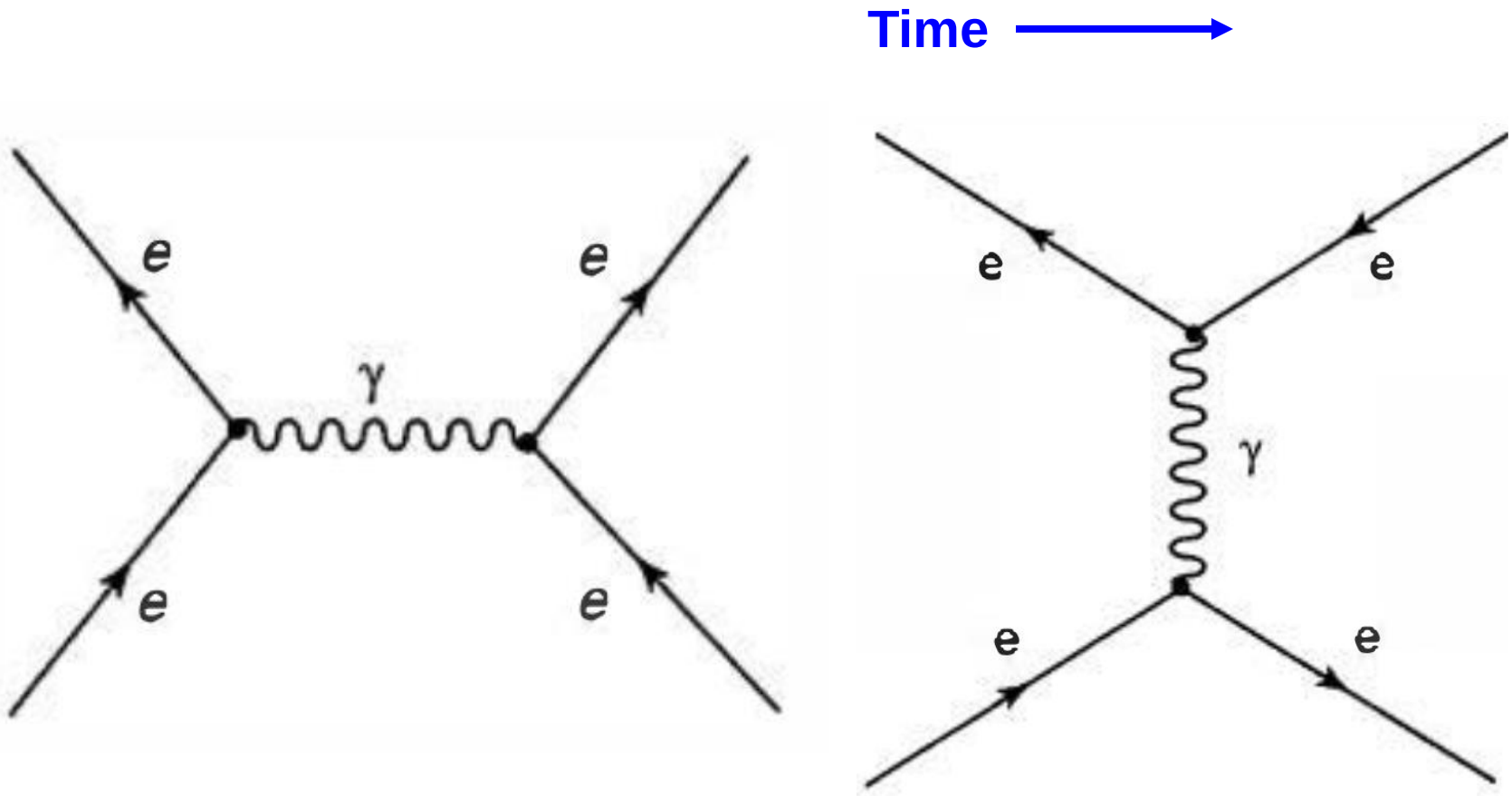
Interacción electromagnética



El mismo “diagrama de Feynman”, reorientado

- Partícula ‘hacia atrás en t’ = antipartícula hacia adelante en t
- Ahora: e^+, e^- se aniquilan en un γ, que produce un par e^+e^-
- Atracción de Coulomb entre cargas opuestas
- e^+e^-: “Bhabha scattering”

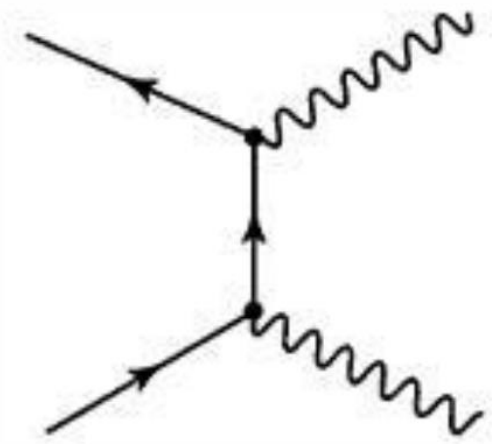
Interacción electromagnética



- Otro diagrama también corresponde a esta interacción
- Ambas posibles historias afectan el resultado

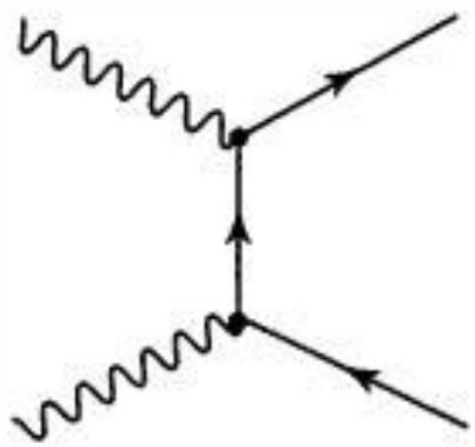
Interacción electromagnética

Otras interacciones descritas combinando estos vértices :



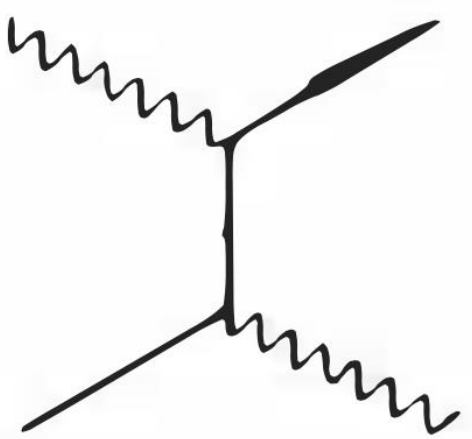
Aniquilación e^+e^-

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$$



Producción de pares

$$\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^-$$



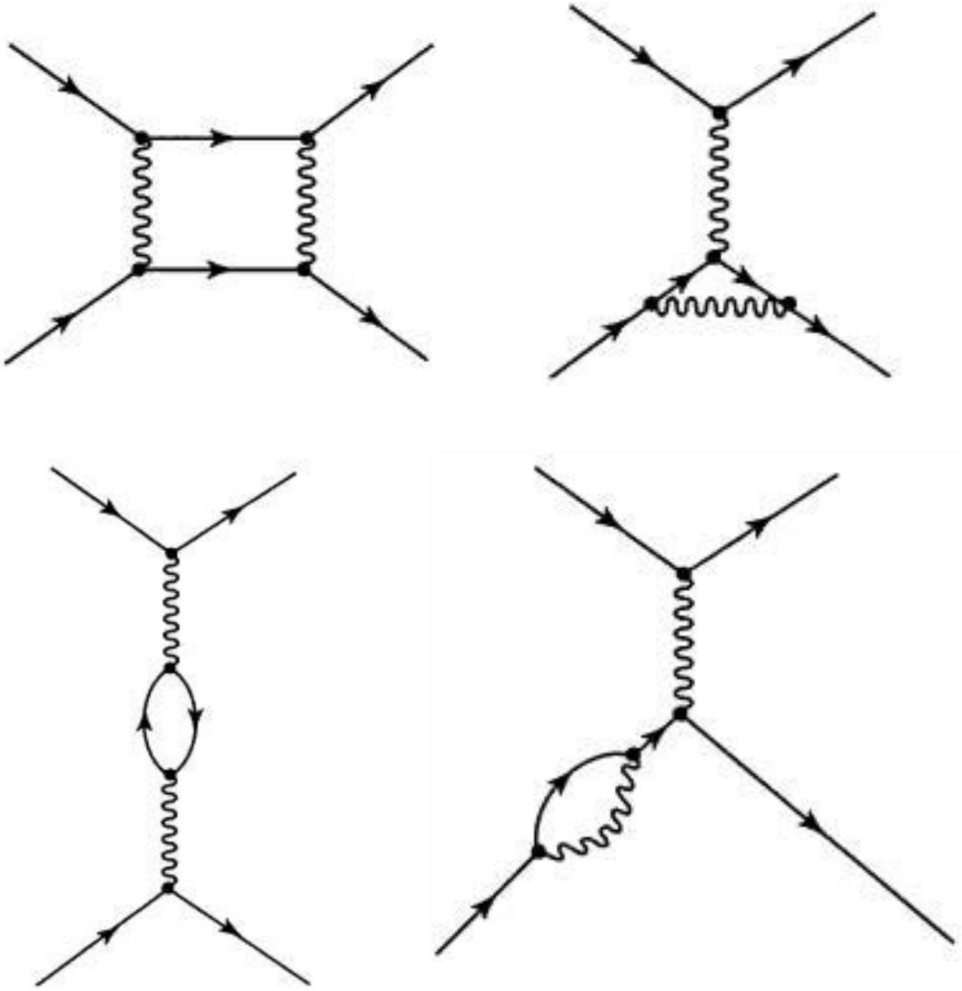
Dispersión de Compton

$$e^+ + \gamma \rightarrow e^- + \gamma$$

Crossing symmetry: twisting or rotating the figure

Interacción electromagnética

… por qué sólo dos? Con 4 vértices:



- En todos ellos:

  $e^+ + e^- \rightarrow e^+ + e^-$

  (Møller scattering)

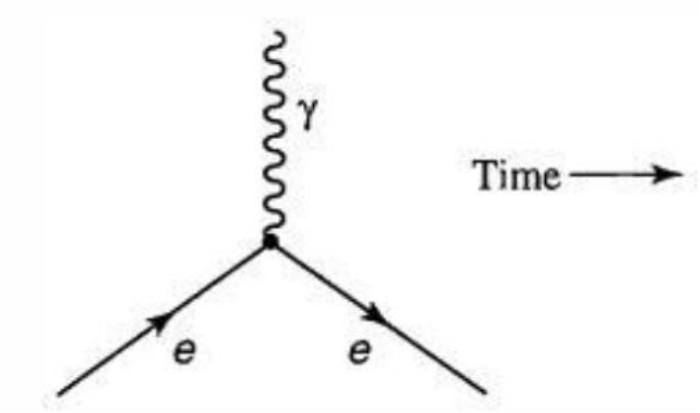
- Líneas internas:
  - *Inobservables*
  - "Partículas virtuales"
  - "Mecanismo"

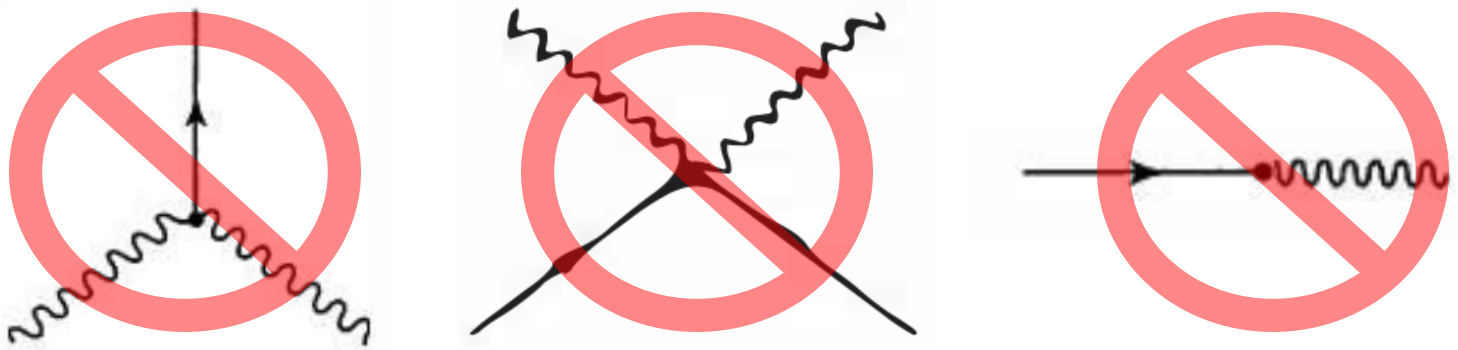
- Líneas externas
  - Partículas observables
  - Procesos físicos

Interacción electromagnética

- Qué partículas pueden combinarse en un vértice?

  Sólo *un* vértice observado:





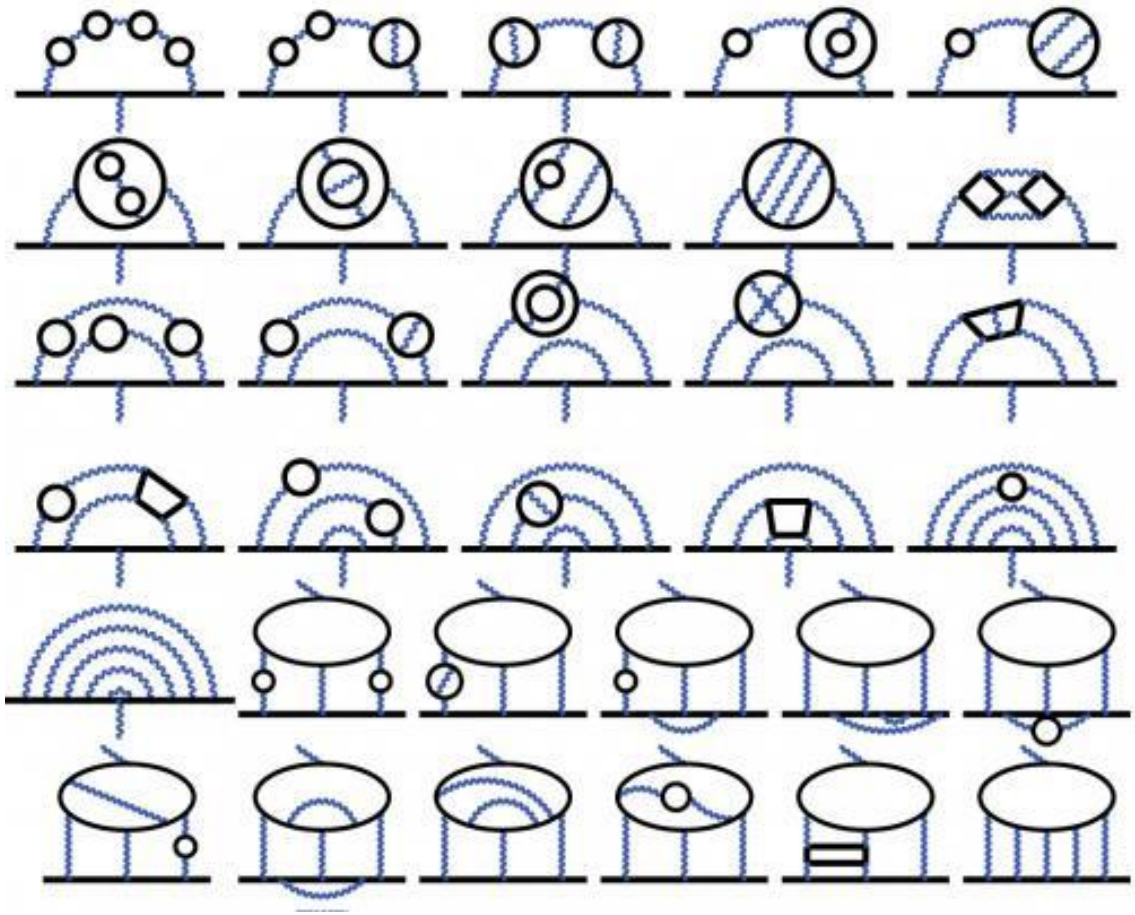
Interacción electromagnética

- Los diagramas de Feynman NO representan trayectorias
- Únicamente ***interacciones***
- Cada diagrama representa la amplitud de probabilidad de una contribucion al proceso de interés
  - Un número complejo
  - Las "reglas de Feynman" definen cómo calcularlo.

- Proceso físico = conjunto de líneas externas; su amplitud es la ***suma de todos los DF*** con esas líneas externas

- La suma es infinita, pero cada vértice introduce un factor $\alpha = e^2/\hbar c = 1/137$ (la ***constante de estructura fina***)
  - La suma converge

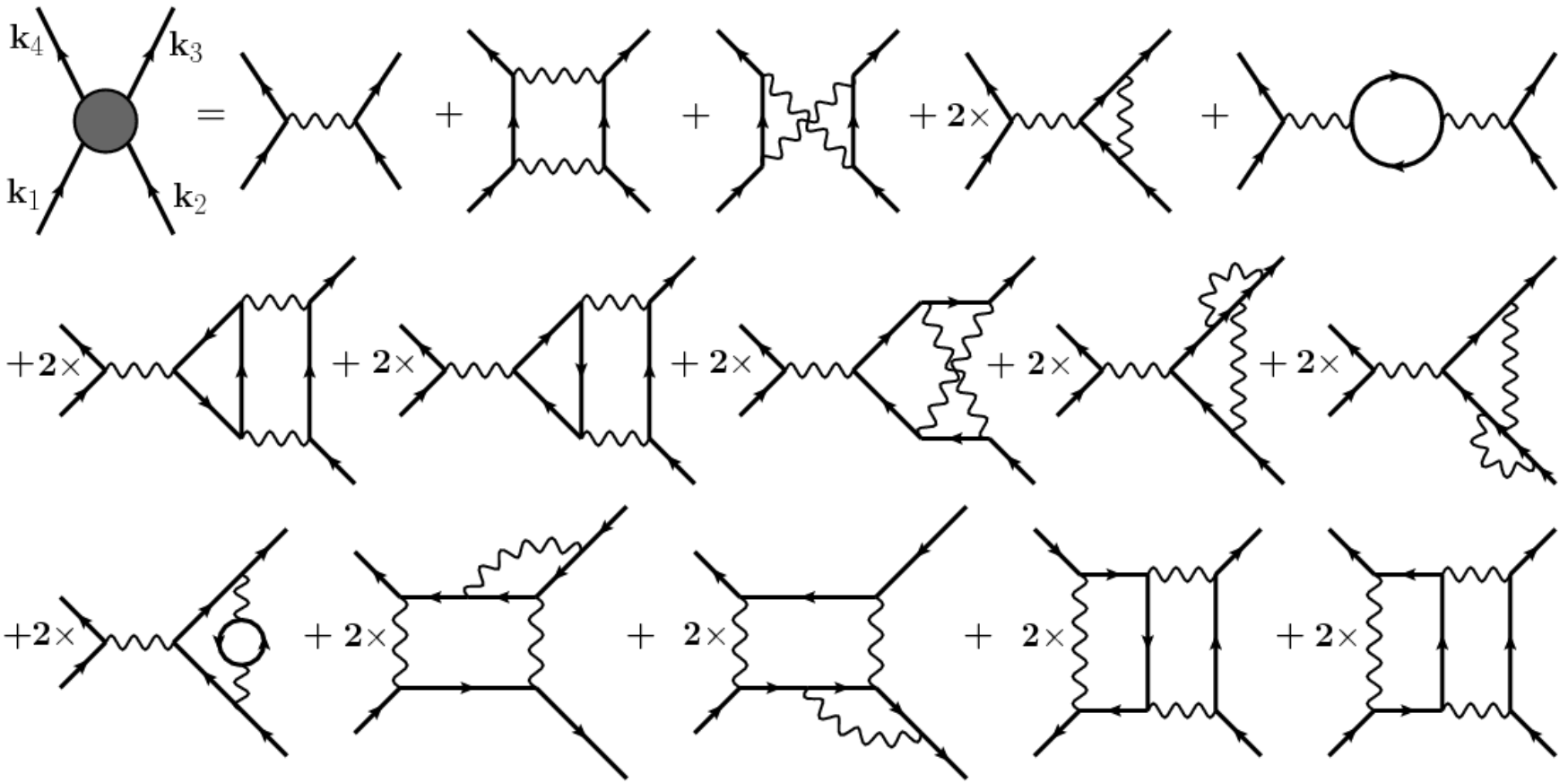
Interacción electromagnética



...

- Recientemente: ***12,672*** diagramas para el g-2 del electrón
- Phys Rev Lett 109, 111807 (2012)

Suma de historias

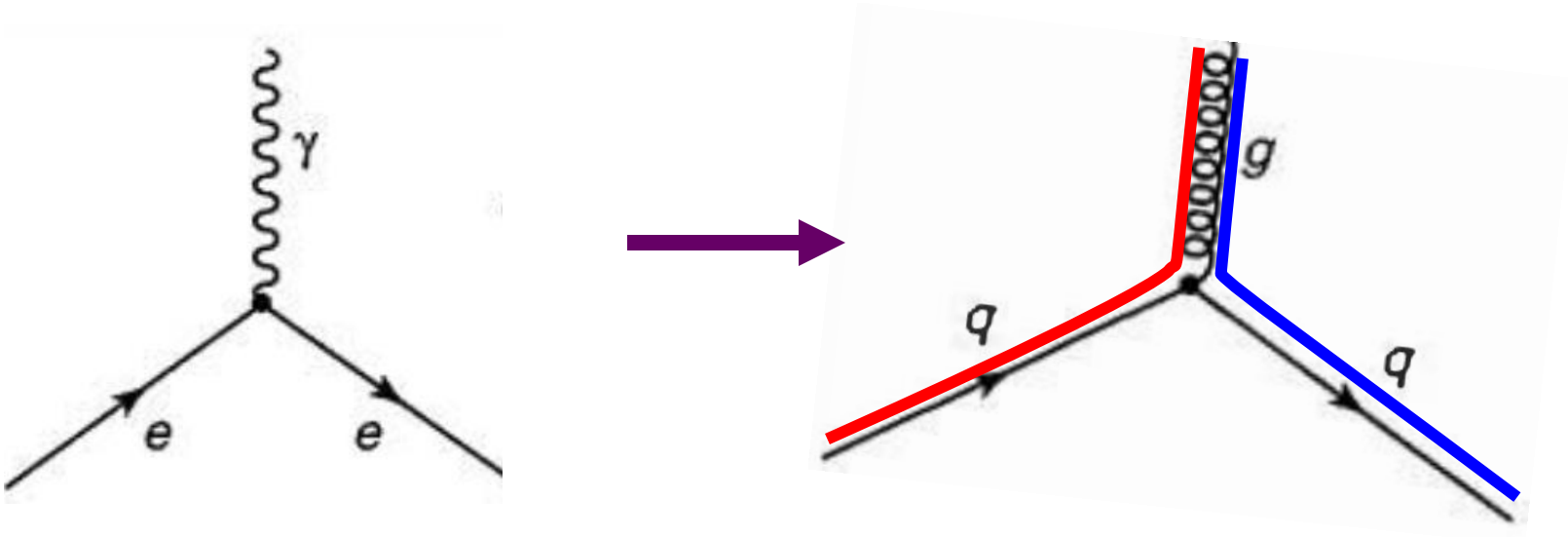


+ …

Interacción Nuclear Fuerte (Cromodinámica Cuántica)

Interacción nuclear fuerte

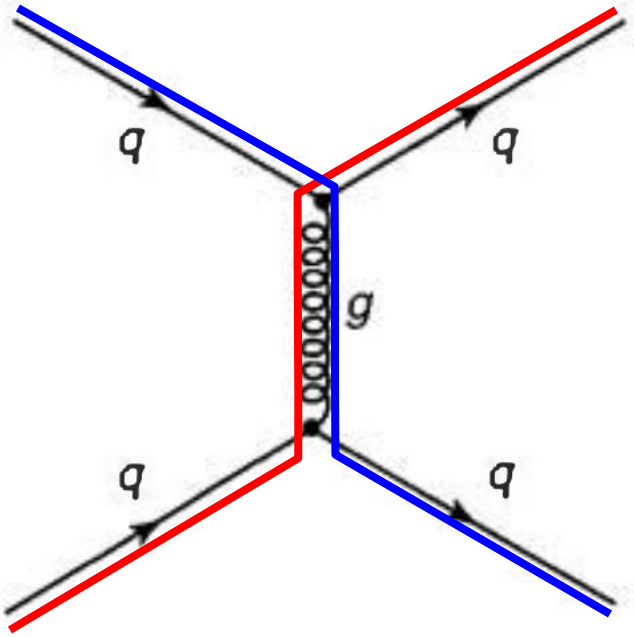
- ***El "color"*** juega el papel de la carga eléctrica



- Estructura similar, pero con diferencias significativas:
  - Tres tipos de color (y cada uno tiene su "negativo")
  - El color de un quark puede cambiar via la fuerza fuerte
  - Los gluones deben ***"llevarse" la differencia***

Interacción nuclear fuerte

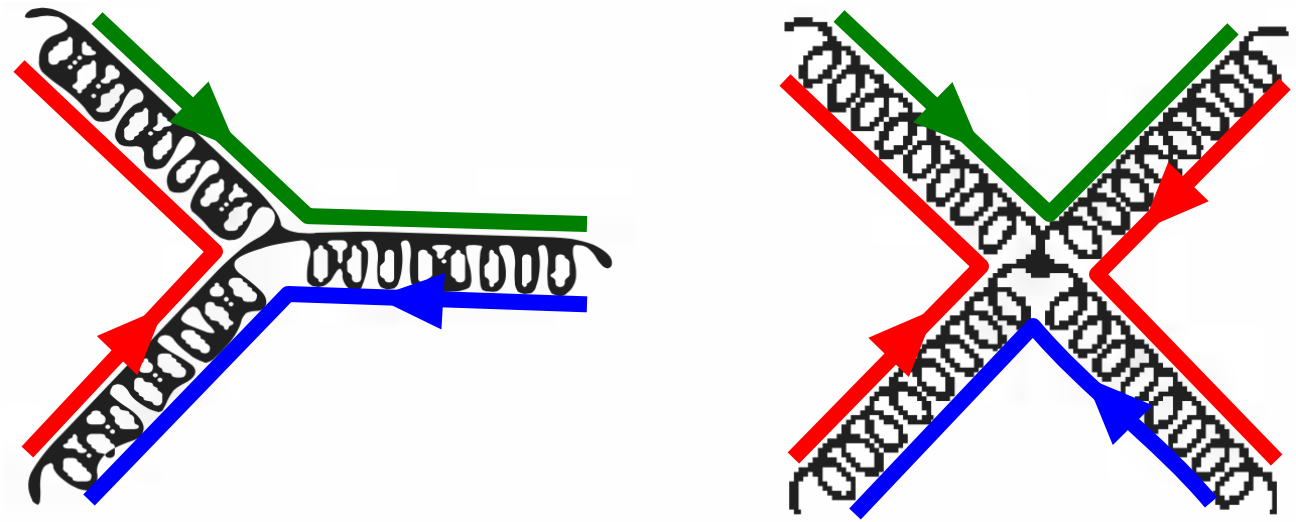
- El diagrama más simple de la fuerza entre quarks:



- Cada gluón debe tener dos colores (color y anticolor)
- 3 × 3 = 9 posibilidades (pero existen sólo 8 gluones)

Interacción nuclear fuerte

- En contraste con los fotones, los gluones tienen color



- Mucho más compleja que la interaccion electromagnética
- Posibilita la existencia de estados ligados (“glueballs”)
- En contraste con α_{EM} (=1/137), $\alpha_S > 1$!!! Qué hacer?

Interacción nuclear fuerte

- Con $\alpha_S > 1$, sería imposible “sumar los diagramas”
- Por fortuna, un efecto similar a …

  – Dielectric shielding of a charge

  – Polarizacion del vacío

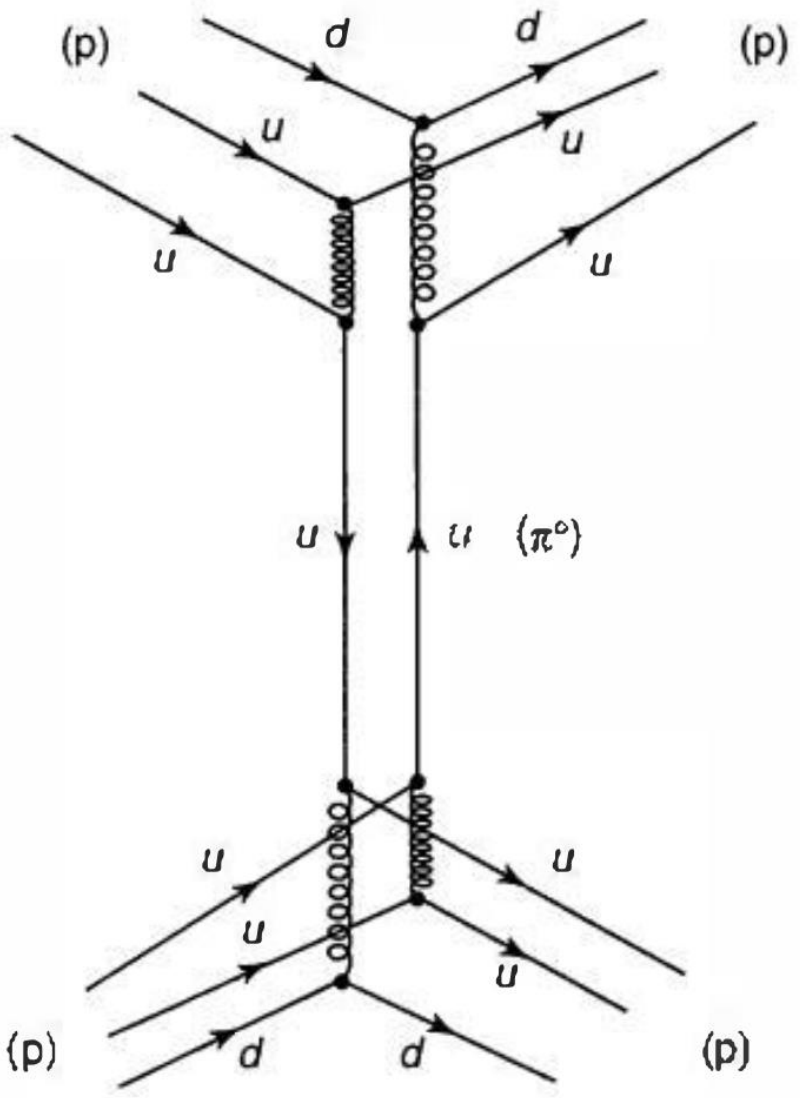
más características propias de QCD, resultan en que ***α_S se reduce progresivamente a distancias cortas.***

i.e., dentro de los hadrones (p, n, π, …), los quarks interactúan muy debilmente. Esto se denomina LIBERTAD ASINTÓTICA, y recupera la posibilidad de calcular las amplitudes por medio de diagramas de Feynman.

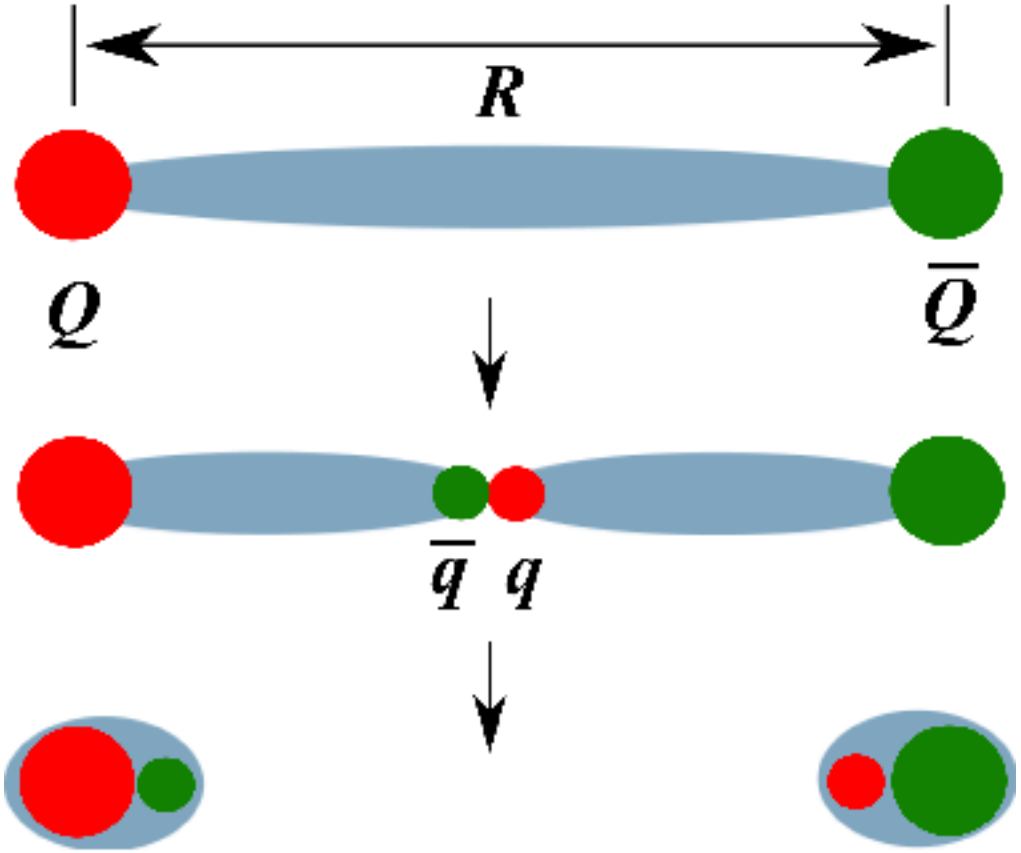
Interacción nuclear fuerte

- Otra diferencia:
  La naturaleza sólo permite combinaciones "sin color".

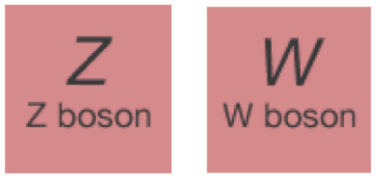
- Sólo observamos efectos indirectos del color



Confinamiento del color



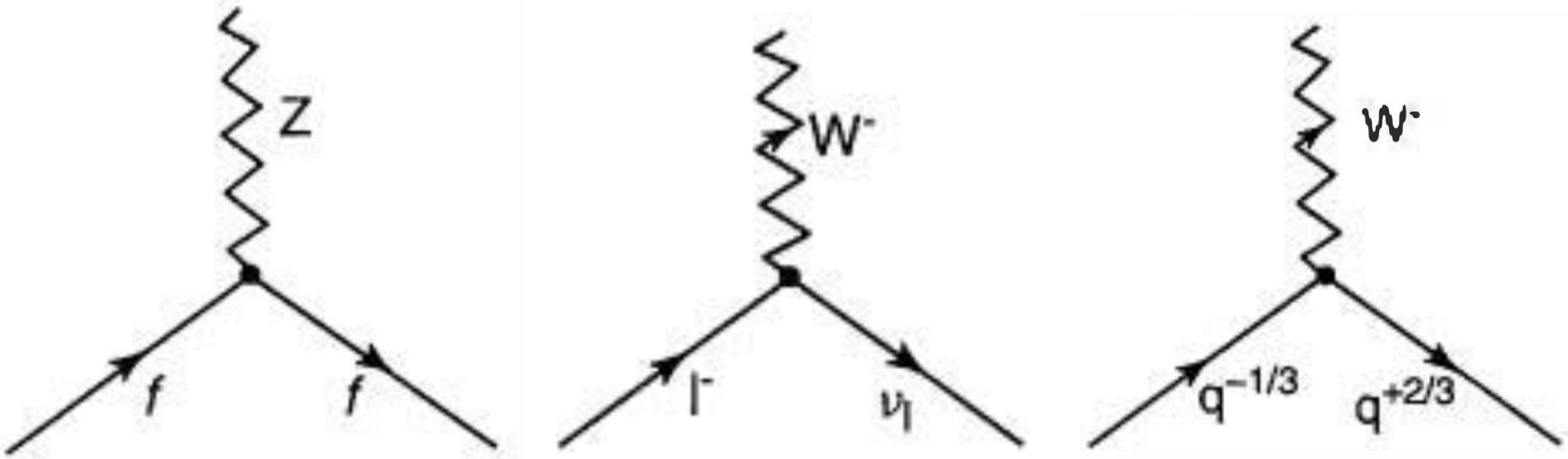
Fuerza Nuclear Débil
(Weak Interaction)



Interacción débil

- Los leptones no tienen color → no interactùan vía QCD
- Los neutrinos no tienen carga → no interactúan vía EM
- Pero **todos participan en la interacción débil**
- Dos tipos de interacción débil: neutral (Z), cargada (W)

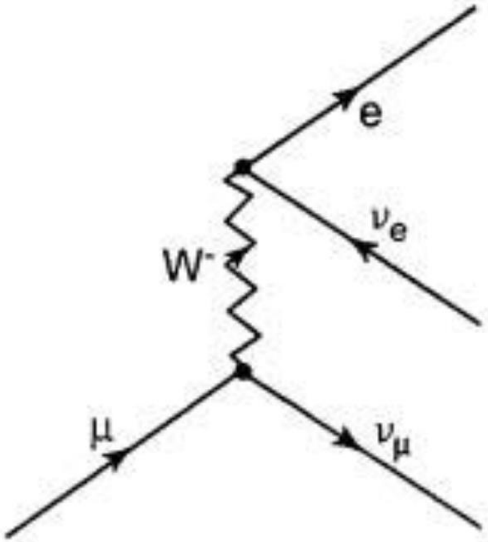
NEUTRA **CARGADA**

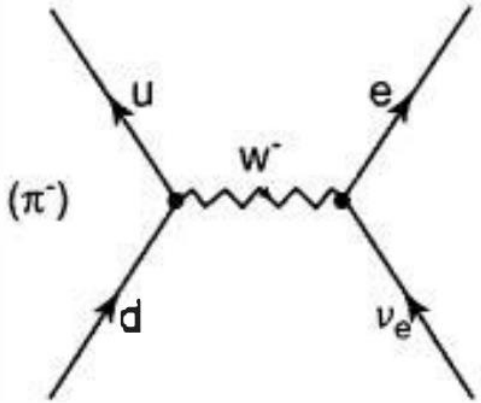


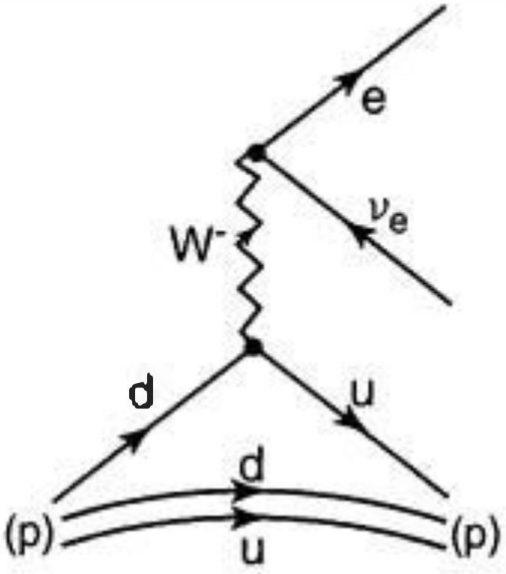
LEPTONES **QUARKS**

Interacción débil cargada

- Algunos ejemplos:



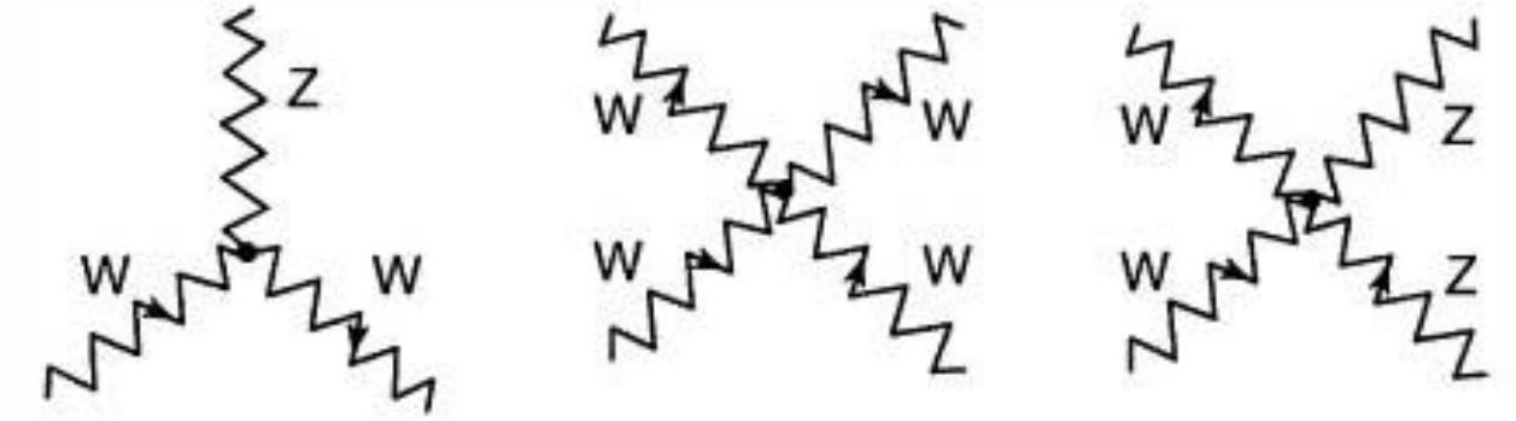




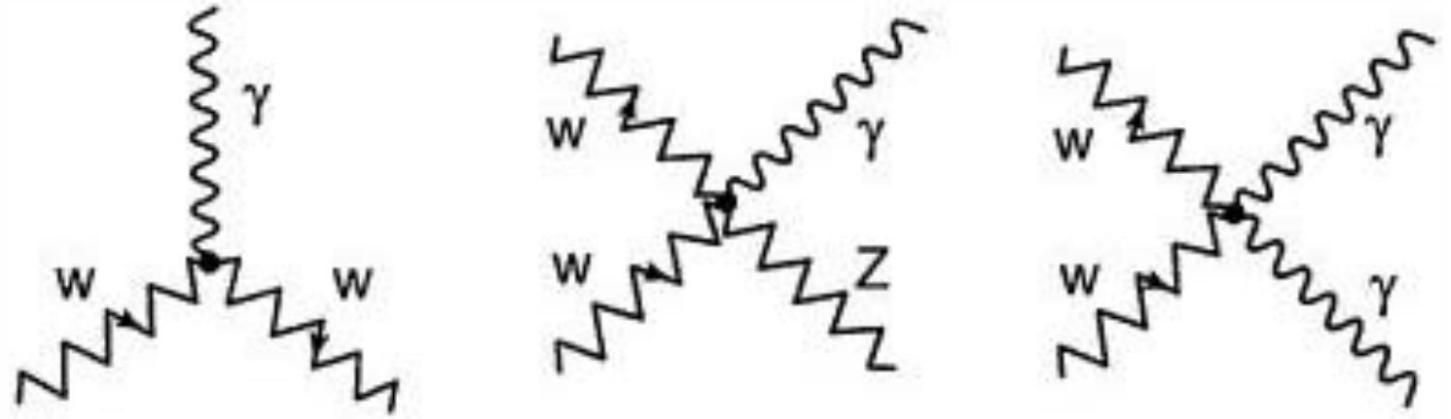
$$\bar{m} \rightarrow e^- + n_m + \bar{n}_e \qquad p^- \rightarrow e^- + \bar{n}_e \qquad n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{n}_e$$

Acoplamientos EM y débiles del W y el Z

- Similarmente al gluón, W y Z interactuan entre ellos:

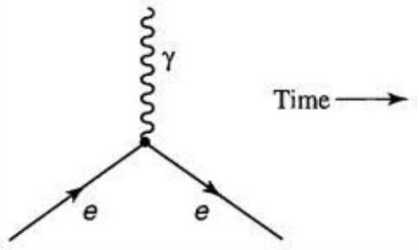


- El W tiene carga eléctrica → interactúa con el fotón:

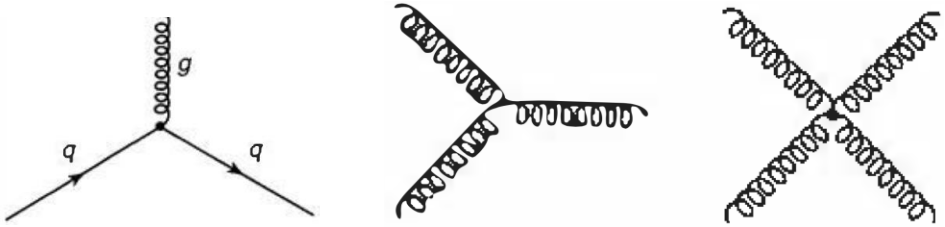


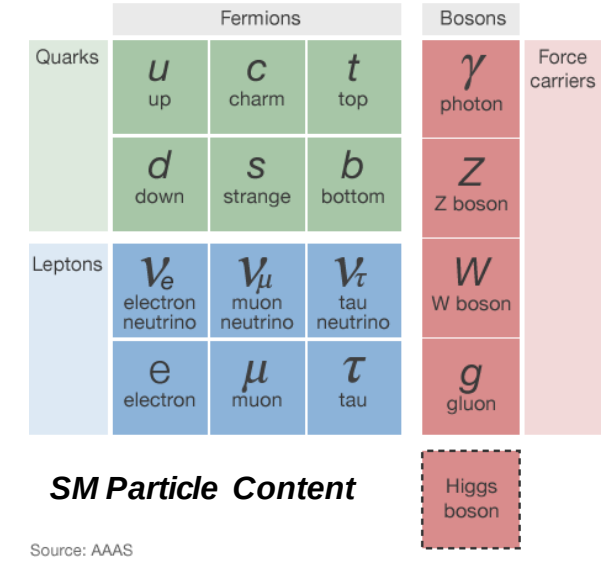
El Modelo Estándar en una página

QED:



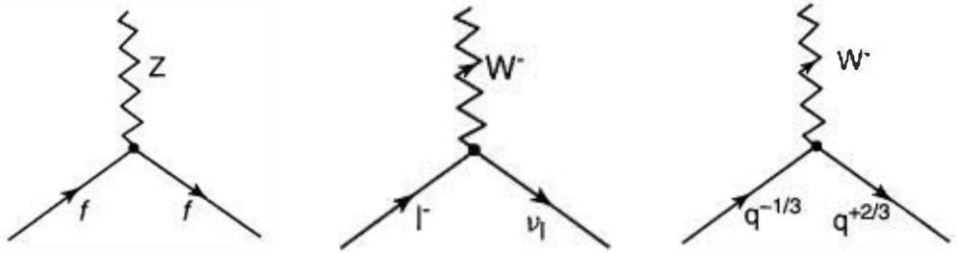
QCD:





SM Particle Content

Weak:

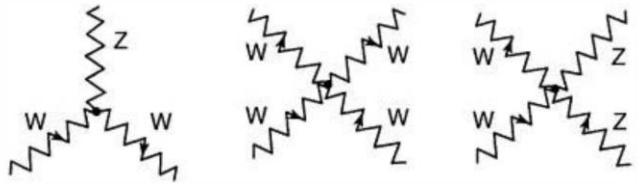


Cabibbo-Kobayashi-Maskawa matrix

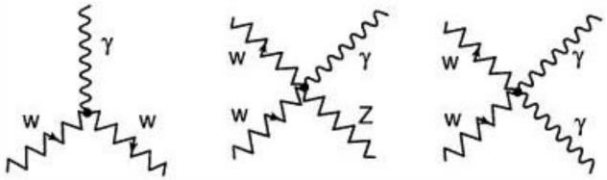
$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

NO Flavor-Changing-Neutral-Currents

W/Z:



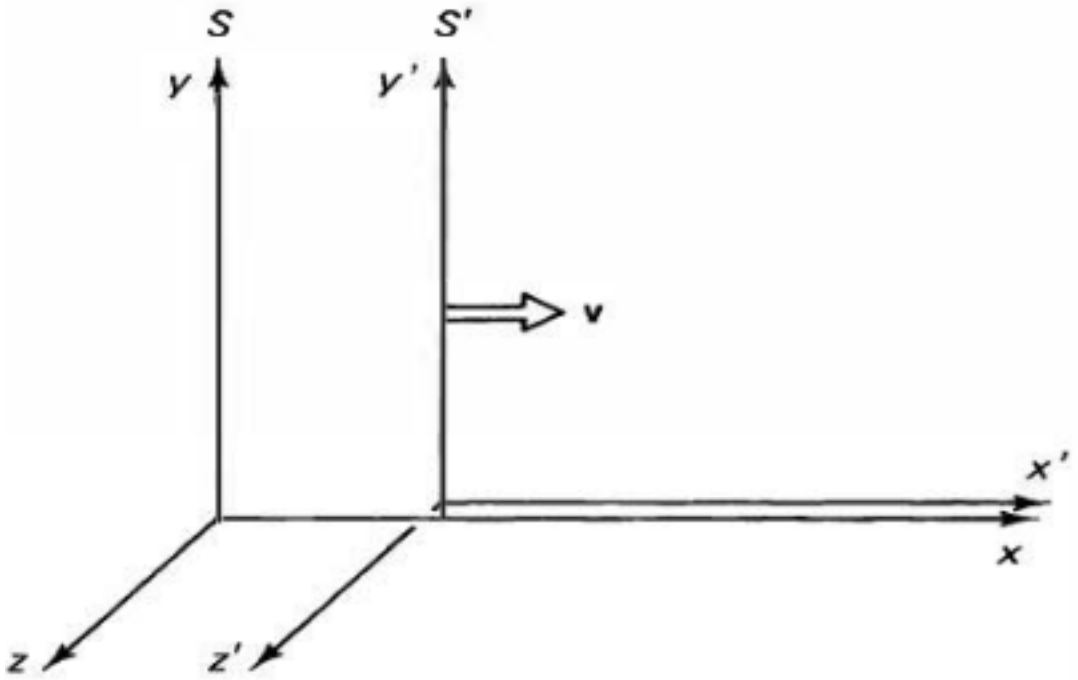
W/Z/γ:



Cinemática Relativista

Transformaciones de Lorentz

- S' se mueve con velocidad ***v*** con respecto a S
- a lo largo del eje común x/x'
- $t = t' = 0$ cuando $x = x' = 0$.



Transformaciones de Lorentz

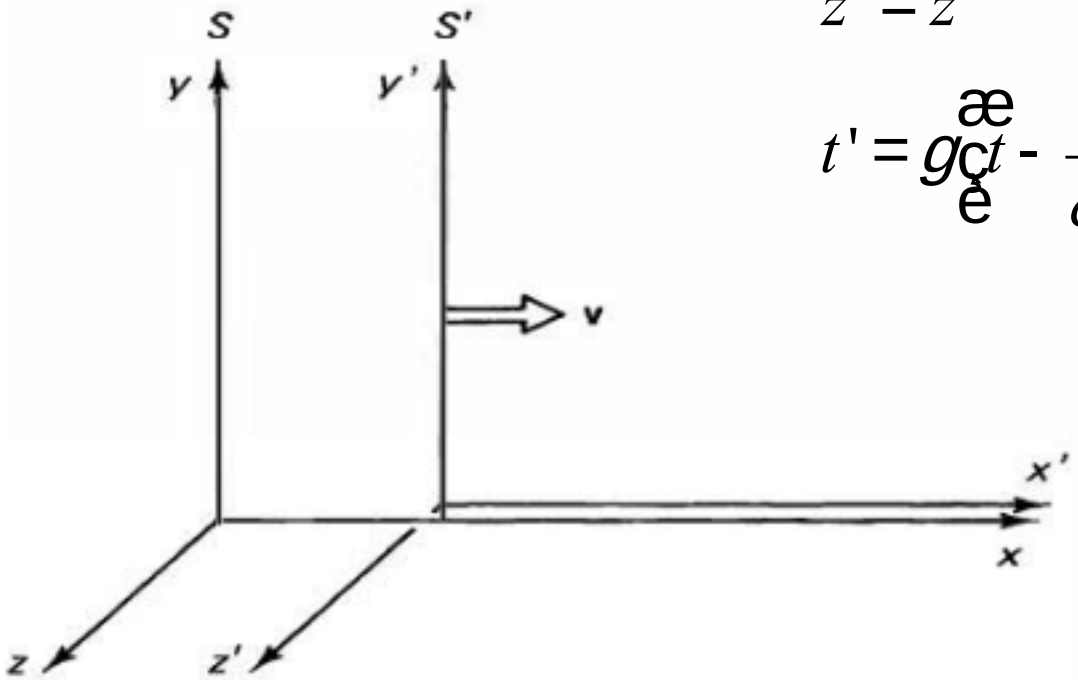
Un evento occurre en (x,y,z) y tiempo t in S; coordenadas en S':

$$x' = \gamma(x - vt) \qquad x = \gamma(x' + vt)$$

$$y' = y \qquad y = y'$$

$$z' = z \qquad z = z'$$

$$t' = \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right) \qquad t = \gamma\left(t' + \frac{v}{c^2}x\right)$$



$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Inverse transformation: $v \rightarrow -v$

Consecuencias

- Relatividad de la simultaneidad:
  eventos A y B, simultáneos en S, pero en posiciones distintas, *no son simultáneos en S'*:

$$t'_A = t'_B + \frac{\gamma v}{c^2}(x_B - x_A)$$

- Contracción de Lorentz:
  Objeto en reposo en S', de $x'=0$ a L'; longitud en S?
  - Sus extremos en S (a $t=0$): $x=0,\ x = L'/\gamma$ (usando las TL)
  - Longitud = L'/γ
  - $\gamma > 1$, por tanto los objetos en movimiento se contraen por un factor γ

Consequences

- Dilatación del tiempo:
  - Un reloj en $x'=0$ emite señales en $t'=0$, $t'=T'$; interval in S? de $t=0$ a ($t'=T'$, $x'=0$), so $t=\gamma T'$
  - $T = \gamma T'$; el reloj en S mide un intervalo más largo
  - *"Los relojes en movimiento se retrasan"*

Esto afecta todos los procesos

- Incluyendo el "reloj interno" de las partículas elementales
- Las partículas en movimiento duran más por un factor γ
- Ejemplos:
  - Muones provenientes de capas superiores de la atmósfera
  - Mesones B en detectores de partículas

Consecuencias

Resúmen:

- ***Las longitudes se contraen***
- ***Los tiempos se dilatan***
- ***Las velocidades nunca superan c***

Algunos ejercicios breves

v	v [m/s]	beta	gamma
130 km/h			
14,000 km/h			

$$\frac{1}{\sqrt{1+x}} = 1 - \tfrac{1}{2}x + \tfrac{3}{8}x^2 - \tfrac{5}{16}x^3 + \ldots$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} = 1 + \tfrac{1}{2}\beta^2 + \tfrac{3}{8}\beta^4 + \tfrac{5}{16}\beta^6 + \ldots$$

Algunos ejercicios breves

v	v [m/s]	beta	gamma
130 km/h	36.11	1.2×10^{-7}	1
14,000 km/h	3,888.9	1.3×10^{-5}	Diff=8.45×10^{-11}

$$\frac{1}{\sqrt{1+x}} = 1 - \tfrac{1}{2}x + \tfrac{3}{8}x^2 - \tfrac{5}{16}x^3 + \ldots$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$\frac{1}{\sqrt{1-b^2}} = 1 + \tfrac{1}{2}b^2 + \tfrac{3}{8}b^4 + \tfrac{5}{16}b^6 + \ldots$$

Algunos ejercicios breves

v	v [m/s]	beta	gamma
130 km/h	36.11	1.2×10^{-7}	1
14,000 km/h	3,888.9	1.3×10^{-5}	Diff=8.45×10^{-11}
0.5 c			
0.99 c			

$$\frac{1}{\sqrt{1+x}} = 1 - \tfrac{1}{2}x + \tfrac{3}{8}x^2 - \tfrac{5}{16}x^3 + \ldots$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$\frac{1}{\sqrt{1-b^2}} = 1 + \tfrac{1}{2}b^2 + \tfrac{3}{8}b^4 + \tfrac{5}{16}b^6 + \ldots$$

Algunos ejercicios breves

v	v [m/s]	beta	gamma
130 km/h	36.11	1.2×10^{-7}	1
14,000 km/h	3,888.9	1.3×10^{-5}	Diff=8.45×10^{-11}
0.5 c		0.5	1.15
0.99 c		0.99	7.09

$$\frac{1}{\sqrt{1+x}} = 1 - \tfrac{1}{2}x + \tfrac{3}{8}x^2 - \tfrac{5}{16}x^3 + \ldots$$

$$\frac{1}{\sqrt{1-b^2}} = 1 + \tfrac{1}{2}b^2 + \tfrac{3}{8}b^4 + \tfrac{5}{16}b^6 + \ldots$$

Algunos ejercicios breves

v	v [m/s]	beta	gamma
130 km/h	36.11	1.2×10^{-7}	1
14,000 km/h	3,888.9	1.3×10^{-5}	Diff=8.45×10^{-11}
0.5 c		0.5	1.15
0.99 c		0.99	7.09
			6,500

$$\frac{1}{\sqrt{1+x}} = 1 - \tfrac{1}{2}x + \tfrac{3}{8}x^2 - \tfrac{5}{16}x^3 + \ldots$$

$$\frac{1}{\sqrt{1-b^2}} = 1 + \tfrac{1}{2}b^2 + \tfrac{3}{8}b^4 + \tfrac{5}{16}b^6 + \ldots$$

$$g = \frac{1}{\sqrt{1-b^2}} \rightarrow b = \sqrt{1 - 1/g^2}$$

$$\sqrt{1+x} = 1 + \tfrac{1}{2}x - \tfrac{1}{8}x^2 + \tfrac{1}{16}x^3 - \ldots$$

$$x = -(1/6{,}500)^2 = -2.367' \; 10^{-8}$$

Algunos ejercicios breves

v	v [m/s]	beta	gamma
130 km/h	36.11	1.2×10^{-7}	1
14,000 km/h	3,888.9	1.3×10^{-5}	Diff=8.45×10^{-11}
0.5 c		0.5	1.15
0.99 c		0.99	7.09
Diff =1.18×10^{-8}		0.9999999753	6,500

$$\frac{1}{\sqrt{1+x}} = 1 - \tfrac{1}{2}x + \tfrac{3}{8}x^2 - \tfrac{5}{16}x^3 + \ldots$$

$$\frac{1}{\sqrt{1-b^2}} = 1 + \tfrac{1}{2}b^2 + \tfrac{3}{8}b^4 + \tfrac{5}{16}b^6 + \ldots$$

$$g = \frac{1}{\sqrt{1-b^2}} \rightarrow b = \sqrt{1 - 1/g^2}$$

$$\sqrt{1+x} = 1 + \tfrac{1}{2}x - \tfrac{1}{8}x^2 + \tfrac{1}{16}x^3 - \ldots$$

$$x = -\left(1/6{,}500\right)^2 = -2.367' \; 10^{-8}$$

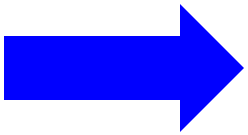
Notacion de cuadrivectores

Cuadrivector de posicion y tiempo:

$$x^0 = ct, \quad x^1 = x, \quad x^2 = y, \quad x^3 = z$$

Las T. de Lorentz toman una forma simétrica:

$$t' = \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right)$$
$$x' = \gamma(x - vt)$$
$$y' = y$$
$$z' = z$$



$$x^{0\prime} = \gamma(x^0 - \beta x^1)$$
$$x^{1\prime} = \gamma(x^1 - \beta x^0)$$
$$x^{2\prime} = x^2$$
$$x^{3\prime} = x^3$$

$$\beta \equiv \frac{v}{c}$$

Notación de cuadrivectores

que puede escribirse como:

$$x^{m'} = \sum_{\nu=0}^{3} \Lambda^{m}_{n} x^{n} \qquad (m = 0,1,2,3)$$

donde

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \gamma & -\gamma\beta & 0 & 0 \\ -\gamma\beta & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Convención de Einstein:

$$x^{m'} = \Lambda^{m}_{n} x^{n}$$

Notación de cuadrivectores

Muy concisa, permite generalizaciones.

- Funciona tambien para transformations a lo largo de otros ejes

De *S* a *S'* cambian los valores de las coordenadas, pero la siguiente combinación mantiene el mismo valor:

$$I \circ (x^0)^2 - (x^1)^2 - (x^2)^2 - (x^3)^2$$
$$= (x^{0\prime})^2 - (x^{1\prime})^2 - (x^{2\prime})^2 - (x^{3\prime})^2$$

Para expresarlo como suma: $\sum_{m=0}^{3} x^m x^m$

necesitamos antes cambiar el signo de las componentes espaciales.

Notación de cuadrivectores

Podemos hacerlo por medio de

$$g = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

haciendo

$$I = \sum_{\mu=0}^{3} \sum_{\nu=0}^{3} g_{\mu\nu} x^{\mu} x^{\nu} = g_{\mu\nu} x^{\mu} x^{\nu}$$

Y podemos definir $x_{\mu} \equiv g_{\mu\nu} x^{\nu}$

Notación de cuadrivectores

De esa forma

$$I \circ x_m x^m = x^m x_m$$

Constituye una expresion muy simple del invariante.

Vale la pena tanta notación sólo para incluir un signo negativo?

Sí, pues se generaliza para coordenadas no cartesianas y para Relatividad General.

Notación de cuadrivectores

Varios objetos se transforman como el vector de posicion-tiempo:

$$a^{m'} = \Lambda^{m}_{n} a^{n}$$ **"contravariante"**

Definimos un ***cuadrivector*** como cualquier objeto que se transforme de esta manera cuando vamos de un sistema inercial a otro.

Siempre podemos obtener un vector correspondiente con signos negativos en las componentes espaciales:

$$a_m = g_{mn} a^n$$ **"covariante"**

(que es fácil de revertir: $a^m = g^{mn} a_n$)

[formalmente, $g_{\mu\nu}$ son los elementos de g^{-1}, pero es su propia inversa]

Energía y momento

Al considerar dos sistemas de referencia, el ***tiempo propio*** avanza menos

$$d\tau = \frac{dt}{\gamma}$$

Este también es un invariante (los observadores coinciden sobre su valor para partículas, satélites o viajeros).

Una cantidad relacionada a la velocidad $v = \frac{dx}{dt}$

es la "velocidad propia": $\eta = \frac{dx}{d\tau}$

$$\eta = \gamma v$$

Util porque, bajo una TL, ***sólo el numerador*** se transforma (y como cuadrivector); también eta es un cuadrivector.

Energía y momento

Componentes: $$h^m = g(c, v_x, v_y, v_z)$$

En este caso, el invariante $\eta_\mu \eta^\mu$ es:

$$h_m h^m = g^2 (c^2 - v_x^2 - v_y^2 - v_z^2) = g^2 c^2 (1 - v^2 / c^2) = c^2$$

Cómo definir el ***momento***?

$$m\mathbf{v} \text{ or } m\boldsymbol{\eta} \quad ?$$

Es mejor usar η, pues eso hace su magnitud un invariante

$$p^m \text{ o } mh^m$$

Energía y momento

La 'velocidad propia' is a four-momentum, so also is p^{μ}

$$p^{m} \text{ o } mh^{m}$$

$$p^{0} = gmc$$

$$\mathbf{p} = gm\mathbf{v} = \frac{mv}{\sqrt{1 - v^{2}/c^{2}}}$$

We define the relativistic energy as

$$E = gmc^{2} = \frac{mc^{2}}{\sqrt{1 - v^{2}/c^{2}}}$$

So, the 0-th component of the four-momentum is E/c.

$$p^{m} = \left(\frac{E}{c}, p_{x}, p_{y}, p_{z}\right)$$

Energía y momento

El invariante $p_\mu p^\mu$:

De la definición:

$$p_m p^m = (m h_m)(m h^m) = m^2 h_m h^m = m^2 c^2$$

De sus componentes:

$$p_m p^m = \frac{E^2}{c^2} - \mathbf{p}^2$$

$$\frac{E^2}{c^2} - \mathbf{p}^2 = m^2 c^2$$

$$E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2$$

Energía y momento

Qué pasa si m=0?

La energía y momento serían 0?

$$\mathbf{p} = \frac{m\mathbf{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

no necesariamente si $v=c$!!

La ecuación $E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$

se mantiene.

Por tanto: $v = c, \quad E = |\mathbf{p}|\, c$

Y de Mecánica Cuántica $E = h\nu$

One-page summary

Maxwell equations → *c for* ***all observers*** → *Lorentz transformations*

$$t' = \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right)$$
$$x' = \gamma(x - vt)$$
$$y' = y$$
$$z' = z$$

$x^0 = ct,\quad x^1 = x,\quad x^2 = y,\quad x^3 = z$

$$x^{0\prime} = \gamma(x^0 - \beta x^1)$$
$$x^{1\prime} = \gamma(x^1 - \beta x^0)$$
$$x^{2\prime} = x^2$$
$$x^{3\prime} = x^3$$
$$\beta \equiv \frac{v}{c}$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \gamma & -\gamma\beta & 0 & 0 \\ -\gamma\beta & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Four-vector

$$x'^m = \Lambda^m_{\ n} x^n$$

time-position: $x^\mu = (ct, x, y, z)$

proper velocity: $\eta^\mu = dx^\mu/d\tau = \gamma(c, v_x, v_y, v_z)$

energy-momentum: $p^\mu = m\eta^\mu = (E/c, p_x, p_y, p_z)$

$$E = \gamma mc^2 = mc^2 + \tfrac{1}{2}mv^2 + \tfrac{3}{8}m\tfrac{v^4}{c^4} + \ldots$$

$$I \equiv (x^0)^2 - (x^1)^2 - (x^2)^2 - (x^3)^2$$

is ***Lorentz-invariant***

$$x_\mu \equiv g_{\mu\nu}x^\nu$$

$$g = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

contravariant

$$I = x_m x^m$$

covariant

Scalar product:

$$a \cdot b \equiv a_m b^m$$

Energy-momentum

$$p_m p^m = (mh_m)(mh^m) = m^2c^2$$
$$p_m p^m = \frac{E^2}{c^2} - \mathbf{p}^2$$

$$E^2 = m^2c^4 + \mathbf{p}^2c^2$$

Useful:

$$\mathbf{p} = \gamma m\mathbf{v}$$
$$E = \gamma mc^2$$

$$\mathbf{p}/E = \mathbf{v}/c^2$$
$$\mathbf{v} = \mathbf{p}c^2/E$$

For $v=c$, $E = h\nu$

¿Cómo se descubre una partícula?

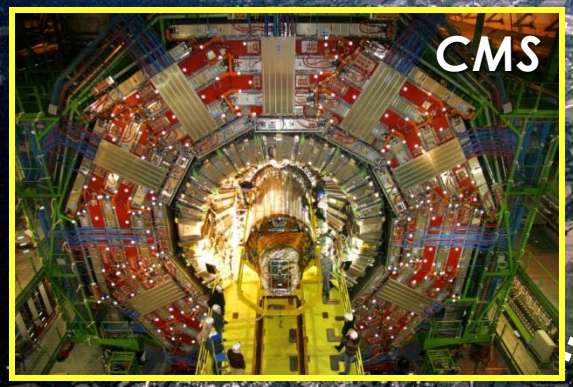
LHC

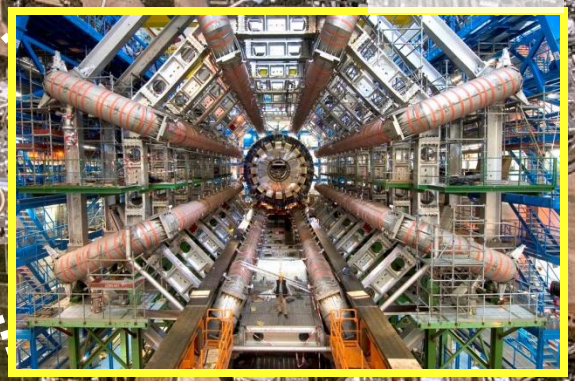
- 27 km de circunferencia, 50-150 m bajo tierra
- Dos haces de protones casi a la velocidad de la luz
- Energía almacenada: 350 MJ (~TGV a 155 km/h)

LHC

- ~1600 magnetos superconductores
- Nubes de 1.15×10^{11} protones: 30 micras por varios cm
- 40 millones de cruces por segundo

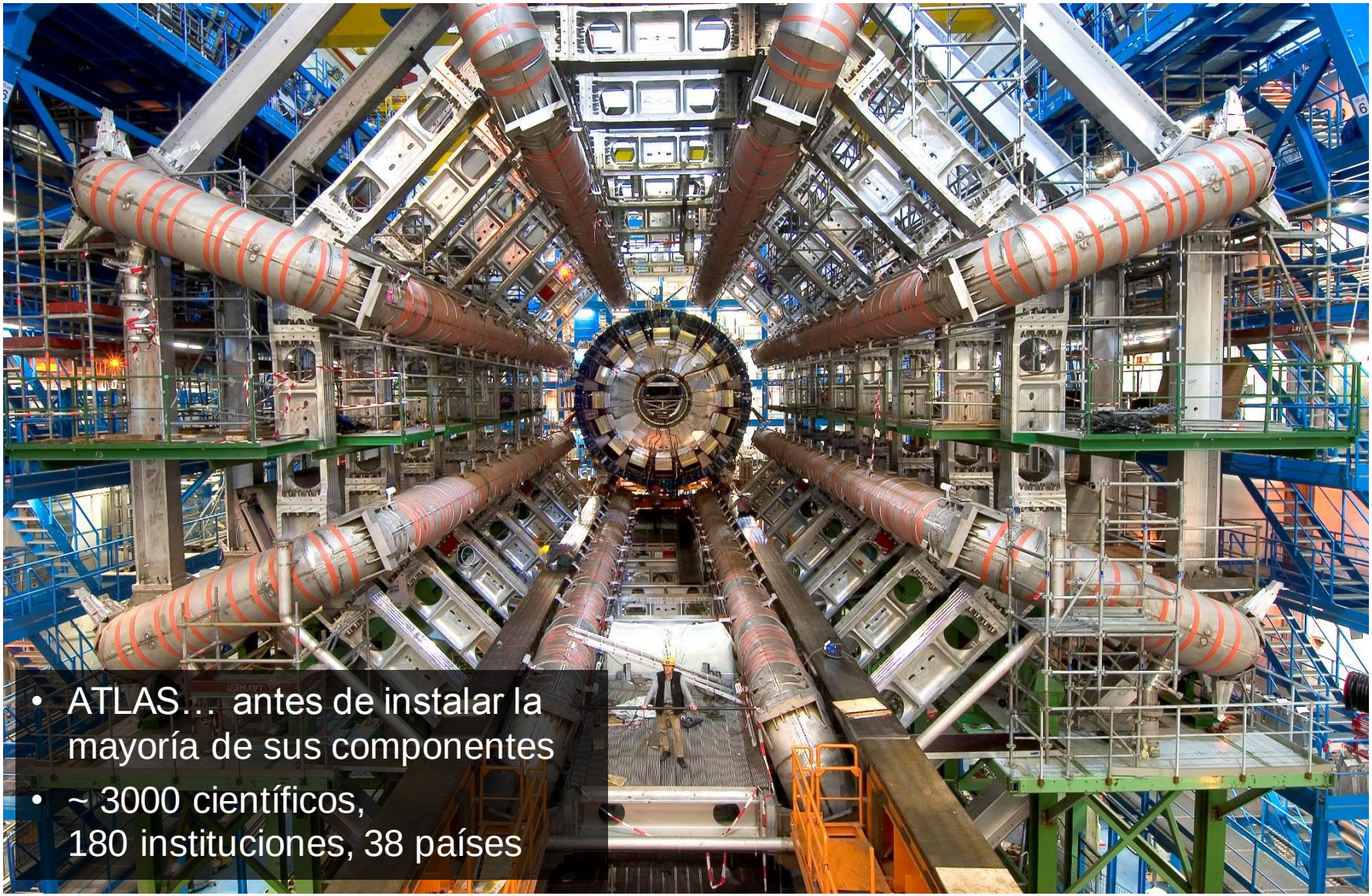
LHC





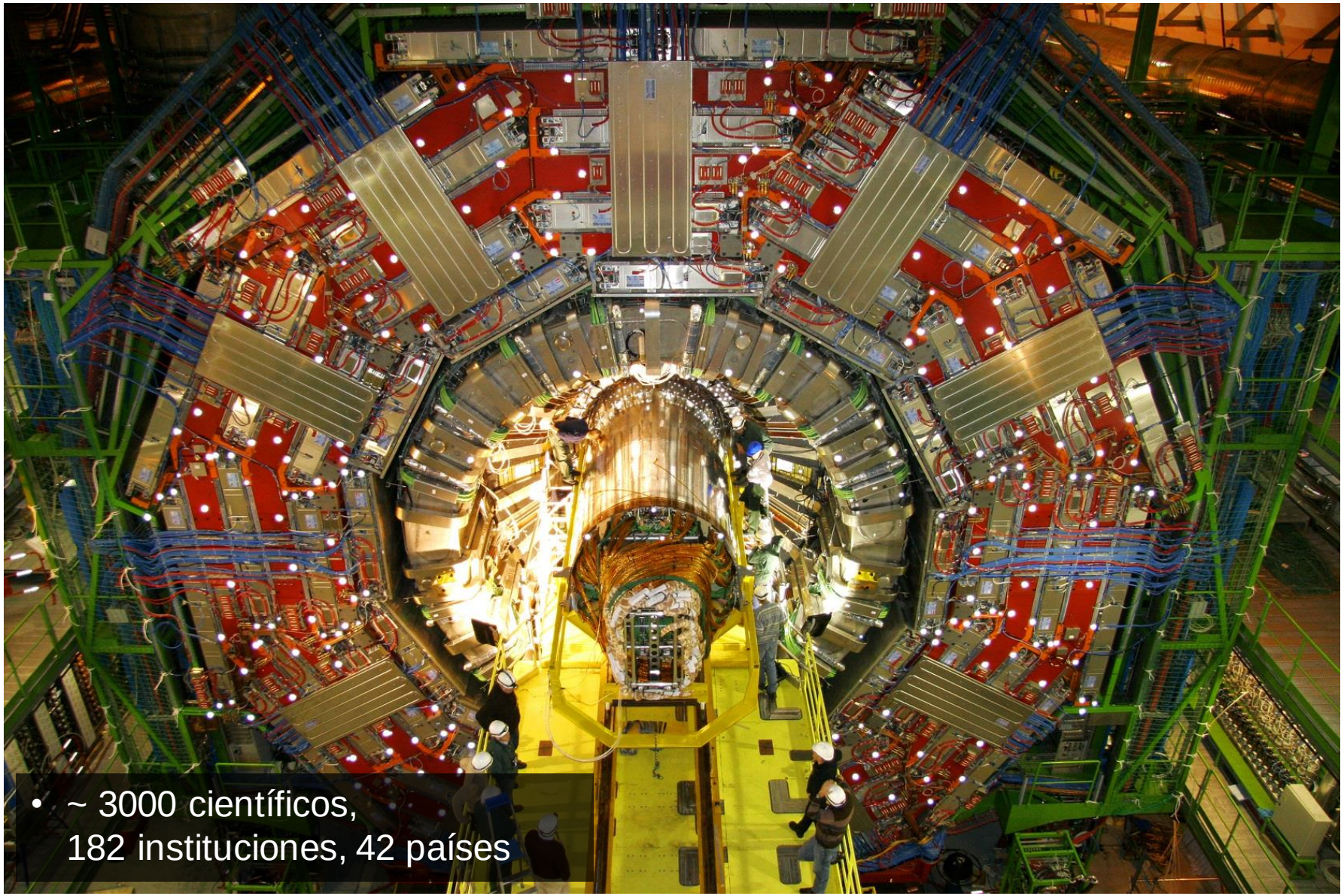
- Cuatro puntos de colisión
- Un detector en cada uno
- Descubrimiento: ATLAS, CMS

ATLAS

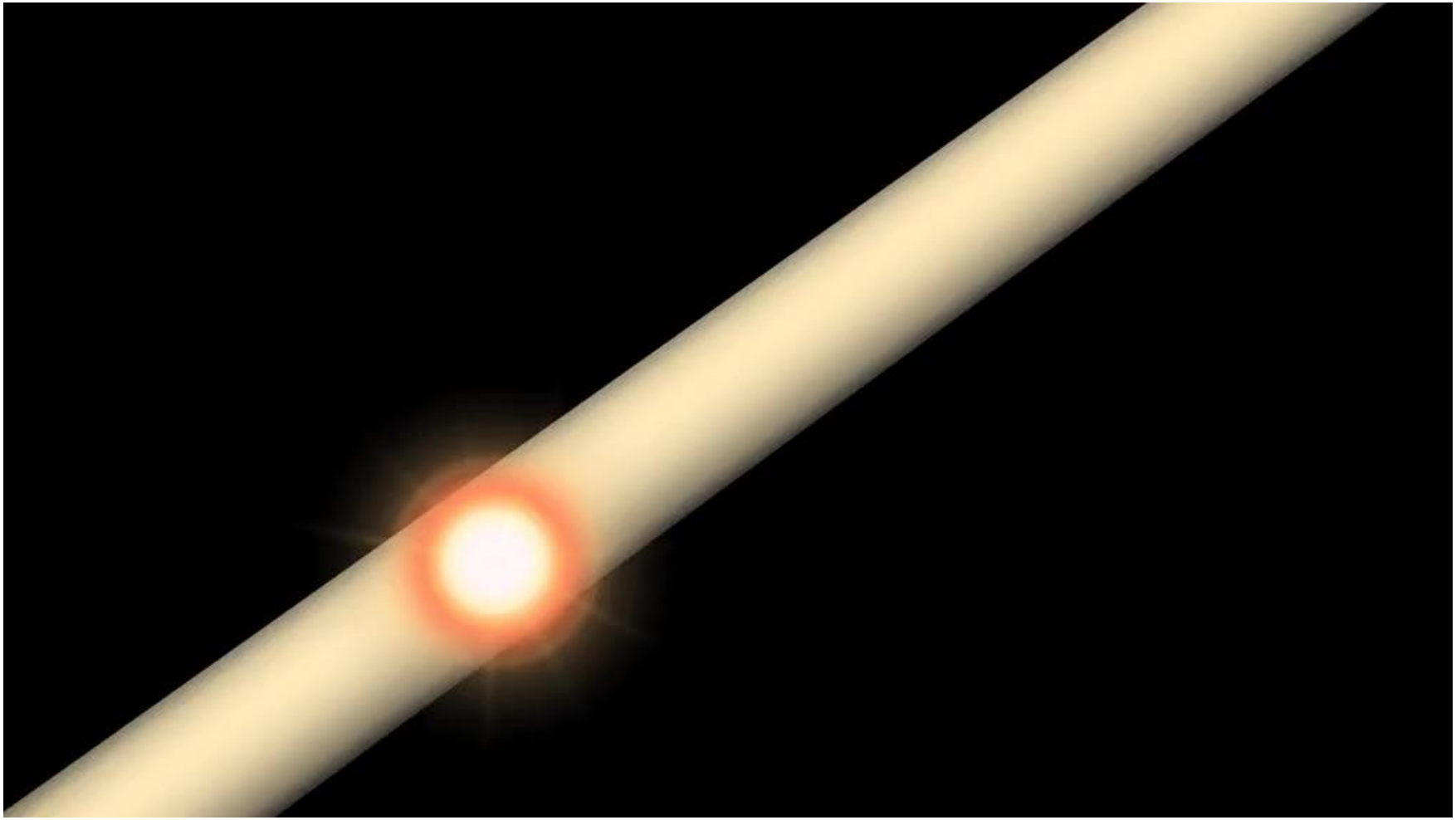


- ATLAS… antes de instalar la mayoría de sus componentes
- ~ 3000 científicos, 180 instituciones, 38 países

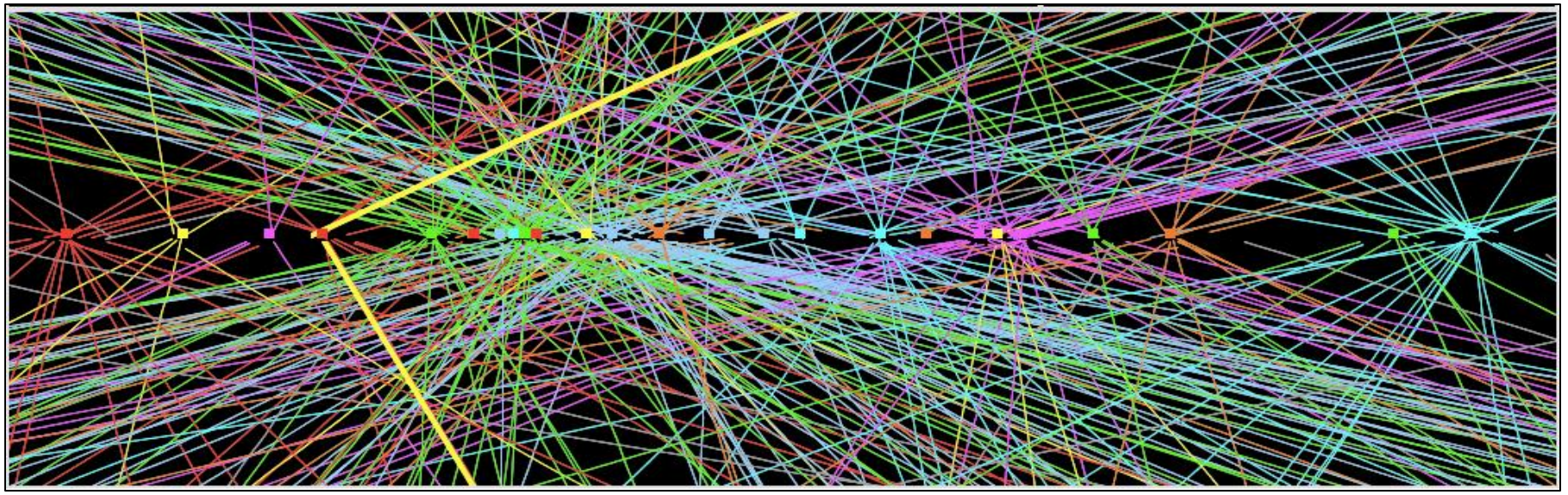
CMS



Un “evento”



Información generada

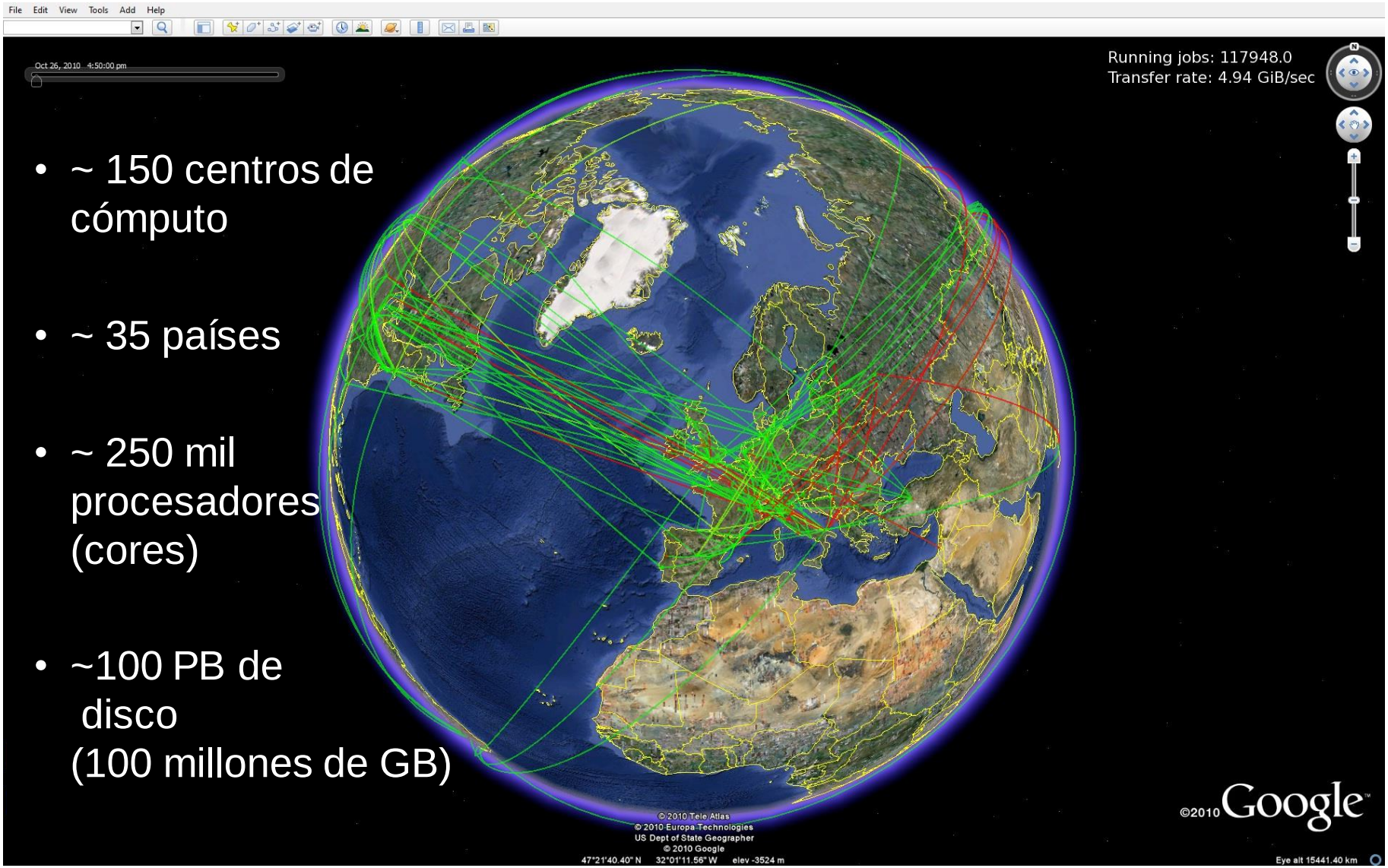


Evento Z→μμ de 2012 con 25 vértices reconstruidos

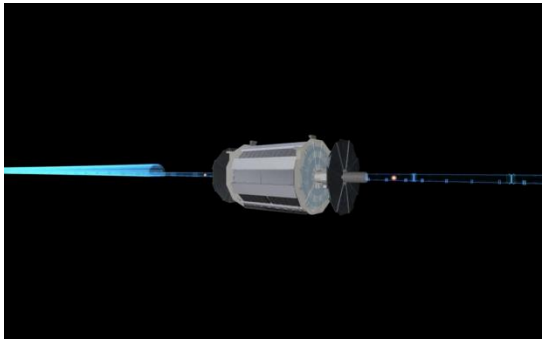
- En cada cruce, ~20 interacciones *pp*
- 20 M de cruces por segundo × 20 pp por cruce: 400 M pp/s
- Una primera etapa de proceso escoge “sólo” 400 colisiones/s
- Cada colisión pp produce cientos de partículas que deben almacenarse
- Si lo almacenáramos en CD’s de música, …

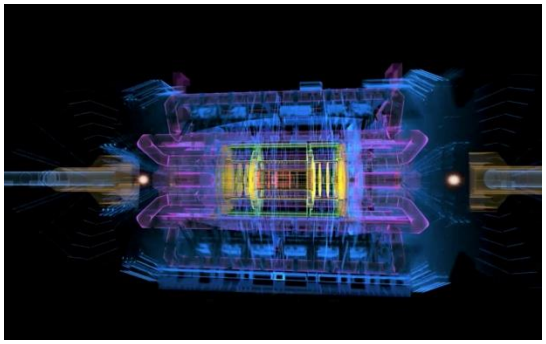
Red mundial de cómputo

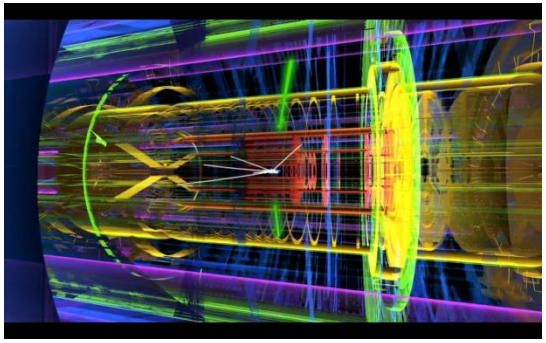
- ~ 150 centros de cómputo
- ~ 35 países
- ~ 250 mil procesadores (cores)
- ~100 PB de disco (100 millones de GB)

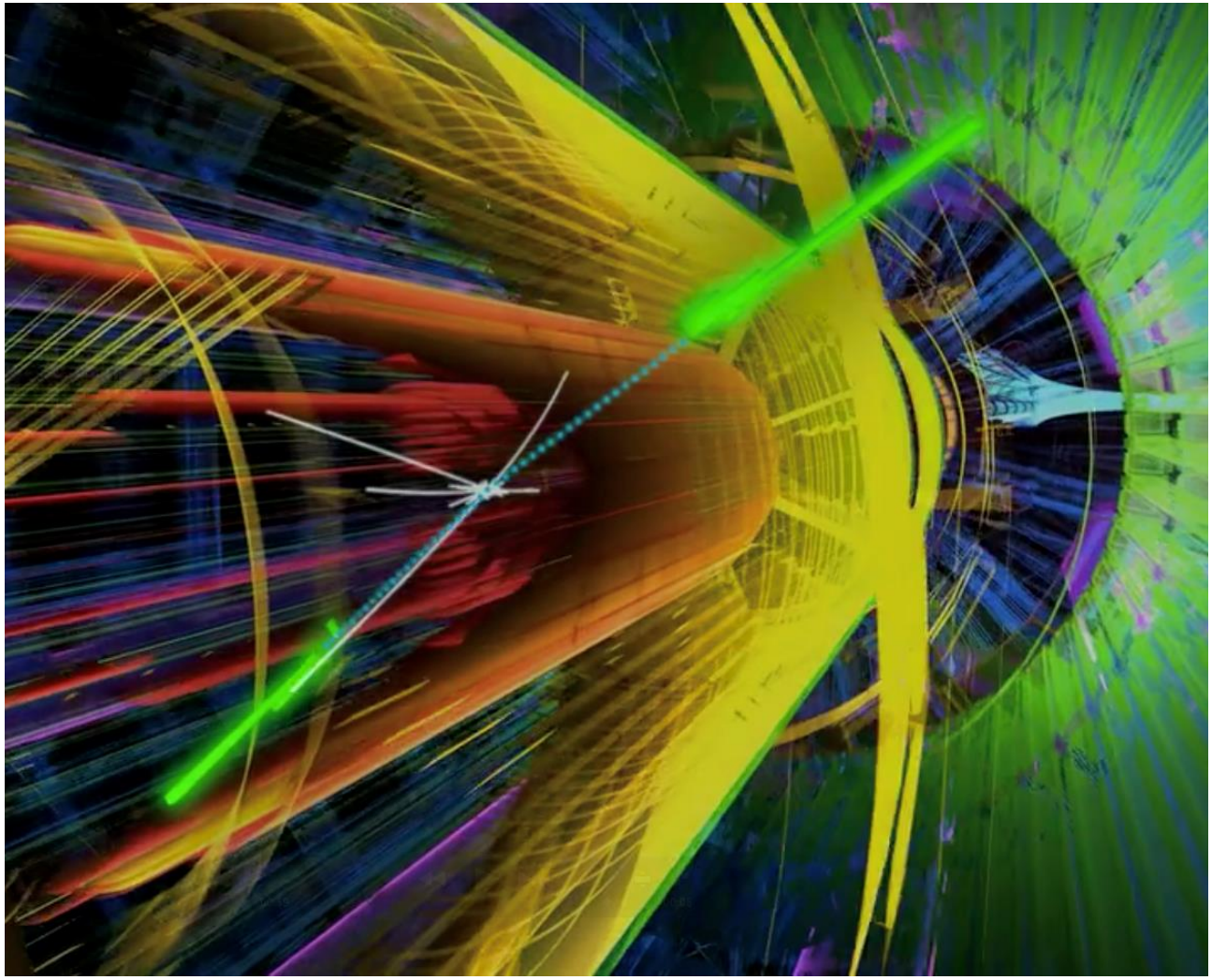


H□γγ

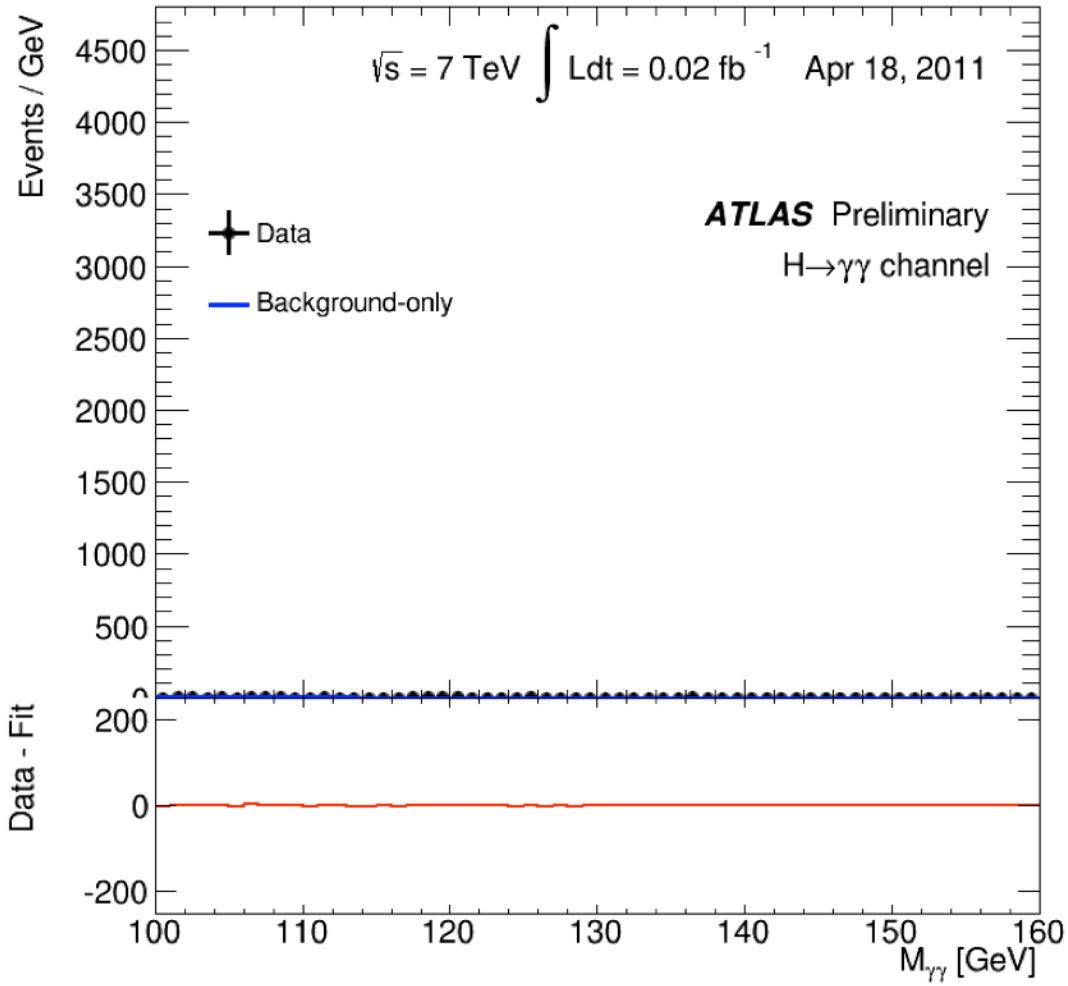




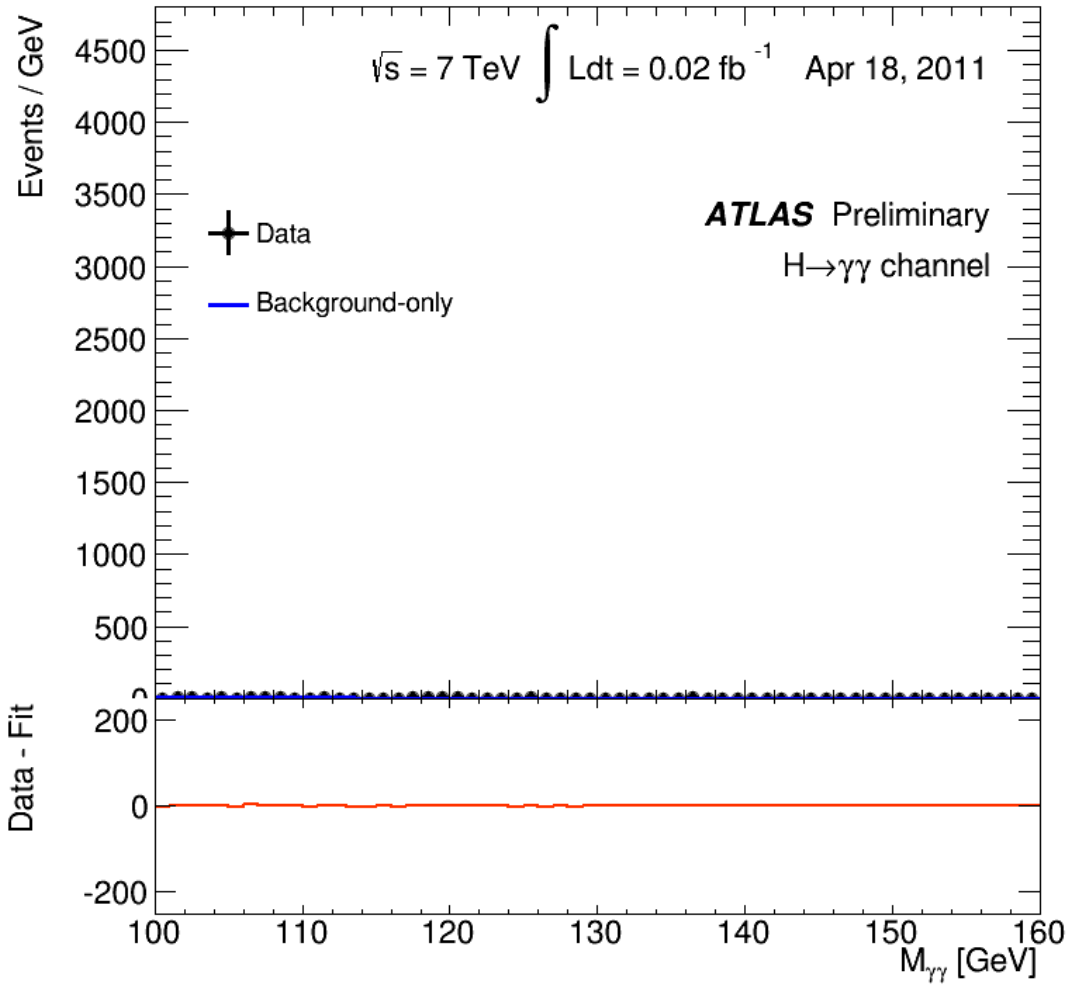




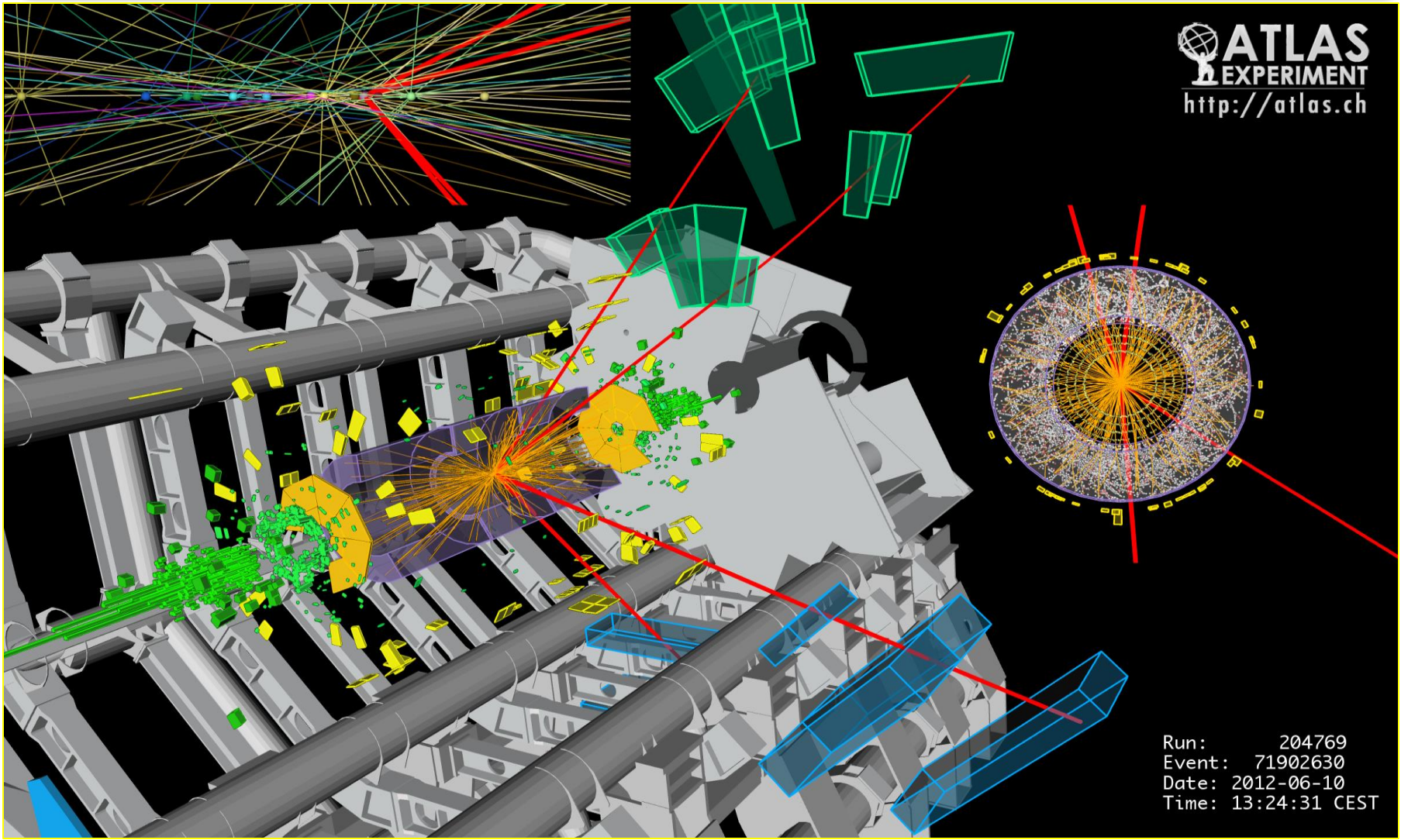
H□γγ


Events / GeV
4500
4000
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
200
0
-200
Data - Fit
100
110
120
130
140
150
160
$M_{\gamma\gamma}$ [GeV]
$\sqrt{s}$ = 7 TeV $\int$ Ldt = 0.02 fb^{-1} Apr 18, 2011
Data
Background-only
ATLAS Preliminary
H→γγ channel

H□γγ


Events / GeV
4500
4000
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
200
0
-200
Data - Fit
100
110
120
130
140
150
160
$M_{\gamma\gamma}$ [GeV]
$\sqrt{s}$ = 7 TeV $\int$ Ldt = 0.02 fb^{-1} Apr 18, 2011
ATLAS Preliminary
H→γγ channel
Data
Background-only

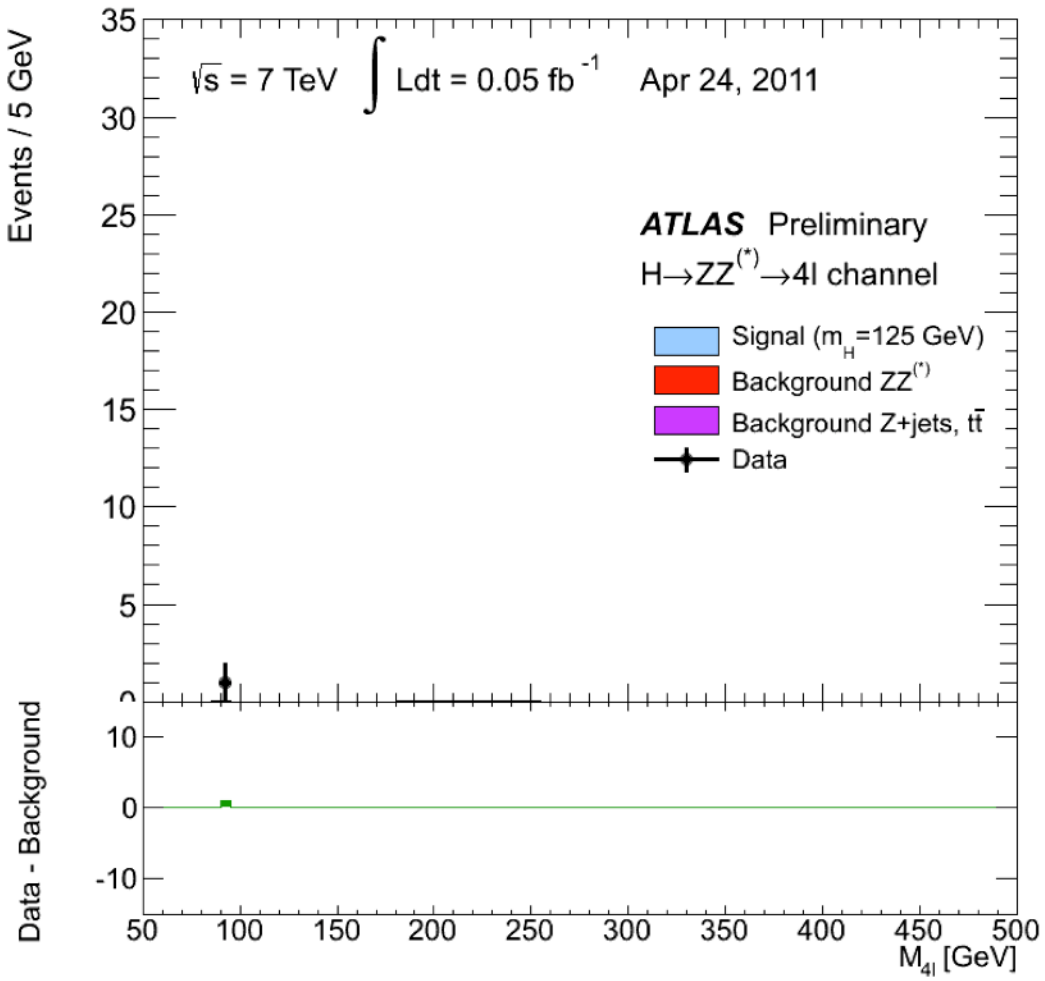
H□ZZ(*)□4 leptones



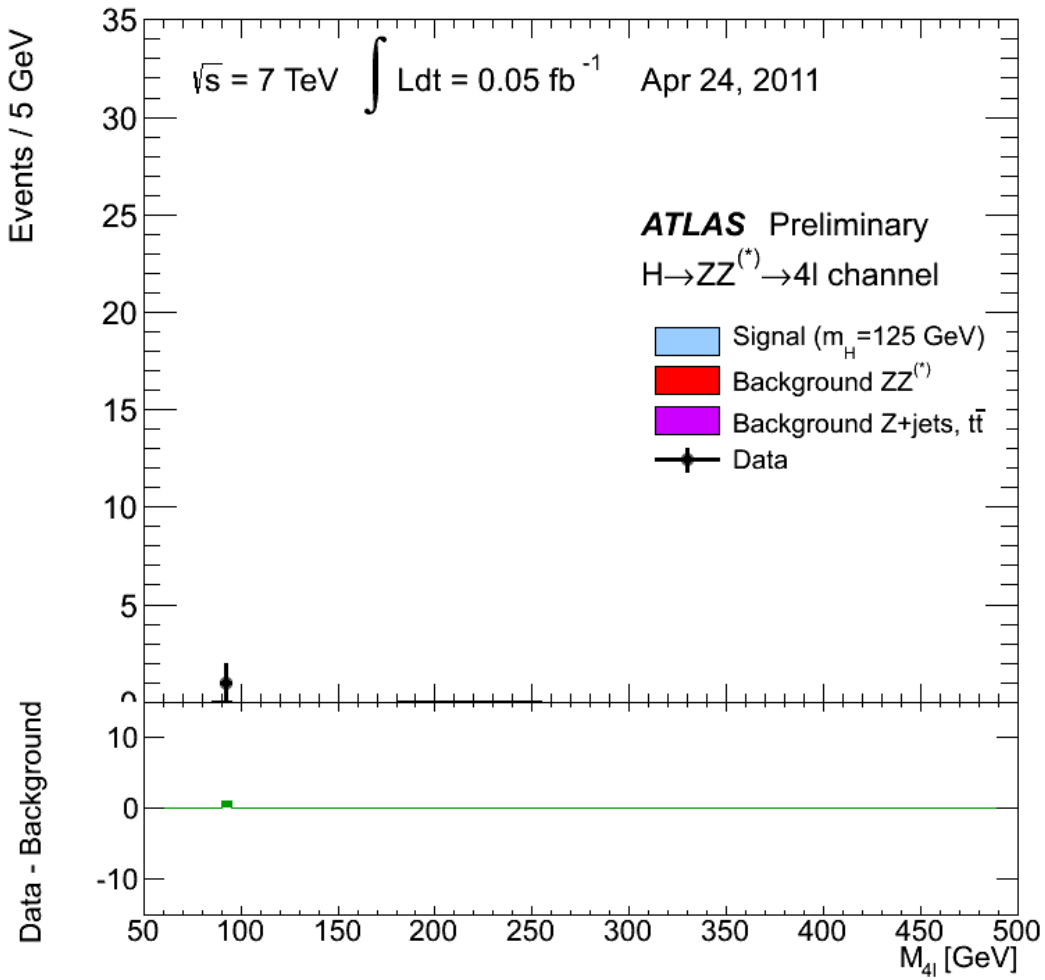
Candidato a H to 4μ, with $m_{4\mu}$=125.1 GeV

p_T (muones)= 36.1, 47.5, 26.4, 71 .7 GeV m_{12}= 86.3 GeV, m_{34}= 31.6 GeV. 15 vértices reconstruídos

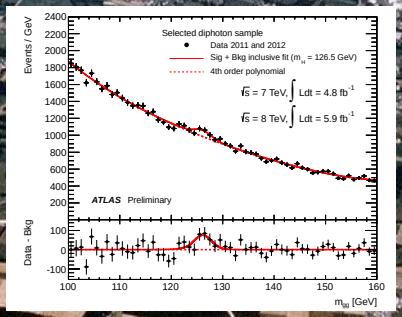
H□ZZ(*)□4 leptones

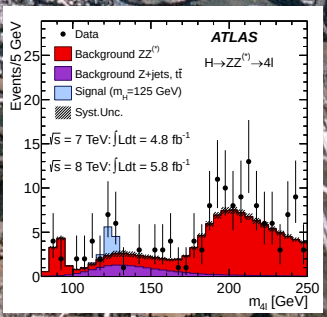


H□ZZ(*)□4 leptones

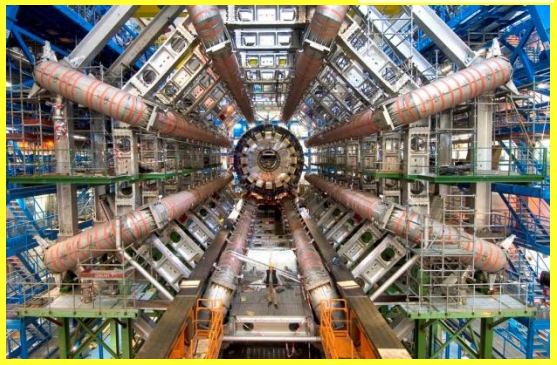


Verificación independiente

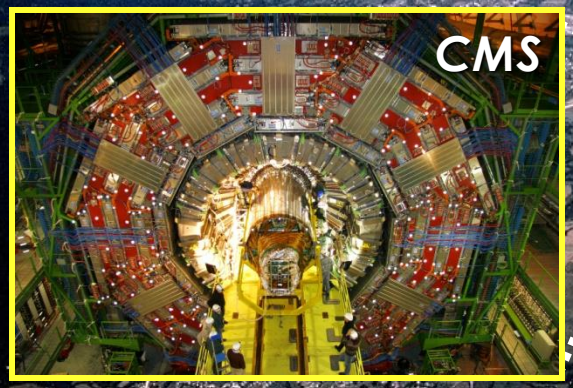


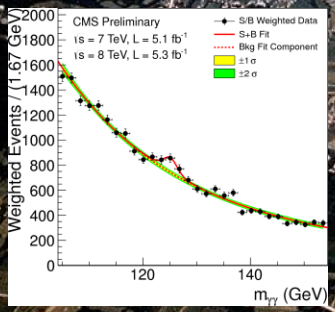


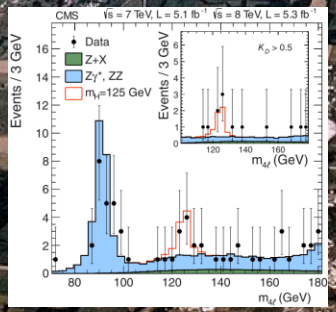
ATLAS

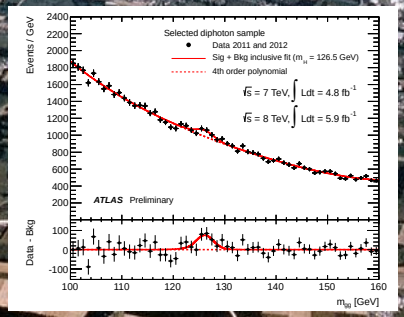


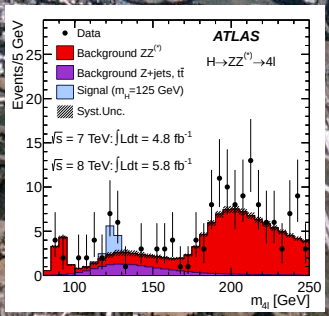
Verificación independiente



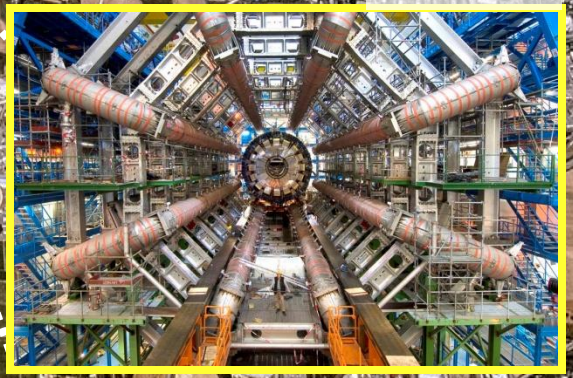




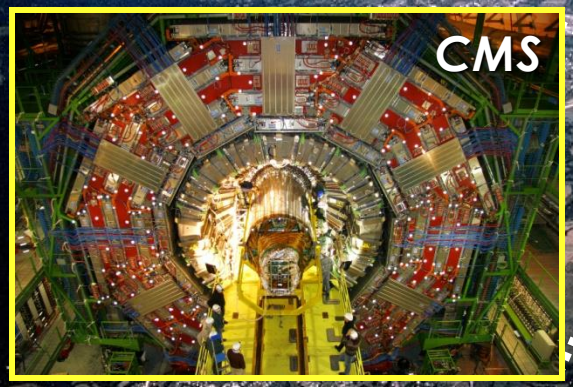




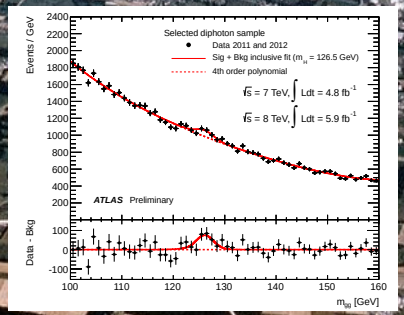
ATLAS

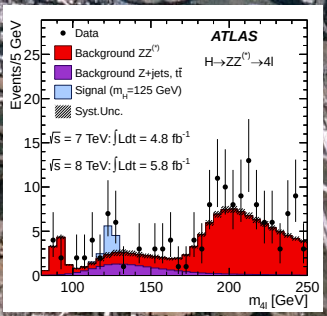


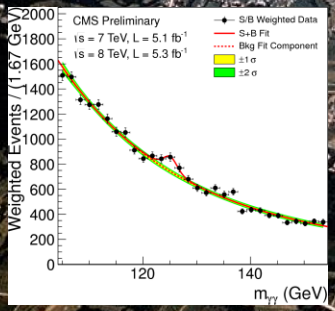
Combinación

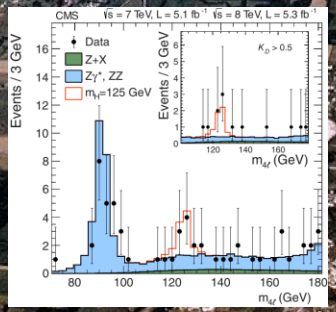


Probabilidad < 0.00003%
= “5σ” → Descubrimiento!

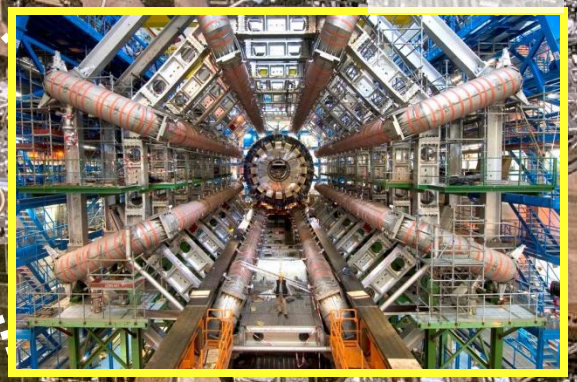








ATLAS



Probabilidad < 0.00003%
= “5σ” → Descubrimiento!

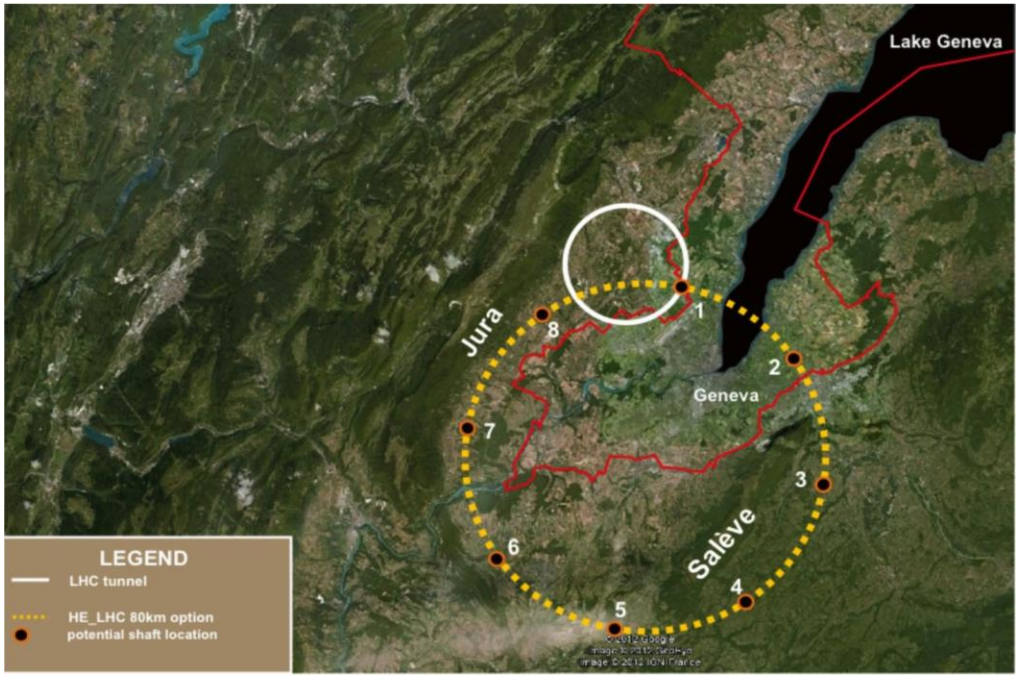
4 de julio de 2012

¿Qué sigue?

¿Qué sigue?

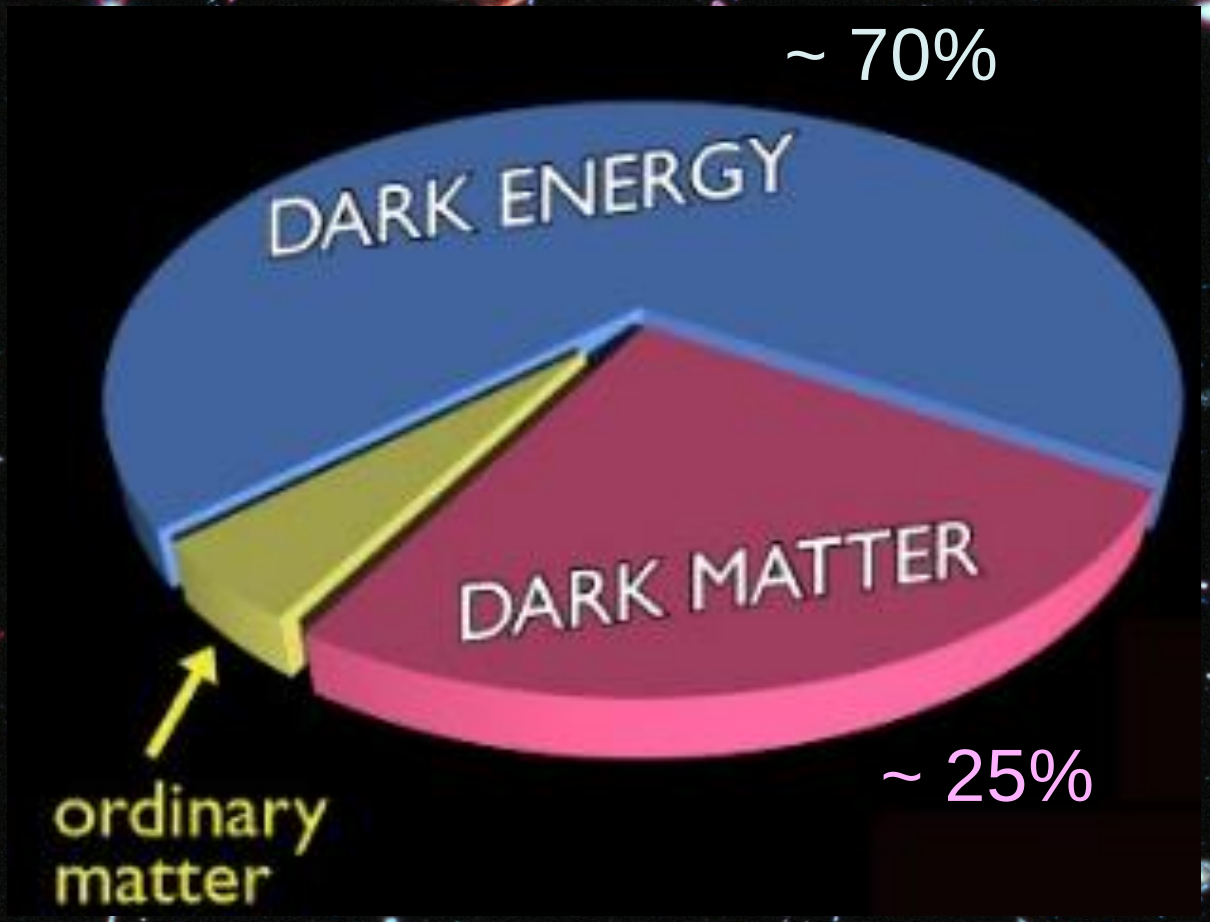
CERN:

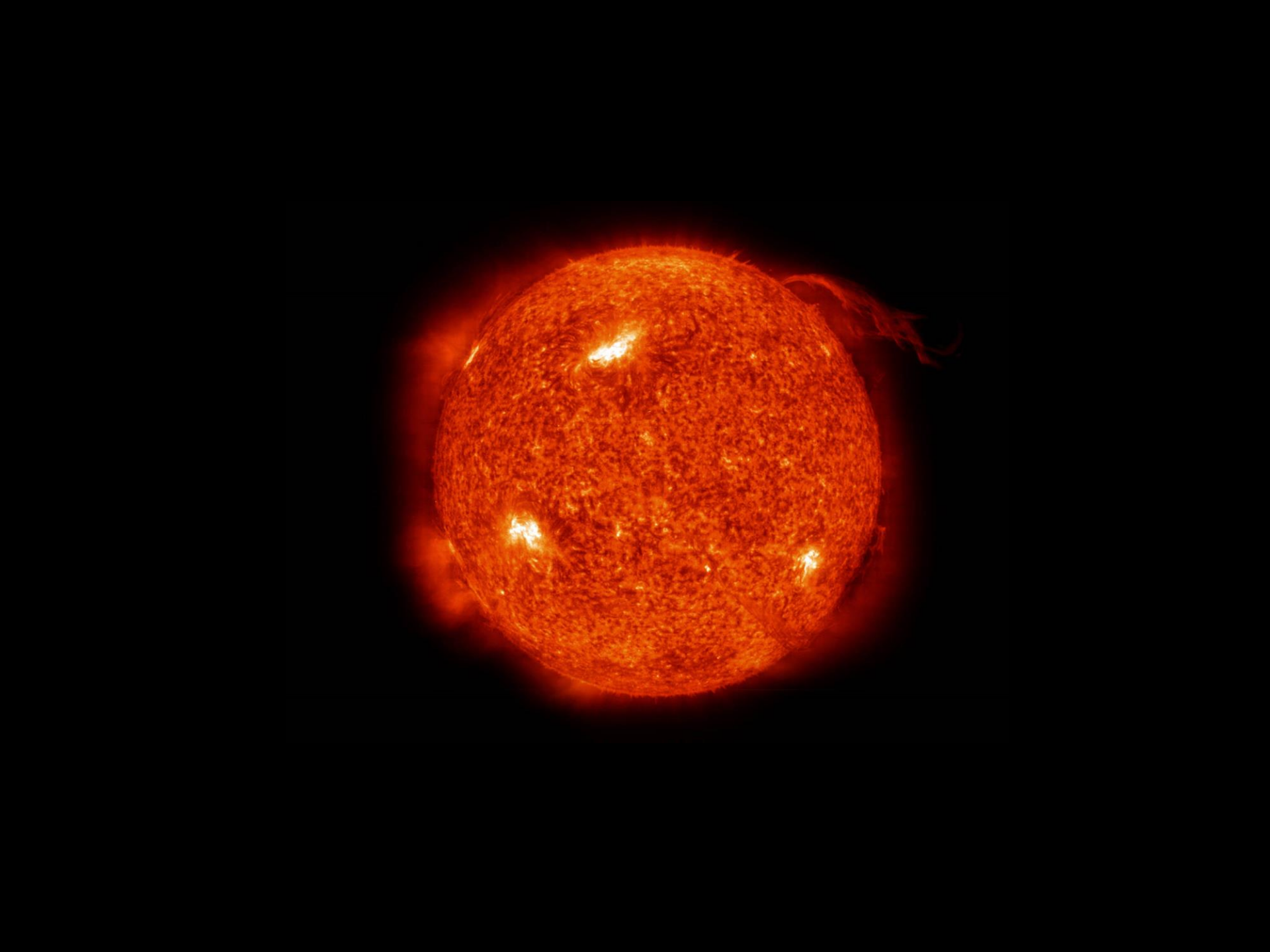
- Bajo el lago de Ginebra
- *Conceptual Design Study* en preparación
- 80 – 100 km



China:

- Qinhuangdao (秦皇岛)
- Fuerte apoyo local


~ 70%
DARK ENERGY
DARK MATTER
~ 25%
ordinary matter
~ 5%



Sobre Constantes y Unidades

On Constants and Units

Two of the most used constants in particle physics:

- c = 299 762 458 m/s
- h = 6.62606957(29) x 10^{-34} kg m^2 / s $\qquad \hbar \equiv h / 2\pi$

Method	Value of h (10^{-34} J·s)	Relative uncertainty
Watt balance	6.626 068 89(23)	3.4×10^{-8}
X-ray crystal density	6.626 0745(19)	2.9×10^{-7}
Josephson constant	6.626 0678(27)	4.1×10^{-7}
Magnetic resonance	6.626 0724(57)	8.6×10^{-7}
Faraday constant	6.626 0657(88)	1.3×10^{-6}
CODATA 2010 recommended value	**6.626 069 57(29)**	**4.4×10^{-8}**

Why no uncertainty on c ?

On Constants and Units

Two of the most used constants in particle physics:

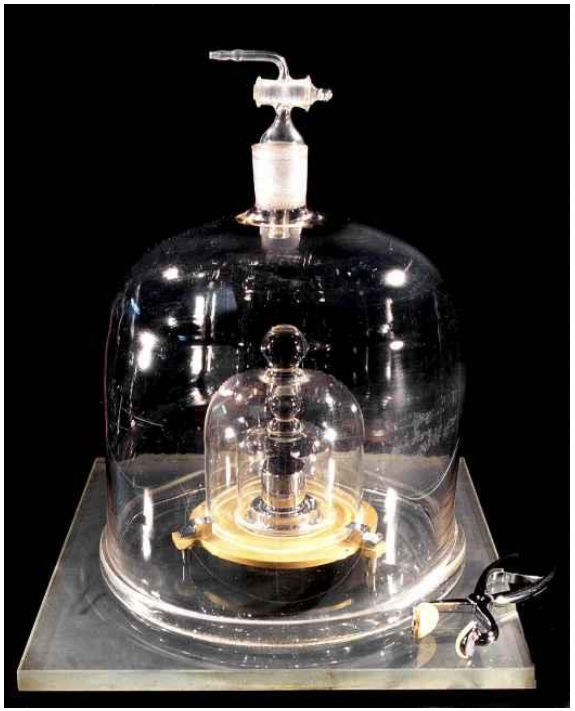
- c = 299 762 458 m/s
- h = 6.62606957(29) x 10^{-34} kg m^2 / s $\hbar \equiv h / 2\pi$

Very impractical values. Why?

- Meter:
  - 1790: Length of a pendulum with half-period of one second
  - 1791: One ten-millionth of ¼ Earth's meridian through Paris
  - 1799: Platinum meter bar (refined in 1889 and 1927)
  - 1960: 1,650,763.73 wavelengths of $2p^{10} \rightarrow 5d^5$ of Kr-86
  - 1983: Length traveled by light in vacuum in $^1/_{299,762,458}$ of a sec
  - 2002: "… as long as GR effects are negligible."

On Constants and Units

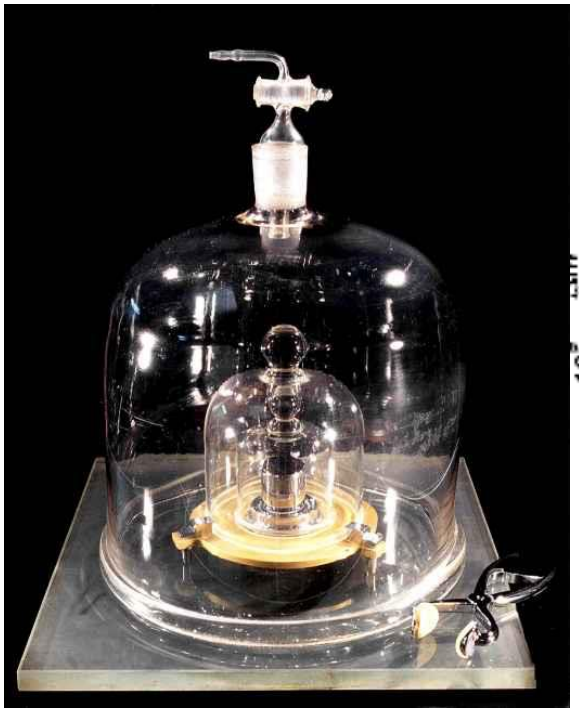
Similarly, the kg is defined by an object

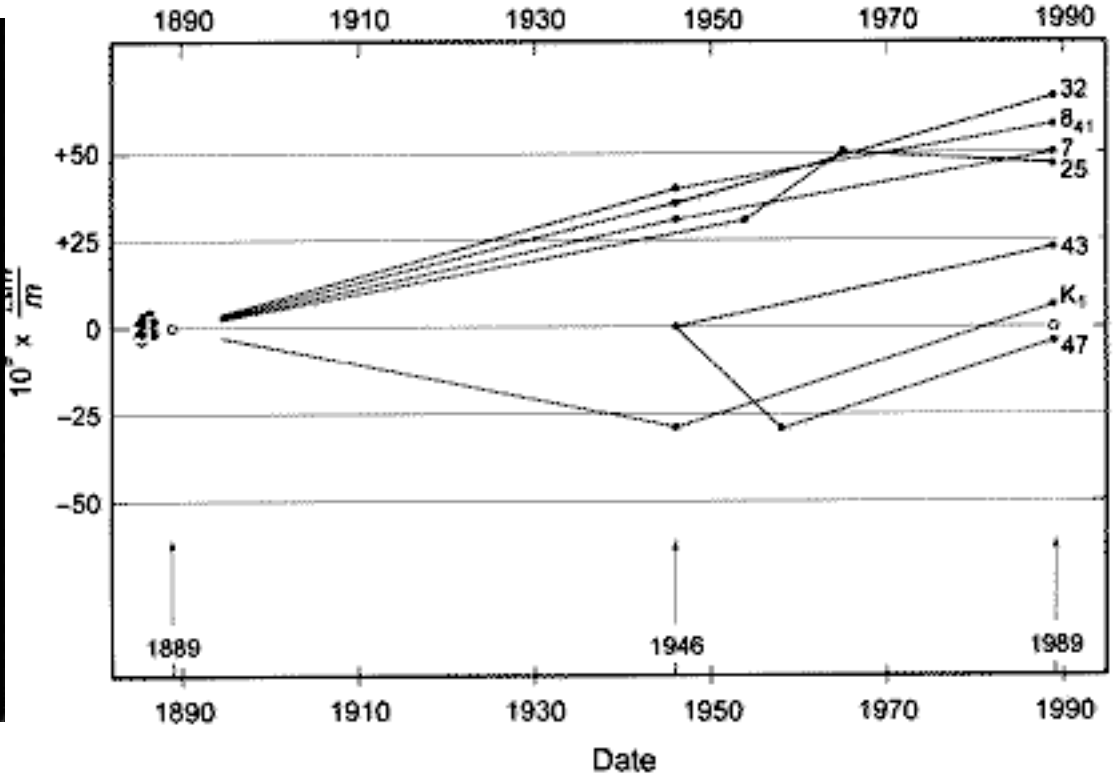


SI: "The kilogram is the unit of mass; it is equal to the mass of the international prototype of the kilogram"

On Constants and Units

Similarly, the kg is defined by an object





Comparisons between official copies show some divergence with time. ~ 5 x 10^{-8} (50 μg in 100 years)

On Constants and Units

- We can choose units so that c, h, … have value 1.

- The constants chosen to be = 1 determine units of length, mass, time, temperature and electric charge.

"Natural" units:

- Plank units: $c = G = \hbar = k_B = 1$

$[\hbar] = [\text{ momentum x position }] = L\ T^{-1}\ M\ L = L^2\ T^{-1}\ M$

$[c] = [\text{ speed }] = L\ T^{-1}$

$[G] = ?$

On Constants and Units

- Gravitational constant:

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

$[F] = [G] M^2 L^{-2}$

$M L T^{-2} = [G] M^2 L^{-2}$

$M^{-1} L^3 T^{-2} = [G]$

$G = 6.67384(80) \times 10^{-11}\ m^3\ kg^{-1}\ s^{-2}$

$= 6.67384(80) \times 10^{-11}\ N\ m^2\ kg^{-2}$

On Constants and Units

Universal constants can define a length, a mass, a time, and a temperature.

Quantity	Expression	Metric value	Name
Length (L)	$l_{\mathrm{P}} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}}$	1.616×10^{-35} m	Planck length
Mass (M)	$m_{\mathrm{P}} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}}$	2.176×10^{-8} kg	Planck mass
Time (T)	$t_{\mathrm{P}} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}}$	5.3912×10^{-44} s	Planck time
Temperature (Θ)	$T_{\mathrm{P}} = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G k_{\mathrm{B}}{}^2}}$	1.417×10^{32} K	Planck temperature
Electric charge (Q)	$q_{\mathrm{P}} = e/\sqrt{4\pi\alpha}$ (L–H)	5.291×10^{-19} C	
	$q_{\mathrm{P}} = e/\sqrt{\alpha}$ (G)	1.876×10^{-18} C	

Using these as units, all these constants become 1.

On Constants and Units

Planck units are not adequate for particle physics. Why?

Instead, we can start from an adequate unit of energy:

Unit	Metric value	Derivation
1 eV^{-1} of length	1.97×10^{-7} m	$= (1\,\mathrm{eV}^{-1})\hbar c$
1 eV of mass	1.78×10^{-36} kg	$= (1\,\mathrm{eV})/c^2$
1 eV^{-1} of time	6.58×10^{-16} s	$= (1\,\mathrm{eV}^{-1})\hbar$
1 eV of temperature	1.16×10^{4} K	$= 1\,\mathrm{eV}/k_\mathrm{B}$
1 unit of electric charge (L–H)	5.29×10^{-19} C	$= e/\sqrt{4\pi\alpha}$
1 unit of electric charge (G)	1.88×10^{-18} C	$= e/\sqrt{\alpha}$

On Constants and Units

- In this system, $c = \hbar = k_B = 1$
- And, by construction, the unit of energy is good for particle physics.

$$E = mc^2$$

$$E^2 = m^2c^4 + p^2c^2 \qquad E^2 = m^2 + p^2$$

$$E = h\nu = \hbar\omega \qquad E = n$$

El bosón de Higgs

¿Masa = cero?

– La “masa” es la oposición a convertir energía en movimiento
Pelota de playa negra vs bola de boliche:
a menor masa, mayor la velocidad adquirida

– ¿ Hay partículas con masa = 0 ?
Sí: fotones y gluones viajan a la velocidad de la luz

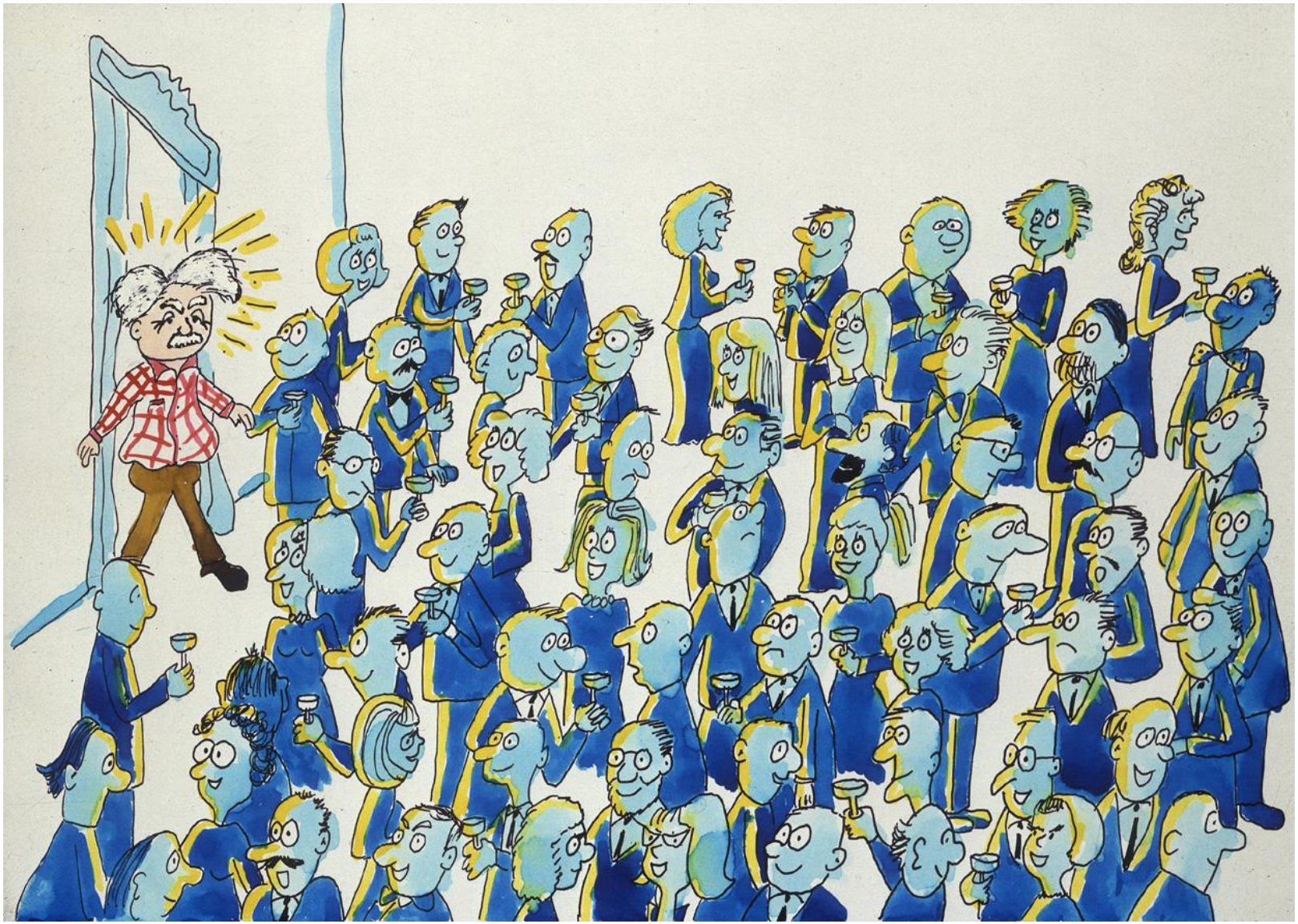
– ¿Qué pasaría si todas viajaran a la velocidad de la luz?
- No habría átomos
- No habría conglomerados de materia (estrellas, planetas)
- No habría vida como la conocemos

– En 1964, Higgs, Englert+Brout, Guralnik+Hagen+Kibble encontraron una solución postulando un nuevo campo,
… y una nueva partícula elemental.

El bosón de Higgs

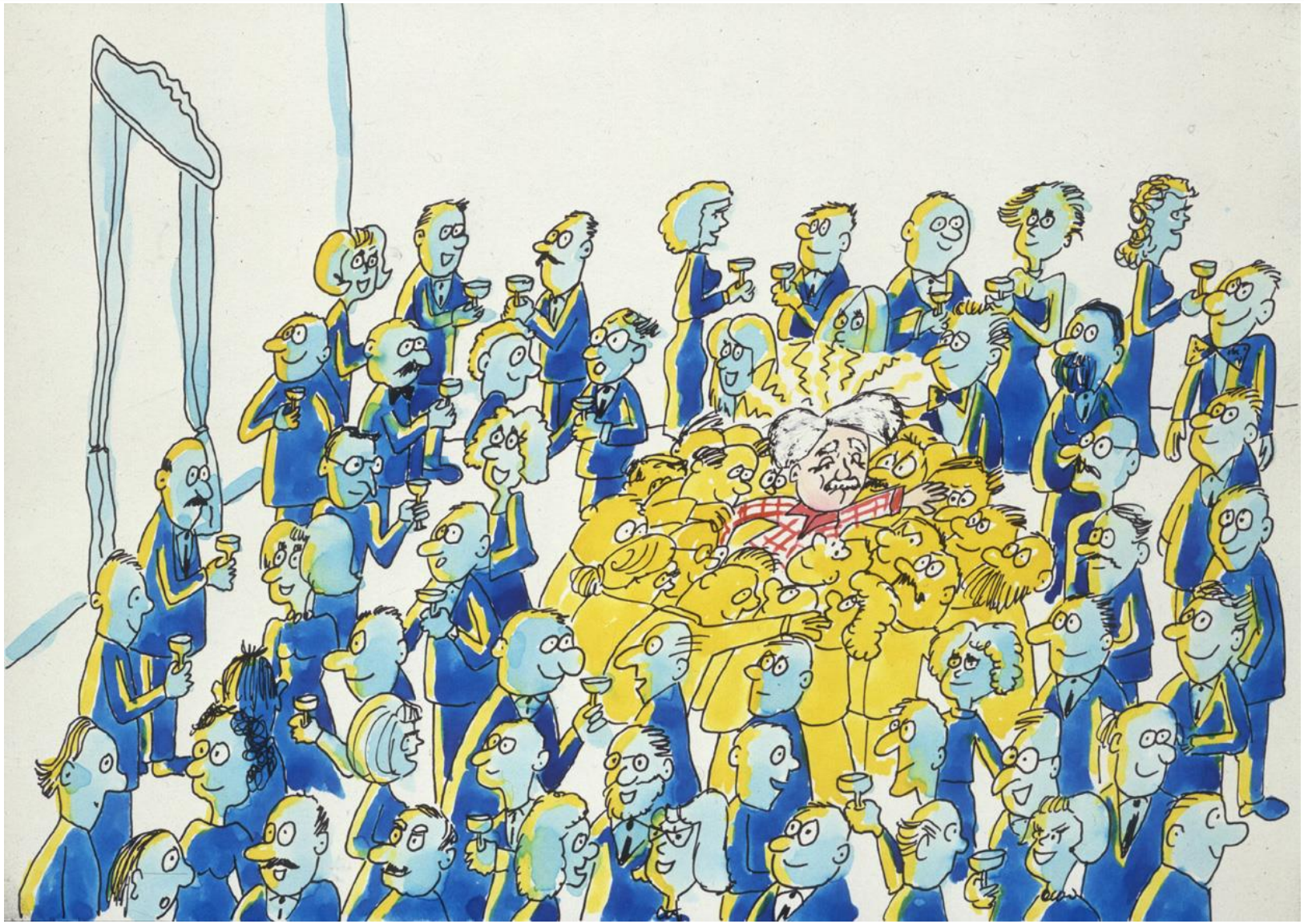
Prof. David J. Miller

El bosón de Higgs



Prof. David J. Miller

El bosón de Higgs



Prof. David J. Miller

El bosón de Higgs

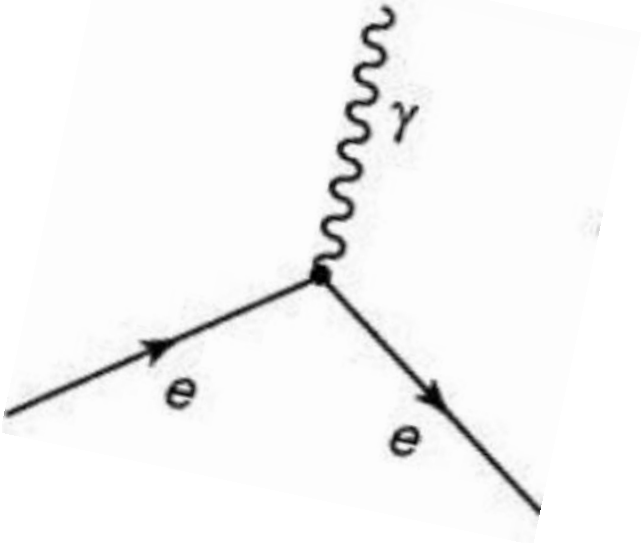
Prof. David J. Miller

El bosón de Higgs

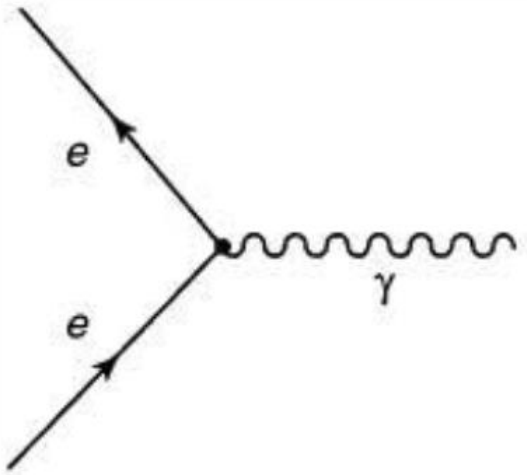
Prof. David J. Miller

Quantum Electrodynamics (QED)

- Energy & momentum should be conserved ***in each vertex***
- Consequence:
  - Conserved in the diagram as a whole
  - The primitive 'building block' does not represent a possible process:



In CM frame: Energy from mc^2 to more than that.

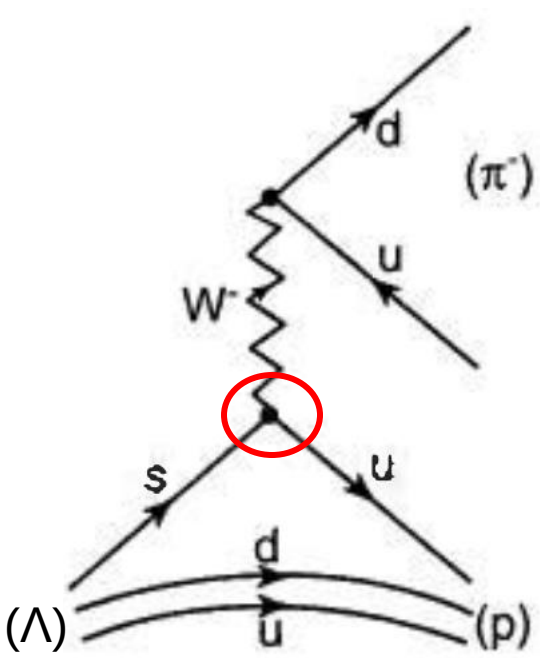


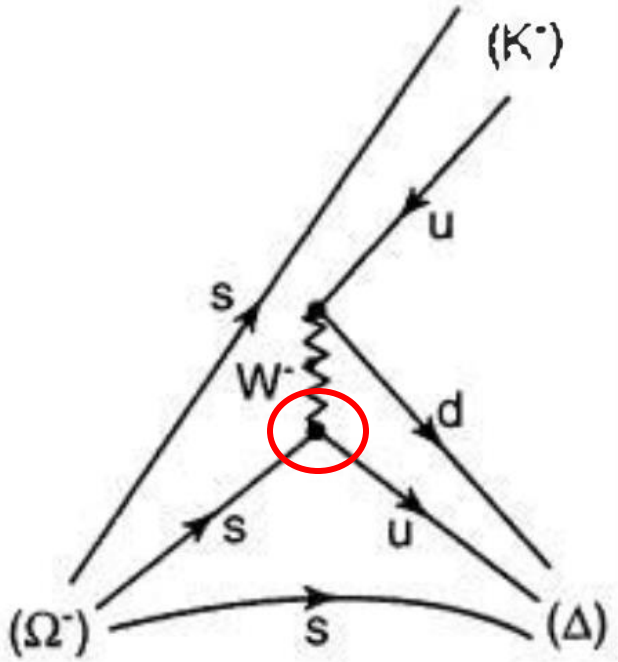
In CM frame: from zero total momentum to a photon.

Some complications

- If these vertices did not mix generations, strangeness would never change, but it does:

$$\Lambda \rightarrow p^{+} + \pi^{-} \qquad \Omega^{-} \rightarrow \Lambda + K^{-}$$





… and a solution

This mixing of generations posed a problem.

Solution: to weak interactions, the quark generations are 'misaligned'

- If the weak force acted on (u,d), (c,s), (t,b) there would be no "inter-generational" mixing
- However, it acts on *rotated versions* of d, s and b: (u,d'), (c,s'), (t,b')

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

Cabibbo-Kobayashi-Maskawa matrix

The CKM Matrix

- If the KM matrix was the unit matrix,
  - "upness-plus-downness"
  - "strangeness plus charm"
  - "topness plus botomness"

  Would each be conserved (just as e, μ & τ lepton numbers)

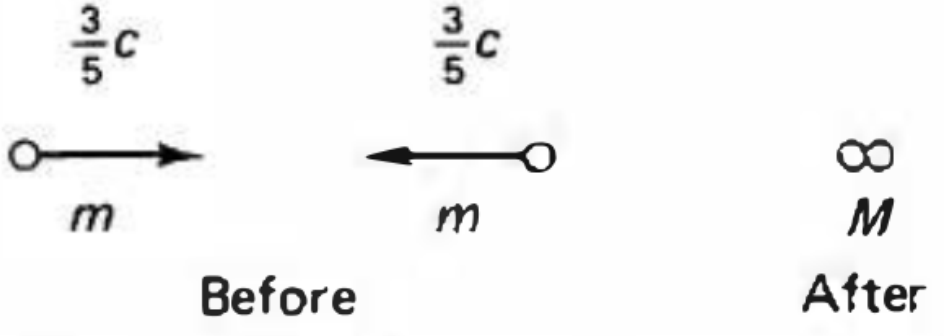
- However, experimentally:

$$\begin{bmatrix} |V_{ud}| & |V_{us}| & |V_{ub}| \\ |V_{cd}| & |V_{cs}| & |V_{cb}| \\ |V_{td}| & |V_{ts}| & |V_{tb}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.97427 \pm 0.00015 & 0.22534 \pm 0.00065 & 0.00351^{+0.00015}_{-0.00014} \\ 0.22520 \pm 0.00065 & 0.97344 \pm 0.00016 & 0.0412^{+0.0011}_{-0.0005} \\ 0.00867^{+0.00029}_{-0.00031} & 0.0404^{+0.0011}_{-0.0005} & 0.999146^{+0.000021}_{-0.000046} \end{bmatrix}.$$

With three generations of quarks:
three mixing angles + one CP-violating complex phase.

Example 1

Two lumps of clay, each of mass m, collide head-on at 3c/5; they stick together. What is the mass M of the final composite lump?



Conservation of momentum: *trivial*. $p_1 + p_2 = p_M = 0$

Conservation of Energy:

$$Mc^2 = 2E_m = \frac{2mc^2}{\sqrt{1-(3/5)^2}} = \frac{5}{4}(2mc^2) \qquad M = \frac{5}{2}m$$

Notice that $M > m_1 + m_2$

Example 2

A particle of mass M, initially at rest, decays into two pieces, each of mass m. What is the speed of each piece as it flies off?

Conservation of momentum: equal and opposite speeds

Conservation of energy:

$$Mc^2 = 2\gamma mc^2 = \frac{2m}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$v = c\sqrt{1 - (2m/M)^2}$$

Only makes sense if M>2m

For M=2m, v=0

For M>>2m, v→c