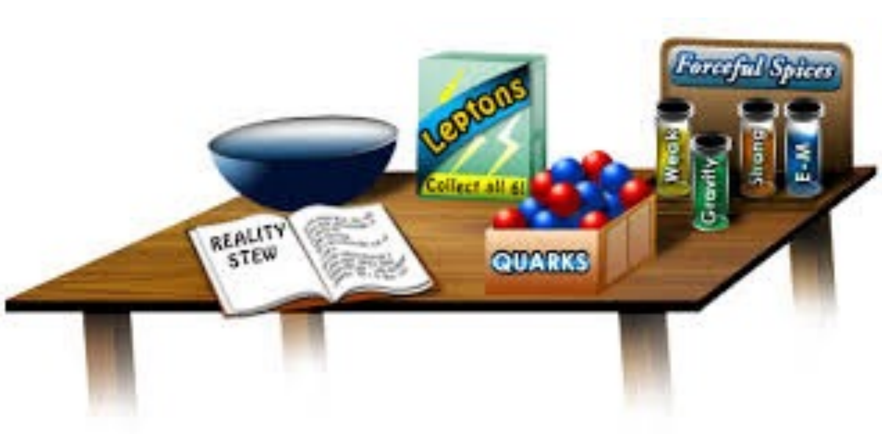
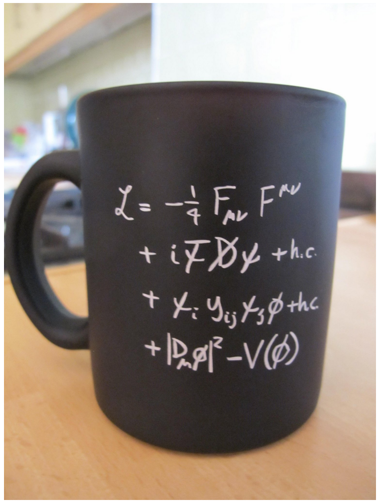
El Modelo Estándar

Mexican Teacher Programme

CERN - Agosto 2017

Martín González-Alonso
CERN Theoretical Physics Dept.





Disclaimers

VIEWER DISCRETION ADVISED

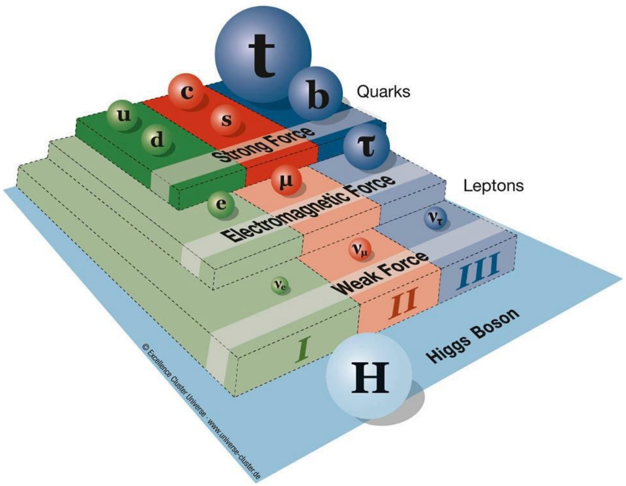
- Las analogías son analogías;
- Por complejo que parezca, el objetivo al final es explicar y predecir procesos físicos;

SCIENCE WORKS!

- Es imposible "entender" el SM en 1h;

Outline

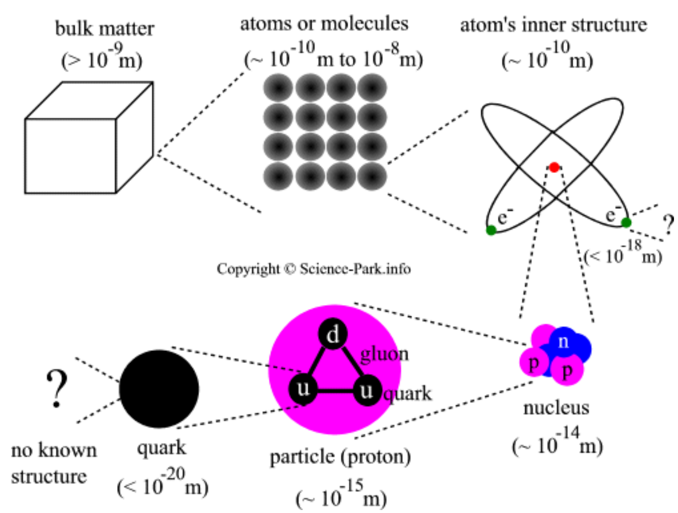
- Qué es la física de partículas;
- Reglas del juego = teoría cuántica de campos;
- Y cuál es la TQC que describe el mundo? El Modelo Estándar
  - Campos fundamentales;
  - Interacciones fundamentales;



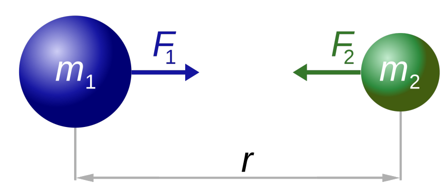
Reduccionismo y unificación

- Wikipedia: "La física de partículas es la rama de la física que estudia los componentes elementales de la materia y las interacciones entre ellos."

- El objetivo es explicar lo máximo con lo mínimo → reduccionismo & unificación!



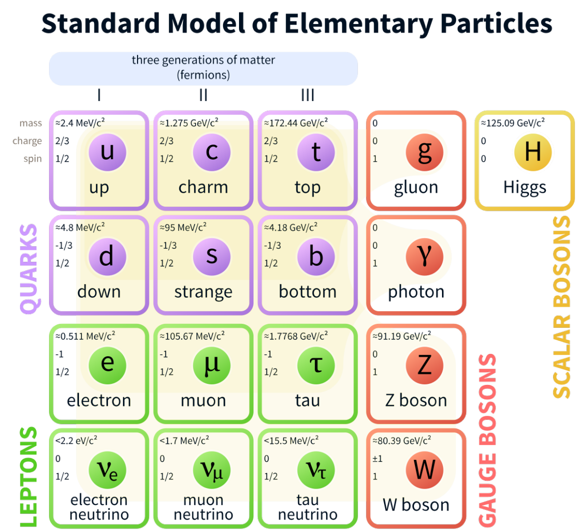
- Ejemplo:
  Newton unifica el movimiento de los astros y el de las manzanas;



$$F_1 = F_2 = G\frac{m_1 \times m_2}{r^2}$$

Reducionismo y unificación

- El Modelo Estándar (+gravedad!) representa nuestra ley de Newton, nuestra tabla periódica actual. “Unifica” todos los fenómenos conocidos en unas pocas interacciones fundamentales y unos pocos campos elementales.



$$
\begin{aligned}
\mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\
& + i \bar{\psi} \not{D} \psi + h.c. \\
& + \bar{\psi}_i y_{ij} \psi_j \phi + h.c. \\
& + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)
\end{aligned}
$$

- Evidentemente esto no se acaba aquí.

Partículas ***Elementales***?

- Elemental = sin estructura interna (hasta donde sabemos hoy);



Analogía (!!)

Real (classical) physics!

Energía de la onda electromagnética: E ~ 1/λ

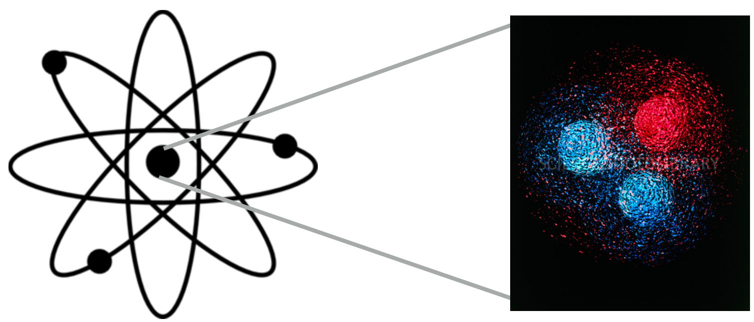
Distancias pequeñas = Energías altas

(Física de partículas elementales = física de altas energías)

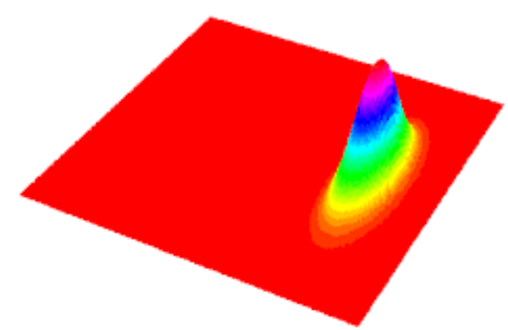
Partículas ***Elementales***?

- Visión cuántica:
  Todos los objetos tienen una onda "asociada", con $E \sim 1/\lambda$
  (no significa que tenga estructura interna!)

- Ejemplos:
  - Protón:
    si "miramos" por debajo de 1 fm ($=10^{-15}$ m), vemos que tiene estructura;



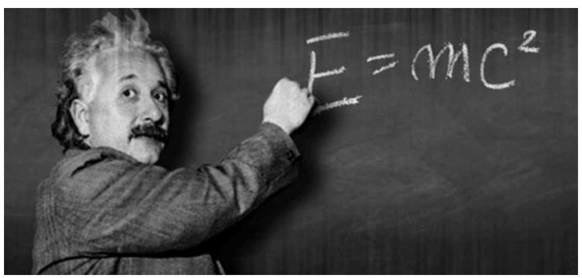
  - Electrón:
    incluso a las energías más altas que somos capaces de producir
    (LHC ~ 0.001-0.0001 fm!!), el electrón sigue pareciendo "puntual"
    (la descripción cuántica "estándar" onda-corpúsculo sigue funcionando);



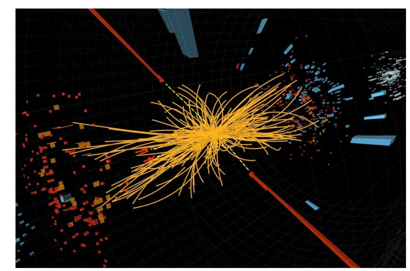
Partículas ***Elementales***?

- Visión cuántica:
  Todos los objetos tienen una onda "asociada", con E ~ 1/λ
  (no significa que tenga estructura interna!)

- Esto no quiere decir que con física de altas energías estamos mirando (sólo!!) lo que hay "dentro" de lo que ya conocemos. En la mayoría de los casos no es así.



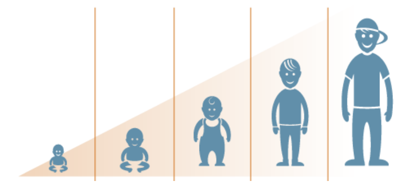
Es posible ***crear*** partículas

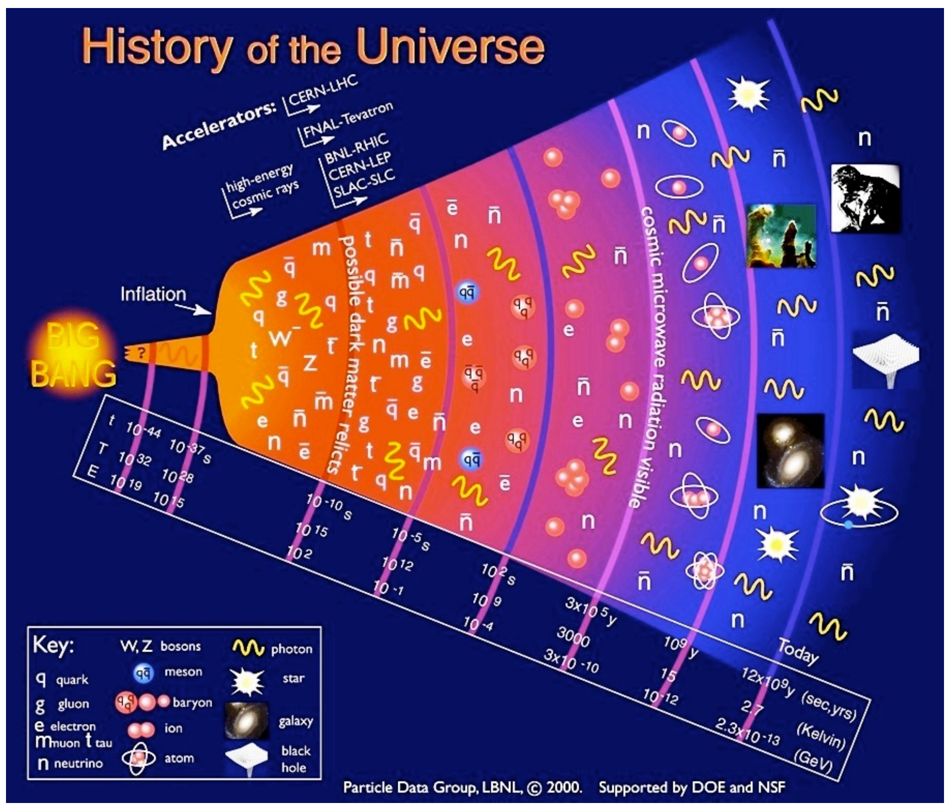


- La gravedad es irrelevante en el LHC…

LHC = la máquina del big bang?

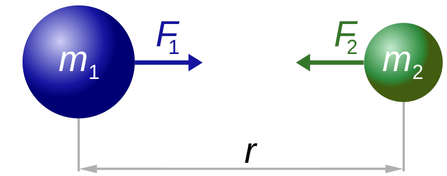
- Teoría de la relatividad general + observaciones → big bang;
- Ojo: el big bang es una extrapolación;
- Universo primitivo = altas energías;





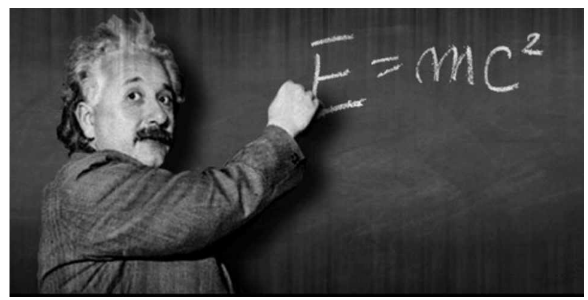
Reglas del juego

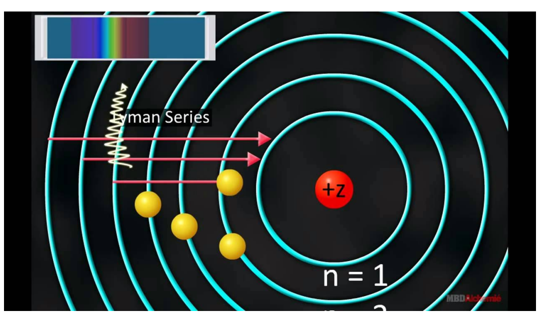
- Física clásica: determinismo clásico + bolitas de billar + ***F* = *m a***
  Cuántas bolitas? cuál es su masa? qué tipo de fuerza?
  Fuerza + condiciones iniciales → predicción

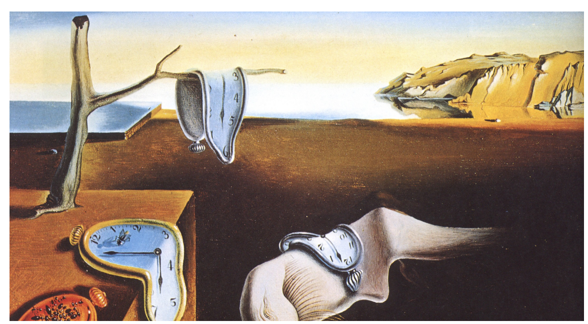


$$F_1 = F_2 = G\frac{m_1 \times m_2}{r^2}$$

- Física de partículas:
  distancias pequeñas (física cuántica!) + velocidades muy altas (relatividad especial!)





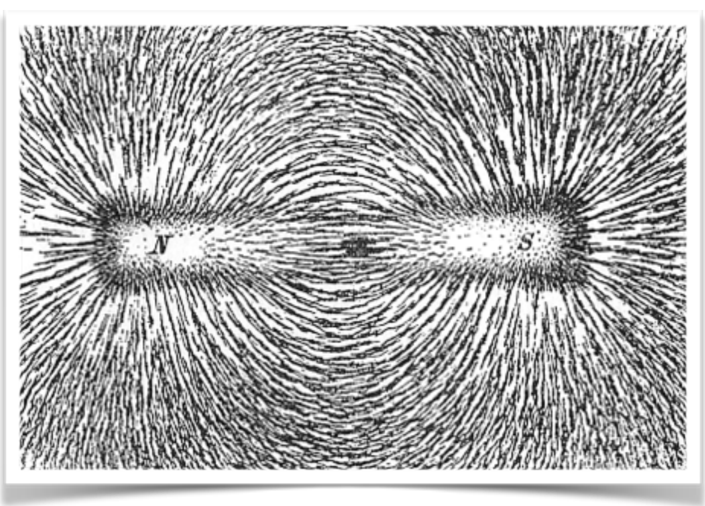


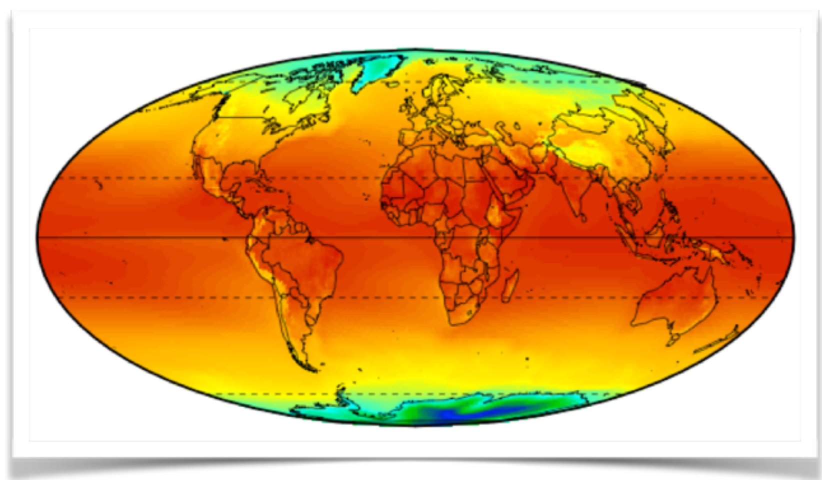
Reglas del juego

- Física clásica: determinismo clásico + bolitas de billar + ***F* = *m a***
  Cuántas bolitas? cuál es su masa? qué tipo de fuerza?
  Fuerza + condiciones iniciales → predicción

- Física de partículas:
  distancias pequeñas (física cuántica!) + velocidades muy altas (relatividad especial!)

= Teoría cuántica de campos



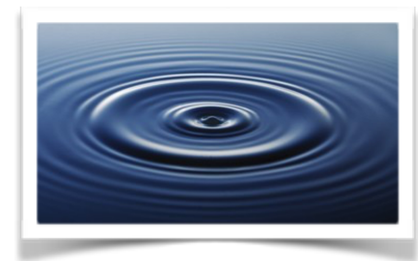


Reglas del juego

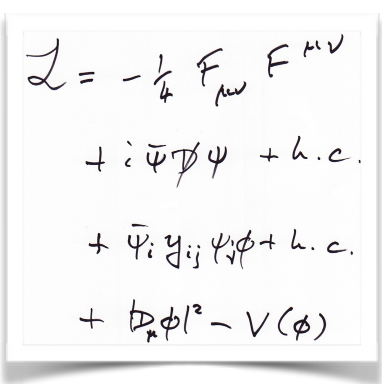
- Física clásica: determinismo clásico + bolitas de billar + $\boldsymbol{F = m\,a}$
  Cuántas bolitas? cuál es su masa? qué tipo de fuerza?
  Fuerza + condiciones iniciales → predicción

- Física de partículas:
  distancias pequeñas (física cuántica!) + velocidades muy altas (relatividad especial!)

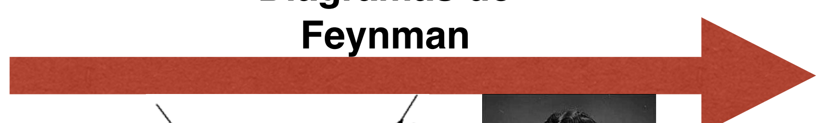
= Teoría cuántica de campos

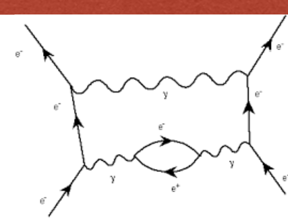


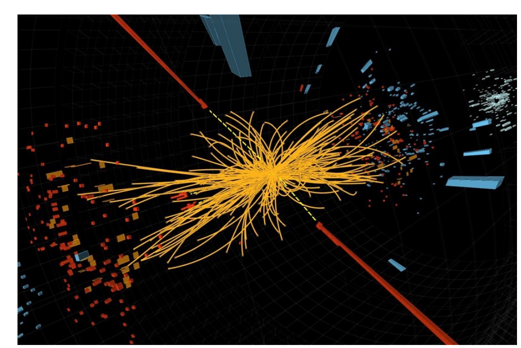
- Los campos “llenan” el espacio, e interactúan;
- Cada campo tiene asociada una partícula elemental (quantum!);
- Qué campos? Cómo interactúan? → “Lagrangiano” L(x);



Diagramas de Feynman







Reglas del juego

- Física clásica: determinismo clásico + bolitas de billar + $\boldsymbol{F = m\,a}$
  Cuántas bolitas? cuál es su masa? qué tipo de fuerza?
  Fuerza + condiciones iniciales → predicción

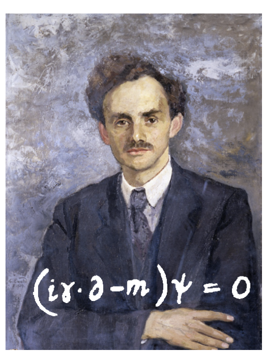
- Física de partículas:
  distancias pequeñas (física cuántica!) + velocidades muy altas (relatividad especial!)

= Teoría cuántica de campos

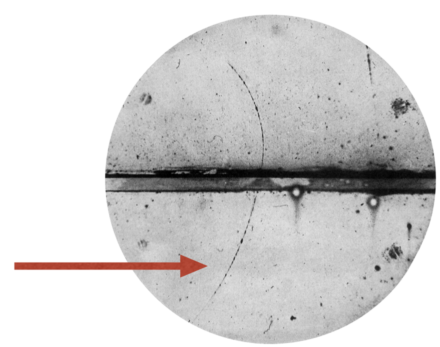
- Los campos "llenan" el espacio, e interactúan;
- Cada campo tiene asociada una partícula elemental (quantum!);
- Qué campos? Cómo interactúan? → "Lagrangiano" L(x);

… y otra igual con carga opuesta!

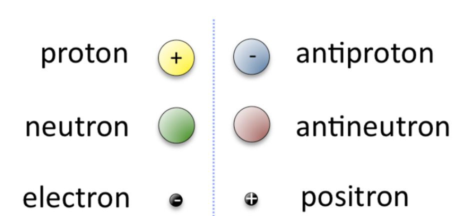
Antimateria!



Ecuación de Dirac (1928)

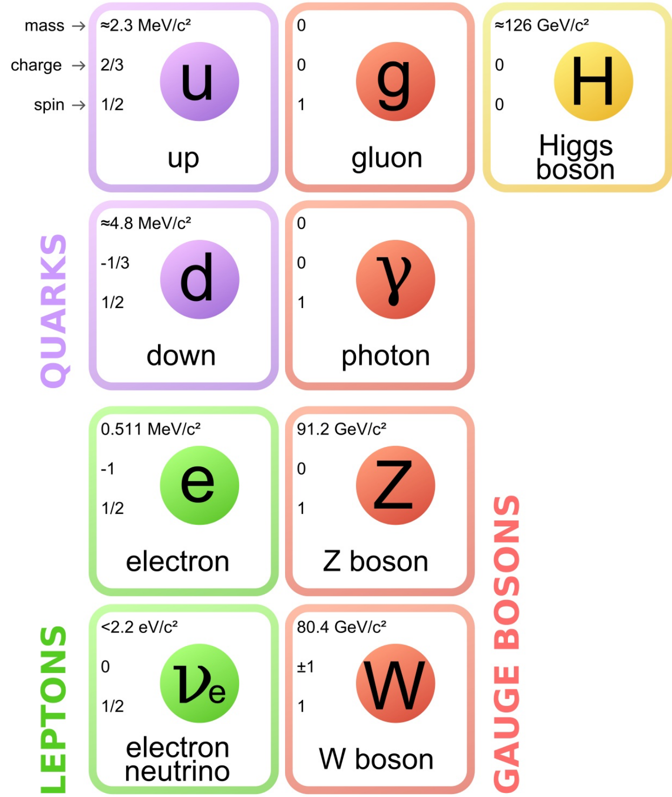


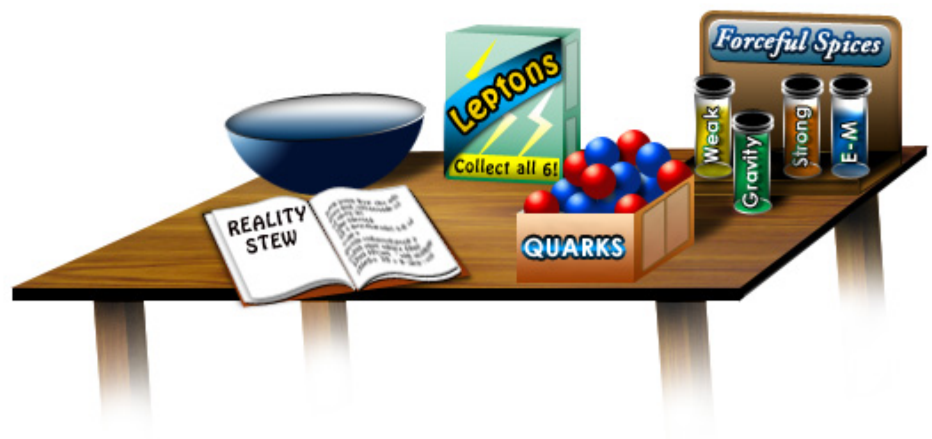
Descubrimiento (1932)



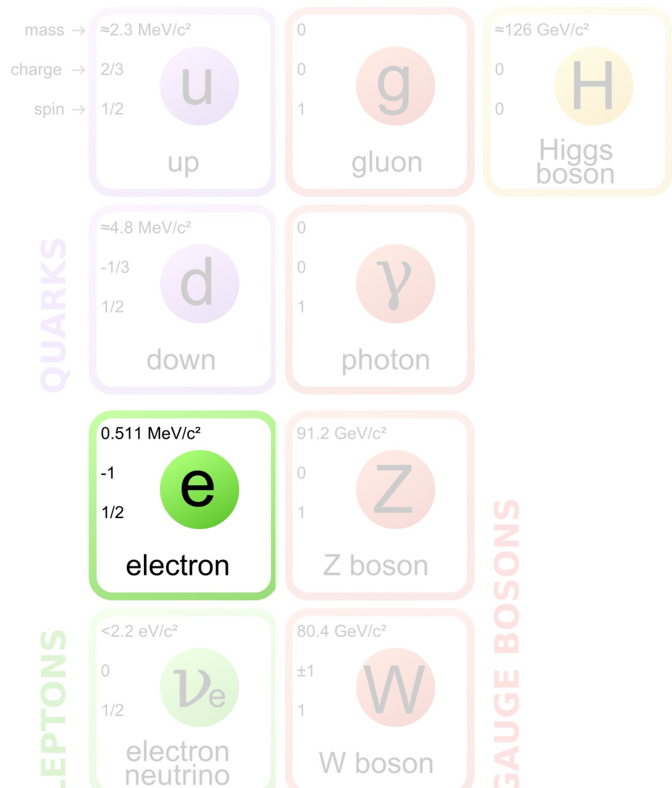
El Modelo Estándar: campos

Recordatorio:
Campo → partícula y antipartícula

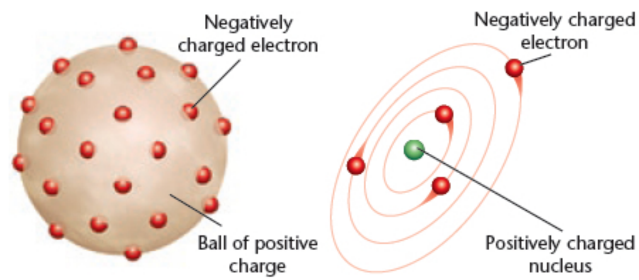




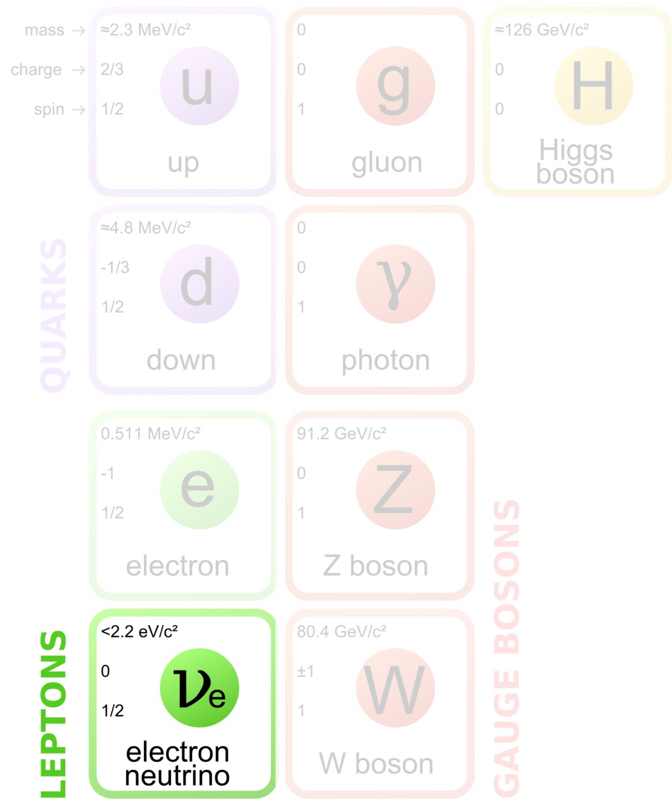
El Modelo Estándar: electrón

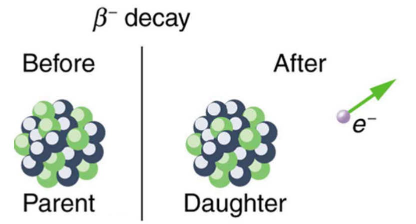


- 1897: Descrubrimiento [e^-] (J.J.Thomson);



El Modelo Estándar: neutrino





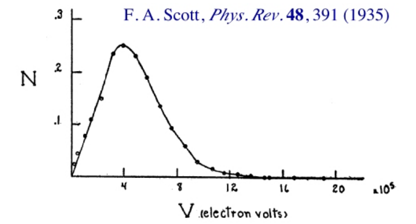
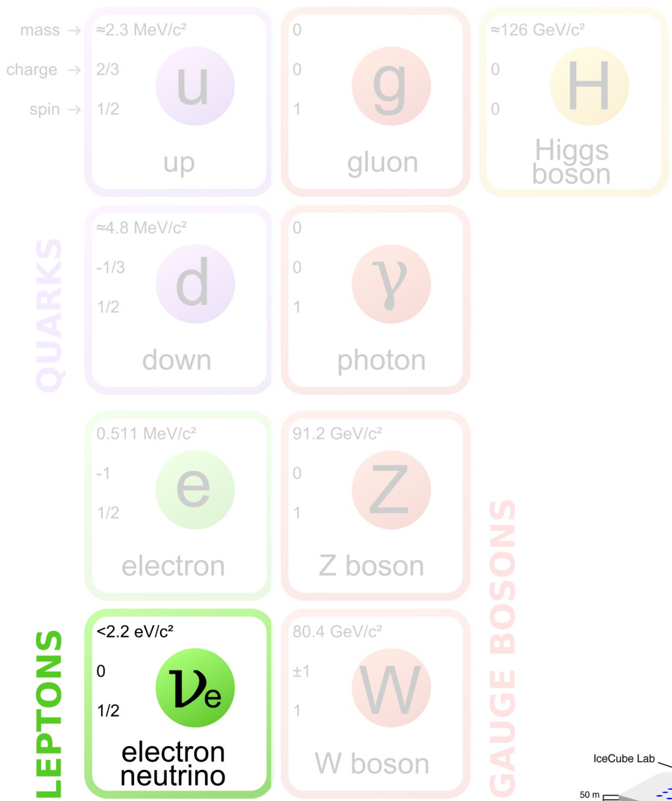
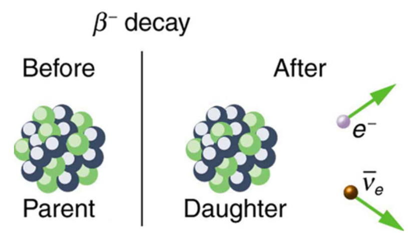


Fig. 5. Energy distribution curve of the beta-rays.

El Modelo Estándar: neutrino





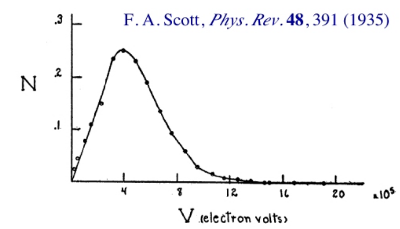


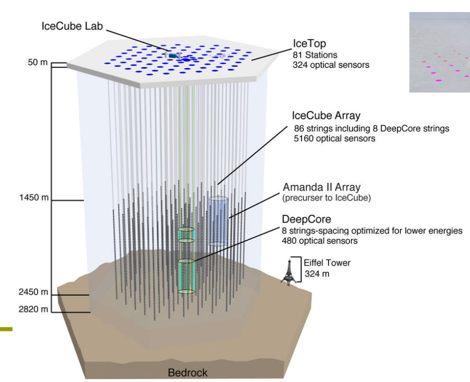
FIG. 5. Energy distribution curve of the beta-rays.

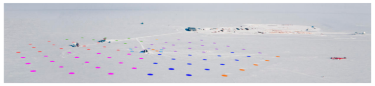
- 1930: "Solución desesperada" propuesta por Pauli;

  "Dear Radioactive Ladies and Gentlemen,
  (...) in the nuclei there could exist electrically neutral particles, which I will call neutrons
  (...) I do not dare to publish (...) this idea"

- Descubierto en 1956 por Reines & Cowan en un reactor nuclear;

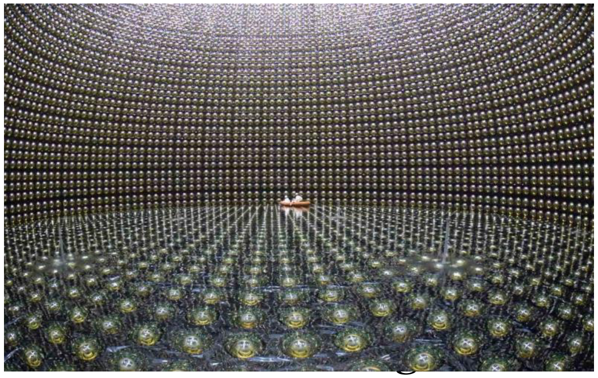
1995! ??



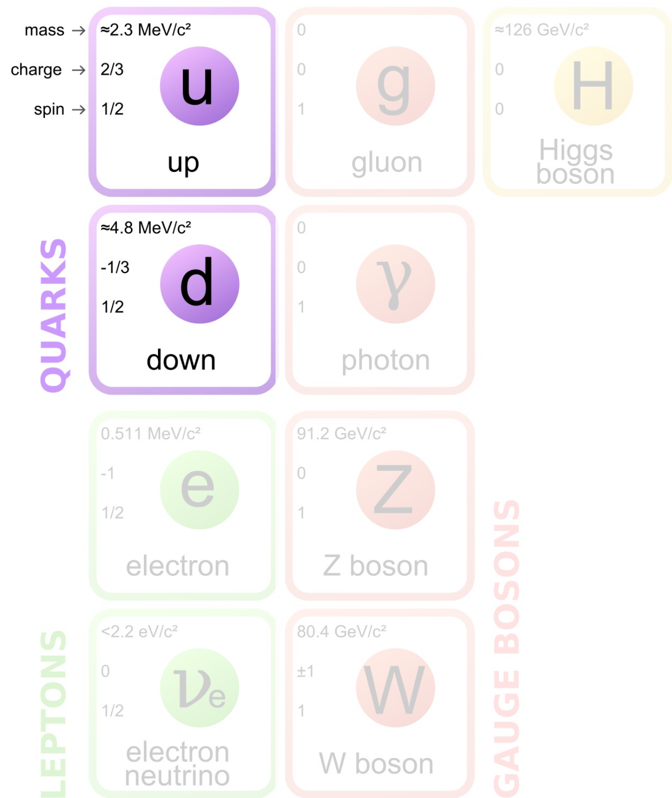


IceCube Aerial View

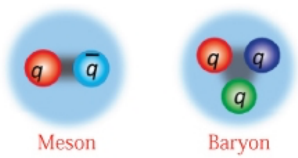
Digital Optical Module (DOM)

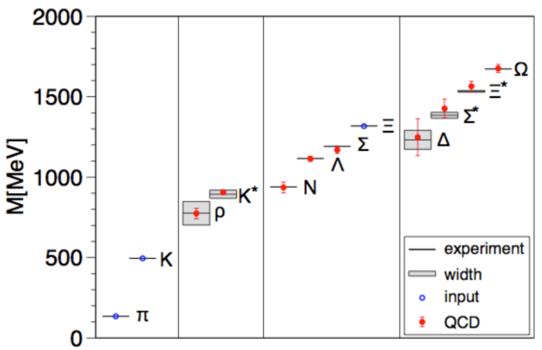


El Modelo Estándar: quarks

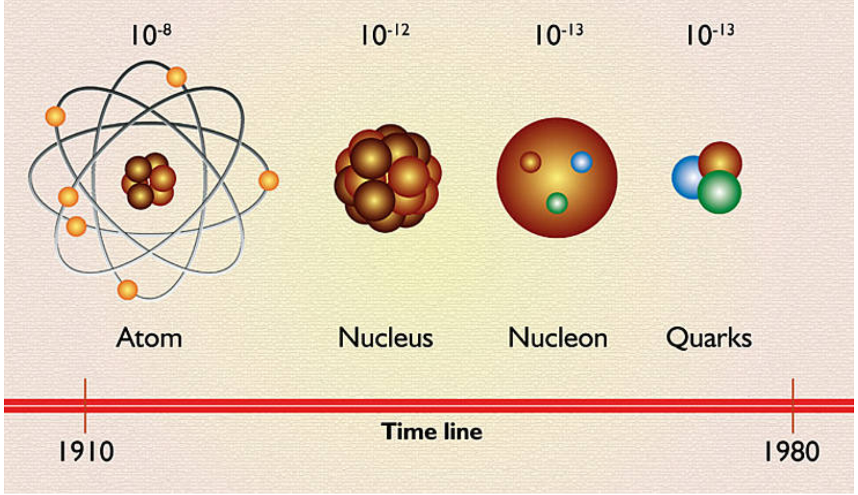


- 1961: Zweig, Gell-Mann; (Cargas 2/3, -1/3)

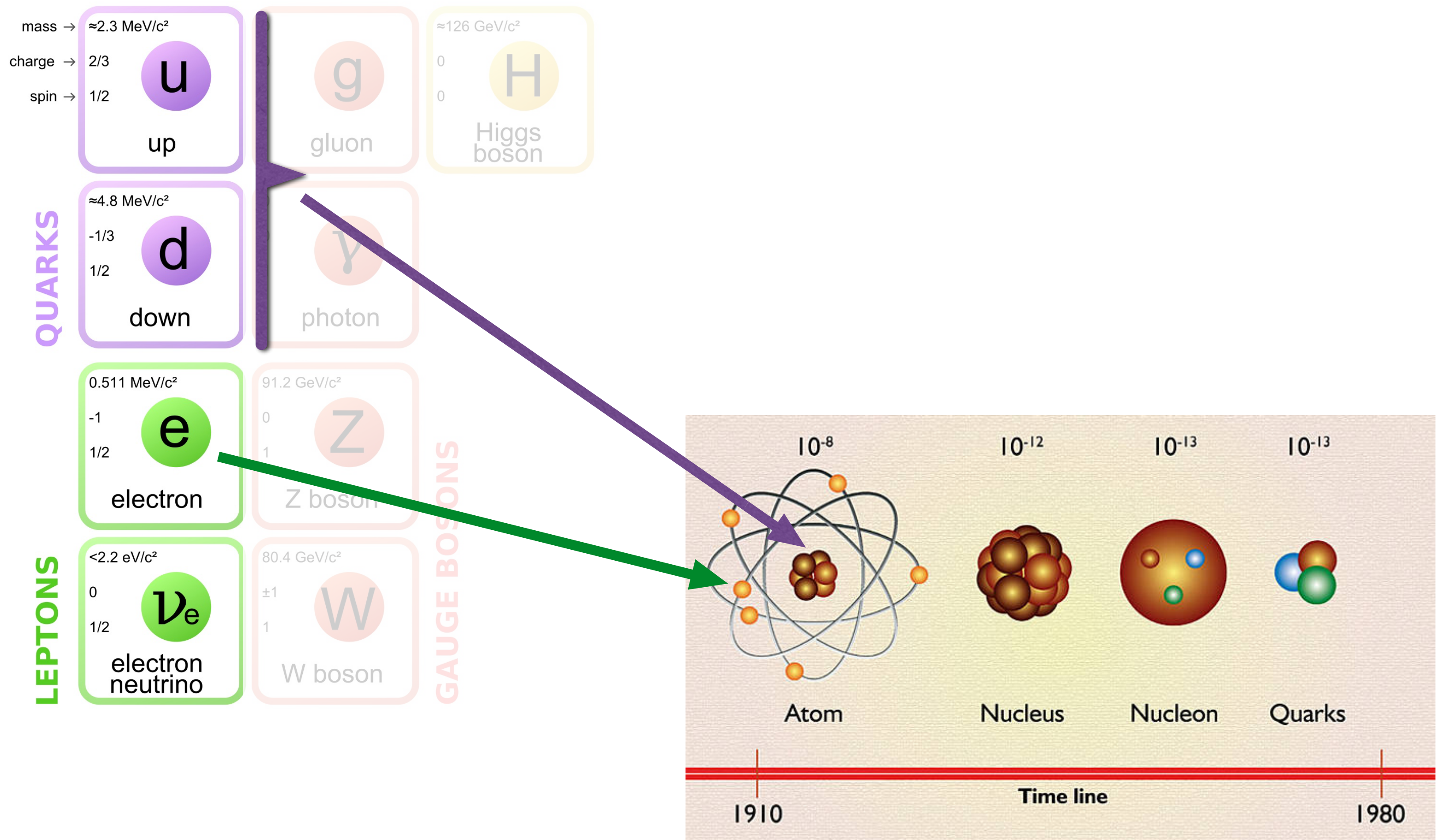




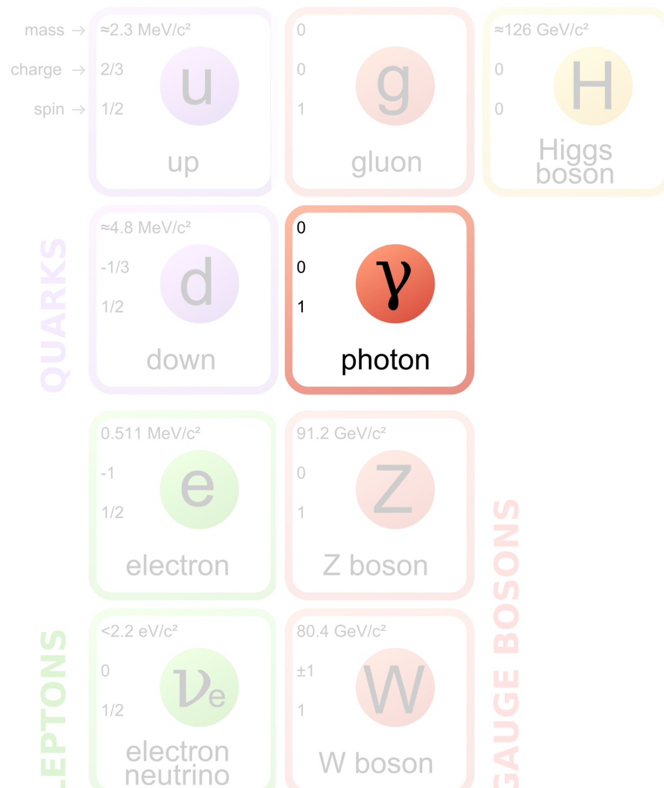
- 1968: proton structure! (e p → e X @ SLAC);
- Quarks libres?



El Modelo Estándar

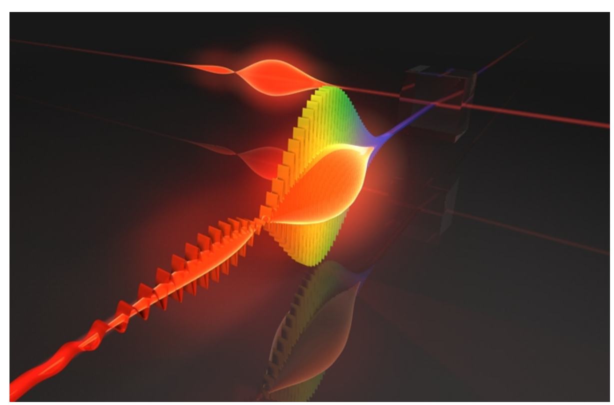


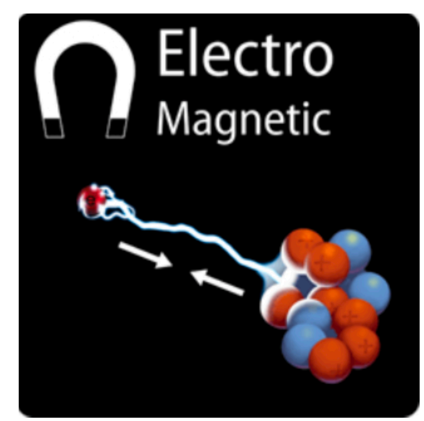
El Modelo Estándar: Fotón



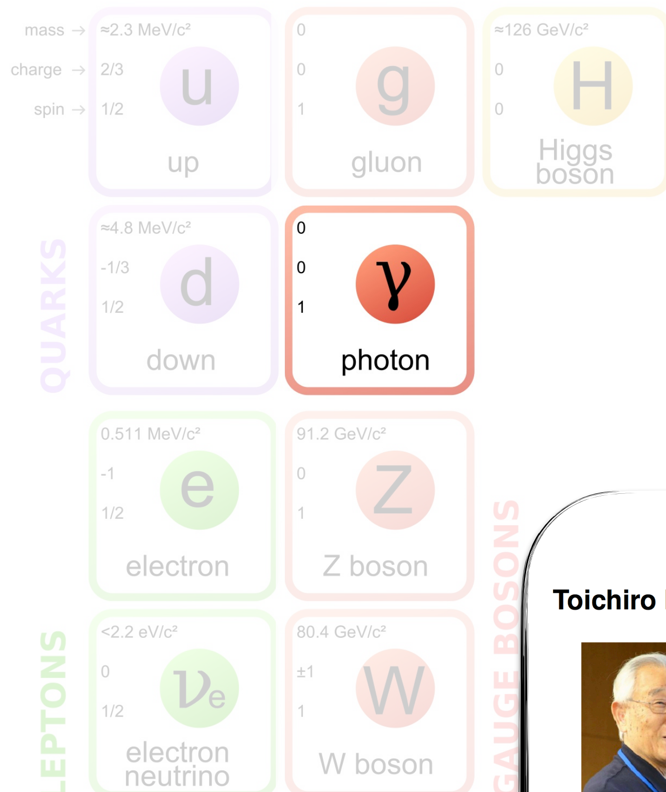
- Campo *mediador* de la interacción electromagnética;
- Electricidad, magnetismo, óptica, química, …
- Onda: Luz → Fotón (1900 Planck -1905 Einstein)
- No tiene masa → v=c;
- Es de "largo alcance" (F ~ 1/r²);
- Primera TQC: electrodinámica cuántica (QED);

$$L = \bar{\psi} i \gamma_\mu \left(\partial^\mu + igA^\mu \right) \psi - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$





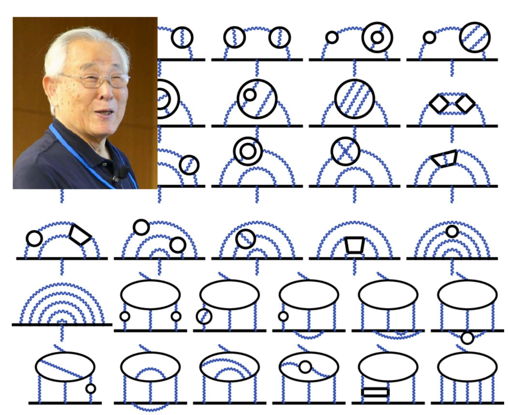
El Modelo Estándar: Fotón

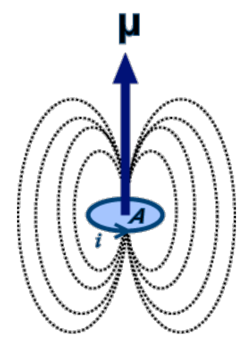


- Campo *mediador* de la interacción electromagnética;
- Electricidad, magnetismo, óptica, química, …
- Onda: Luz → Fotón (1900 Planck -1905 Einstein)
- No tiene masa → v=c;
- Es de "largo alcance" (F ~ 1/r^2);
- Primera TQC: electrodinámica cuántica (QED);

$$L = \bar{\psi} i \gamma_\mu \left(\partial^\mu + igA^\mu\right)\psi - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$

Toichiro Kinoshita: 60 años de dedicación a QED





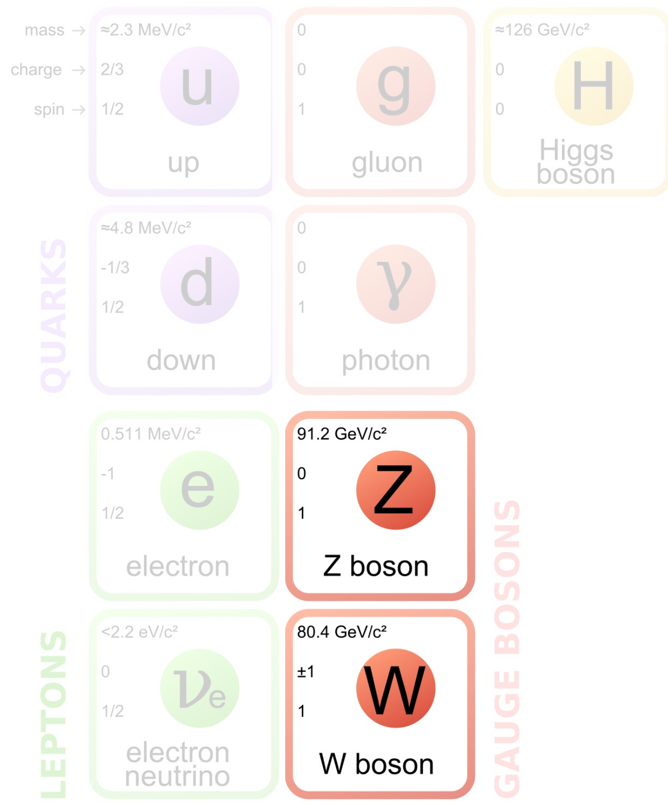
Momento magnético del electrón

$a_e^{\text{calculo}} = 0.001\,159\,652\,181\,643(764)$

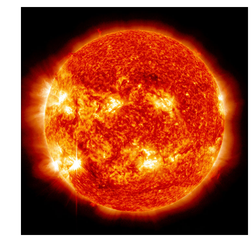
$a_e^{\text{experim.}} = 0.001\,159\,652\,180\,73(28)$

M. González-Alonso

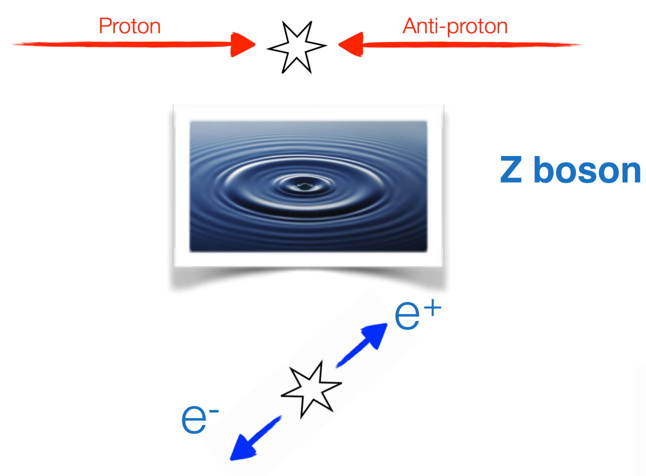
El Modelo Estándar: W & Z

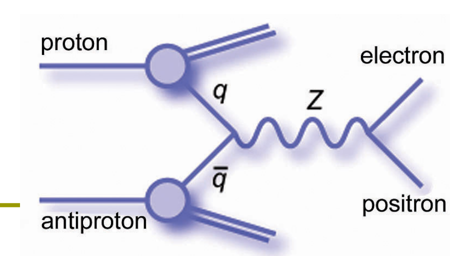


- **Interacción débil:** Radioactividad, estrellas, fusión, …

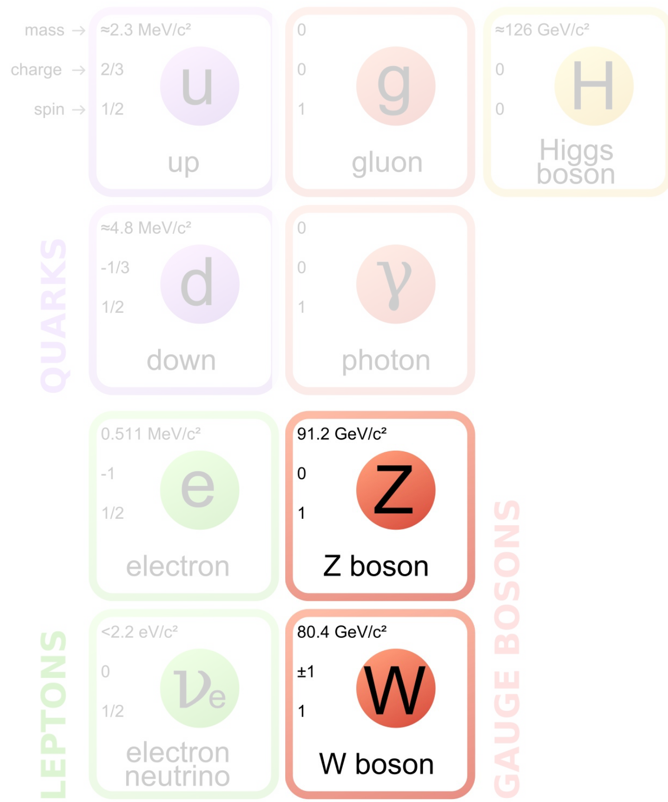


- W/Z proposed in the '60s (Glashow, Abdus Salam, Weinberg);
- Particles first detected in 1983 @ CERN!

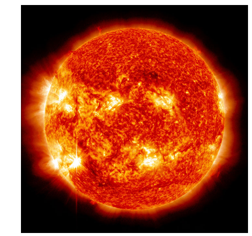




El Modelo Estándar: W & Z

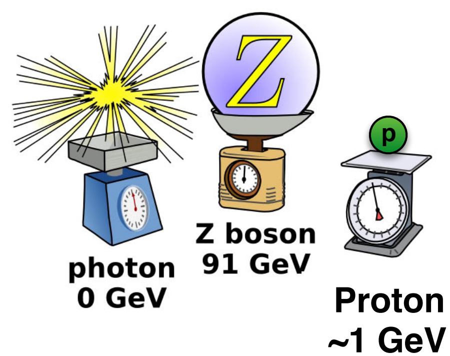


- **Interacción débil:** Radioactividad, estrellas, fusión, …



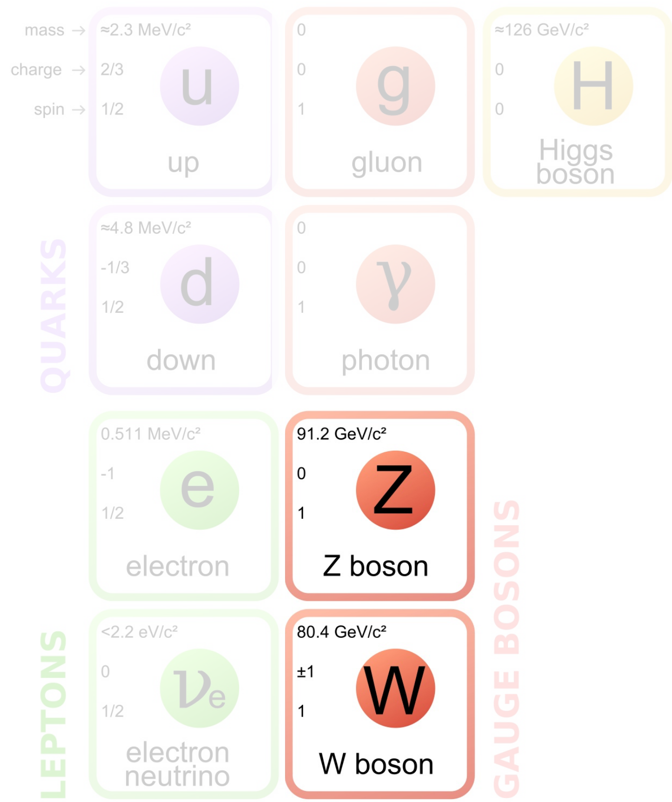
- W/Z proposed in the '60s (Glashow, Abdus Salam, Weinberg);
- Particles first detected in 1983 @ CERN!

- W/Z son muy pesados → Muy corto alcance!

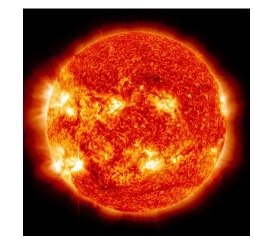


$$F(r) \sim \frac{e^{-m\,r}}{r^2}$$

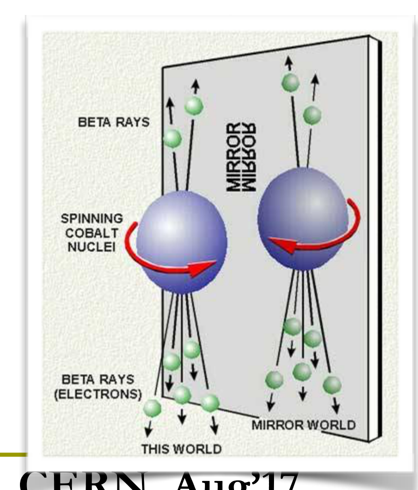
El Modelo Estándar: W & Z



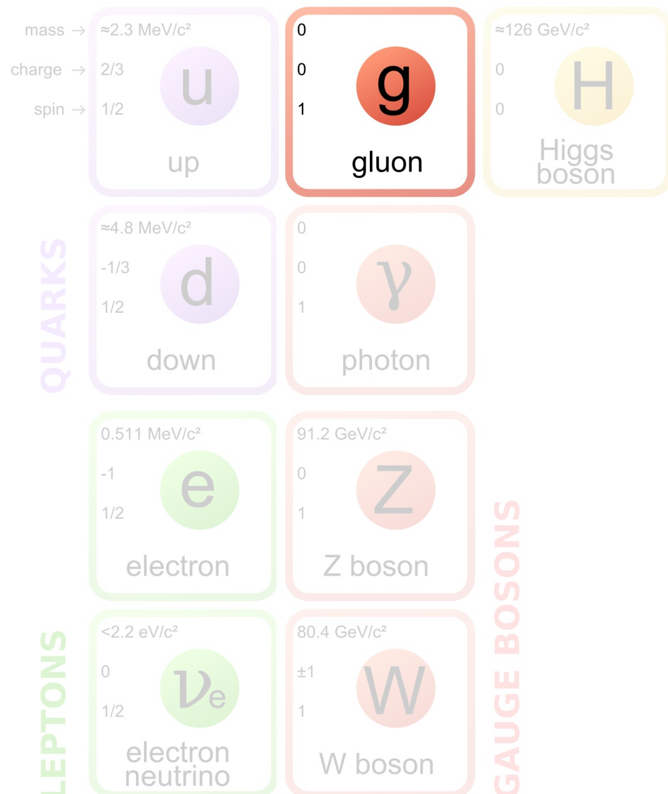
- **Interacción débil:** Radioactividad, estrellas, fusión, …



- W/Z proposed in the '60s (Glashow, Abdus Salam, Weinberg);
- Particles first detected in 1983 @ CERN!
- W/Z son muy pesados → Muy corto alcance!
- Diferencian izquierda y derecha!



El Modelo Estándar: gluon

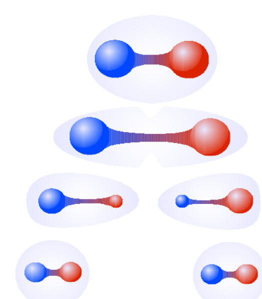


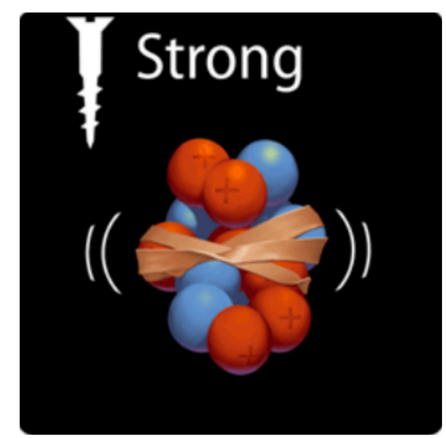
- Cómo pueden estar los protones tan cerca en el núcleo? → **Interacción fuerte** (QCD)

- QED vs QCD:
  Fotón → gluon (8);
  Carga → "color" (3);

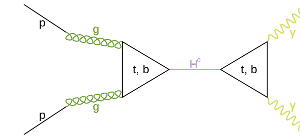
- Es tan fuerte que confina los quarks; $F(r) \sim \frac{e^{-m\,r}}{r^2}$
- Genera dinámicamente una escala → corto alcance;

- It generates 95% of the mass of ordinary matter;

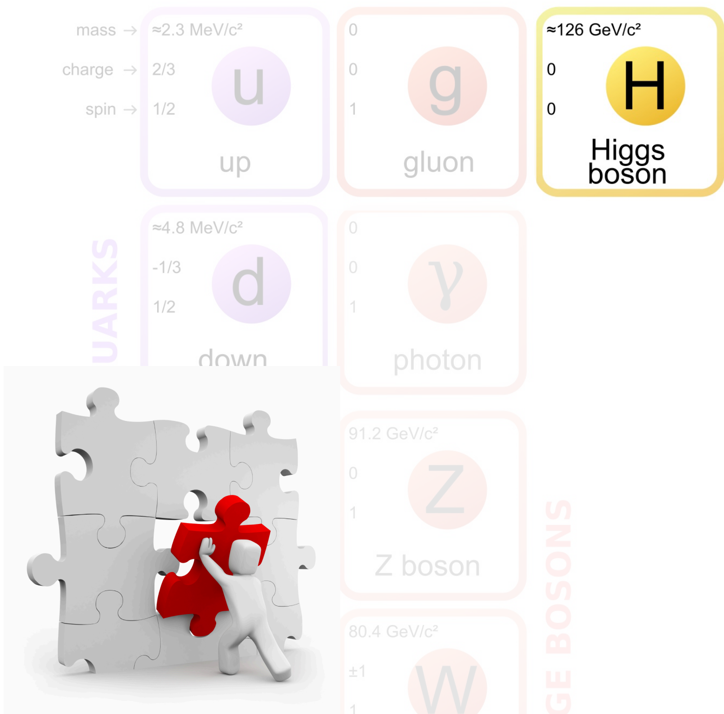


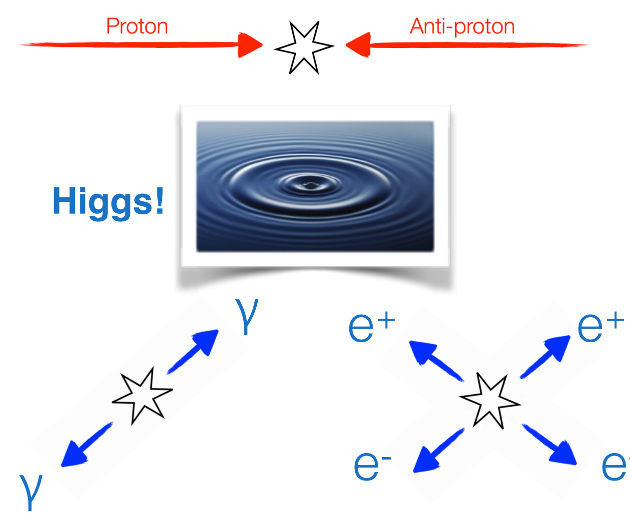


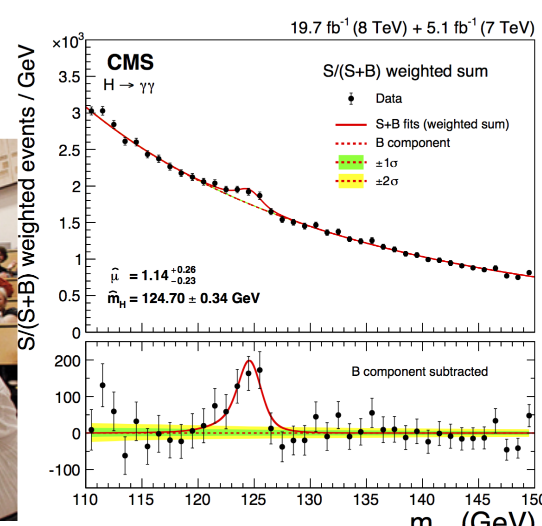
El Modelo Estándar: Higgs!

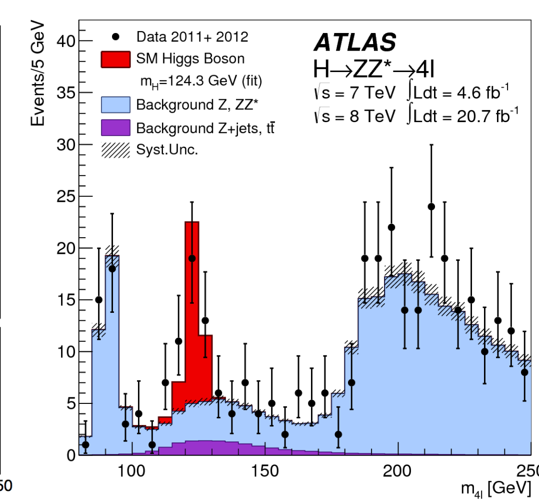


- Propuesto en los '60 (Higgs, Englert, …);
- Partícula descubierta en 2012;

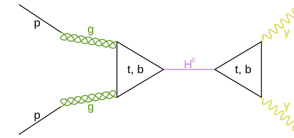




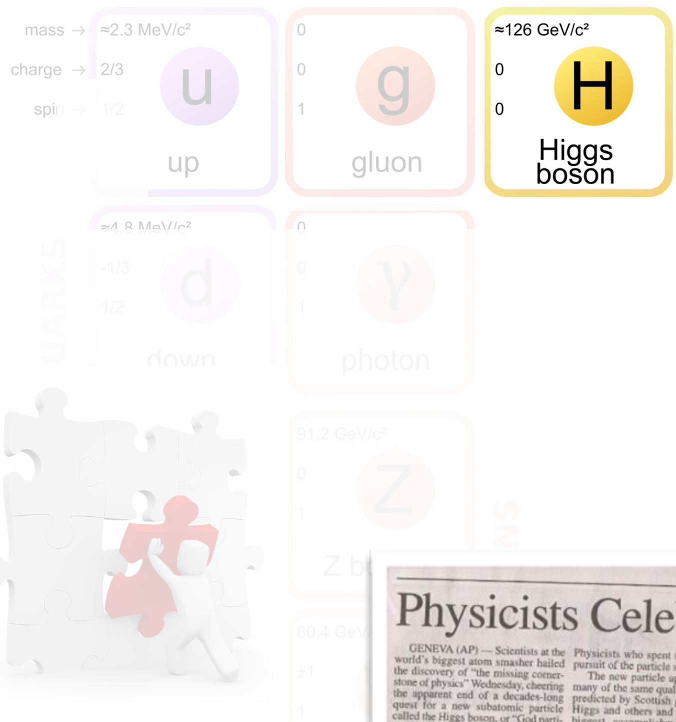


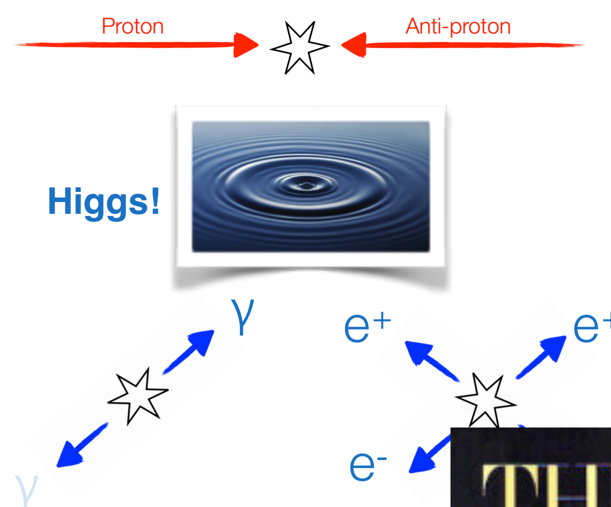


El Modelo Estándar: Higgs!



- Propuesto en los '60 (Higgs, Englert, …);
- Partícula descubierta en 2012;





WORLD THURSDAY, JULY 5, 2012 Tyler Morning Telegraph 5B

Physicists Celebrate Evidence Of 'God Particle'

GENEVA (AP) — Scientists at the world's biggest atom smasher hailed the discovery of "the missing cornerstone of physics" Wednesday, cheering the apparent end of a decades-long quest for a new subatomic particle called the Higgs boson, or "God particle," which could help explain why all matter has mass and crack open a new realm of subatomic science.

First proposed as a theory in the 1960s, the maddeningly elusive Higgs had been hunted by at least two generations of physicists who believed it would help shape our understanding of how the universe began and how its most elemental pieces fit together.

As the highly technical findings were announced by two independent teams involving more than 5,000 researchers, the usually sedate corridors of the European Center for Nuclear Research, or CERN, erupted in frequent applause and standing ovations. Physicists who spent their careers in pursuit of the particle shed tears.

The new particle appears to share many of the same qualities as the one predicted by Scottish physicist Peter Higgs and others and is perhaps the biggest accomplishment at CERN since its founding in 1954 outside Geneva along the Swiss-French border.

Rolf Heuer, director of CERN, said the newly discovered particle is a boson, but he stopped just shy of claiming outright that it is the Higgs boson itself — an extremely fine distinction.

"As a layman, I think we did it," he told the elated crowd. "We have a discovery. We have observed a new particle that is consistent with a Higgs boson."

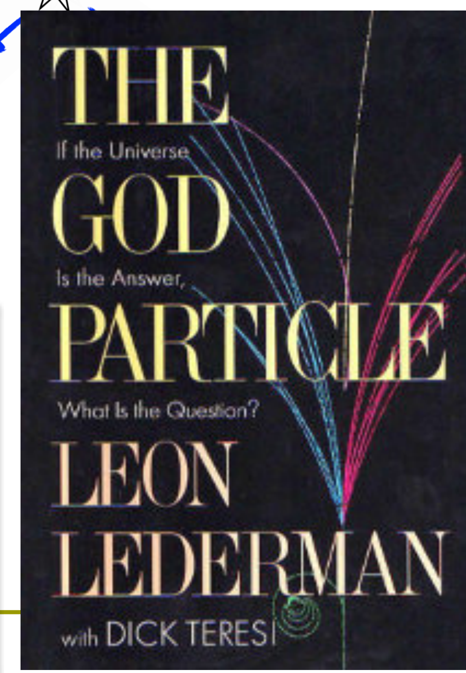
The Higgs, which until now had been purely theoretical, is regarded as key to understanding why matter has mass, which combines with gravity to give all objects weight.

The idea is much like gravity and Isaac Newton's early theories. Gravity was there all the time before Newton explained it. The Higgs boson was believed to be there, too. And now that scientists have actually seen some-

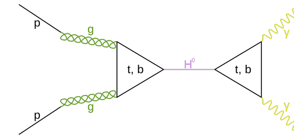
… finding a Higgs-like boson was one of the biggest challenges in physics: Out of some 500 trillion collisions, just several dozen produced "events" with significant data, said Joe Incandela of the University of California at Santa Barbara, leader of the team known as CMS, with 2,100 scientists.

Later, she told reporters that the standard model of physics is still incomplete because "the dream is to find an ultimate theory that explains everything. We are far from that."

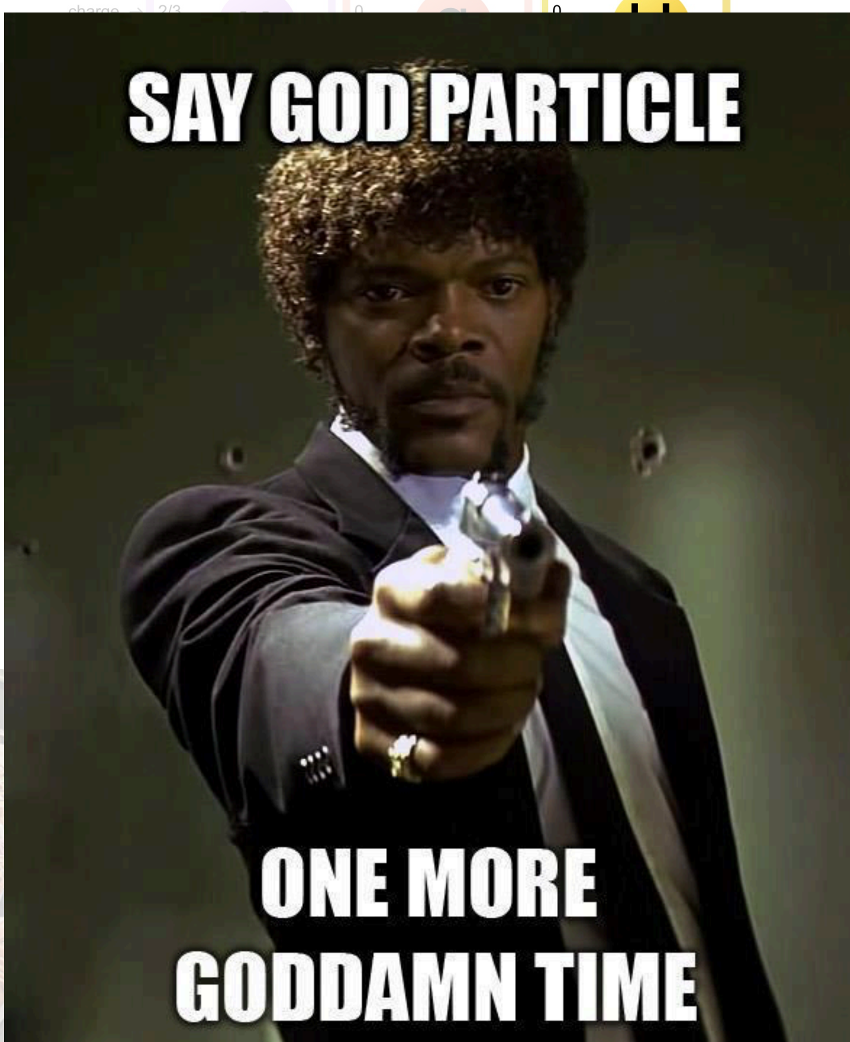
Incandela said it was too soon to say definitively whether the particle …

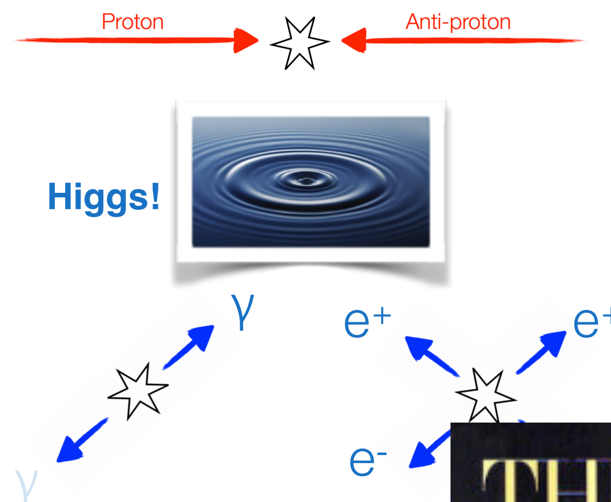


El Modelo Estándar: Higgs!



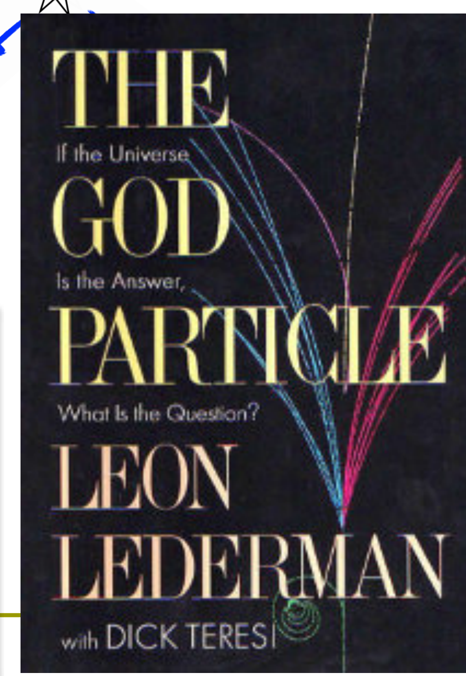
- Propuesto en los '60 (Higgs, Englert, …);
- Partícula descubierta en 2012;



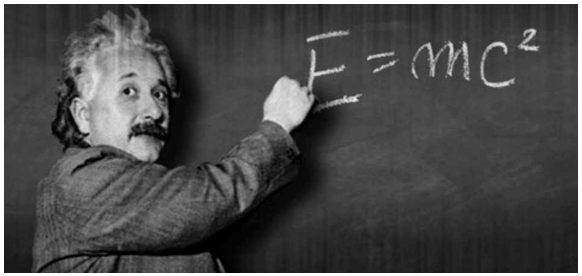



WORLD THURSDAY, JULY 5, 2012 Tyler Morning Telegraph 5B

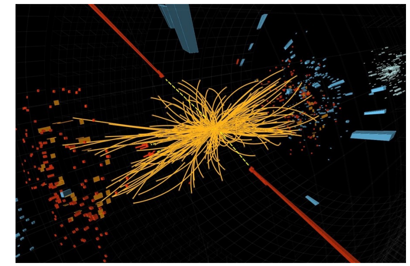
Evidence Of 'God Particle'

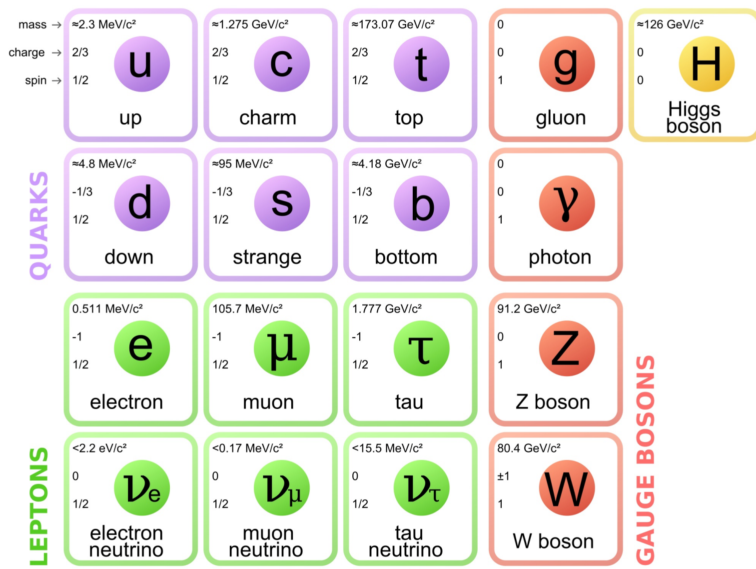


El Modelo Estándar: familias

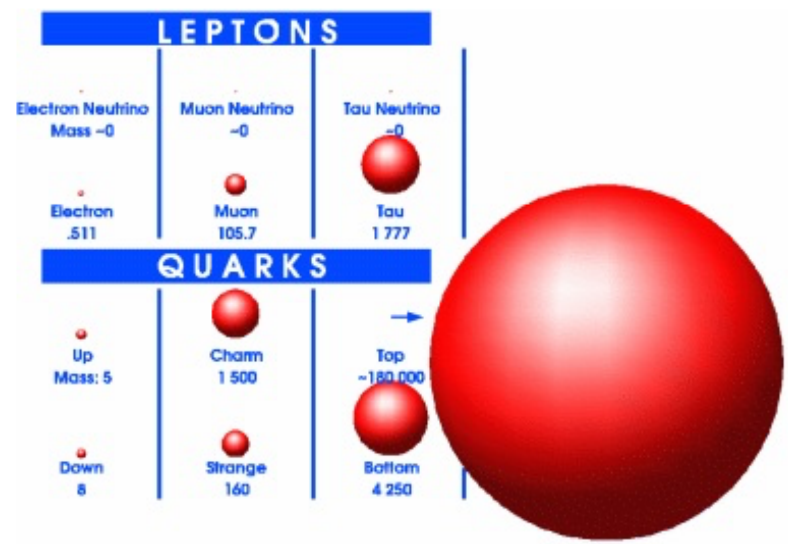


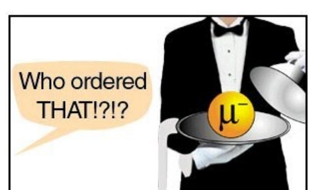
Es posible ***crear*** partículas





- Muon (1936) → Top (1995), ν_τ (2000);
- Inestables;
- Solo el Higgs las diferencia y las conecta;





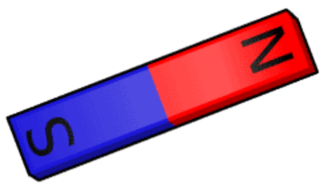
El Modelo Estándar

$$
\begin{aligned}
\mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\
& + i \bar{\psi} \not{D} \psi + h.c. \\
& + \bar{\psi}_i y_{ij} \psi_j \phi + h.c. \\
& + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)
\end{aligned}
$$

- Simple?
- Toda la física "convencional" descrita; (SM + gravedad)
- Cálculos extremadamente complejos (QCD!);

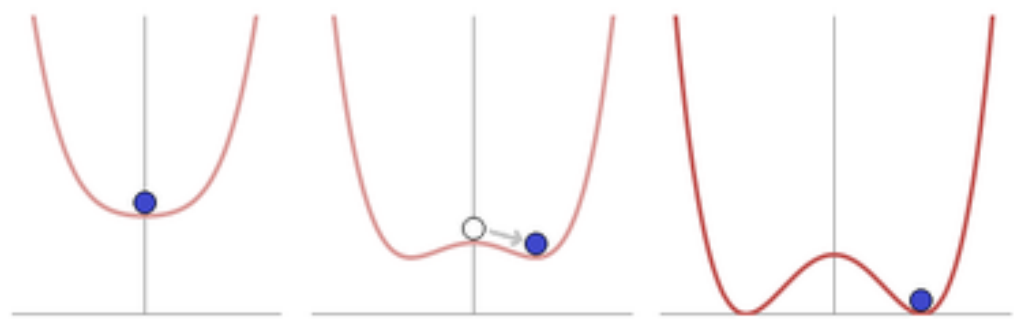
Por qué hacía falta el Higgs?

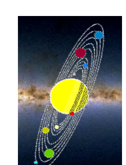
- Sin Higgs el Modelo Estándar describe un mundo "parecido" al nuestro, pero las partículas elementales no tienen masa.
- Las masas son incompatibles con la simetría de gauge (elemento central de la teoría);
- Analogías:

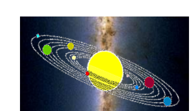


Mi teoría (electromagnetismo / gravedad) parece incompatible con una dirección privilegiada.

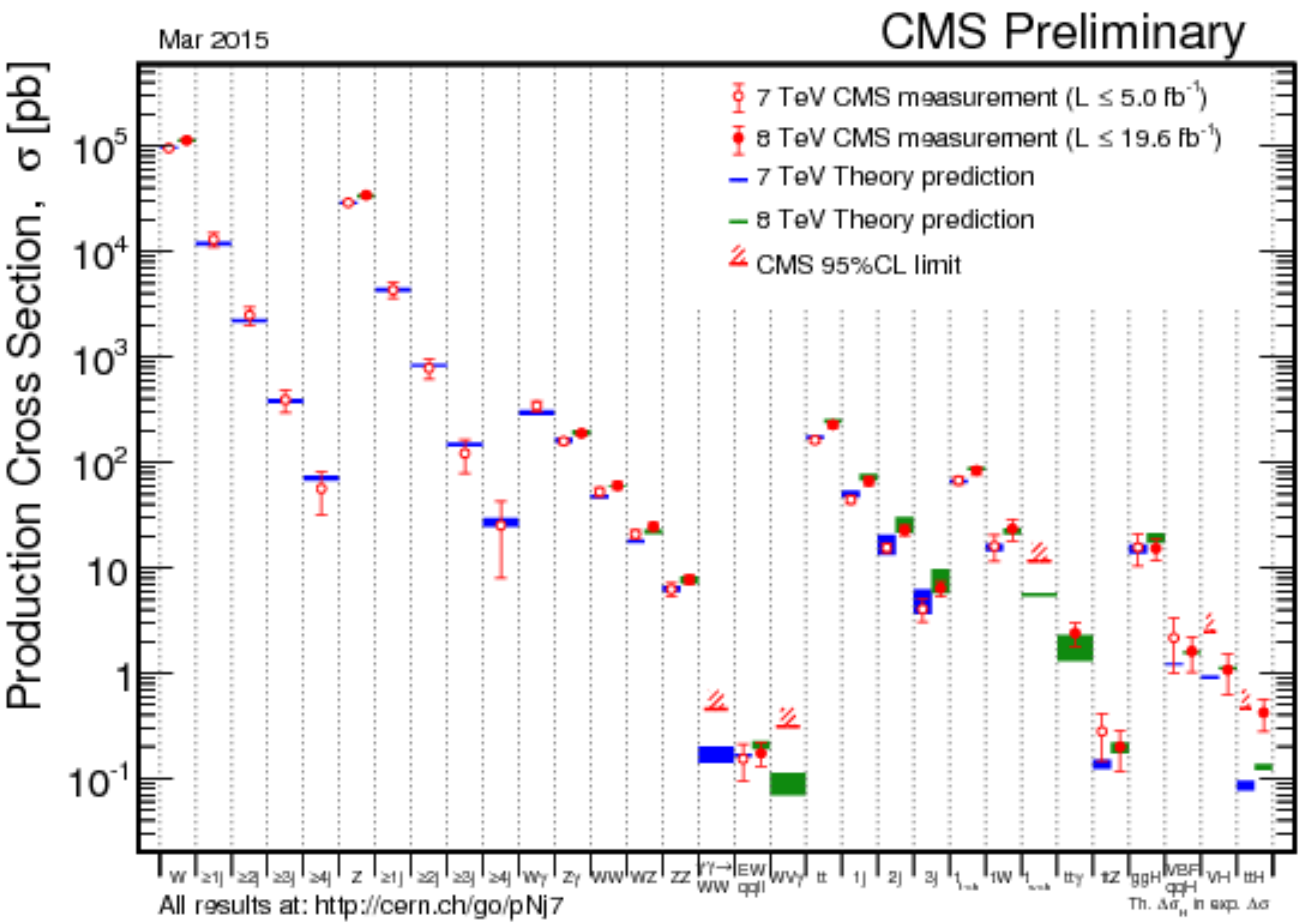
- Higgs et al. aplicaron esta idea. Masas como resultado de la evolución térmica del universo;







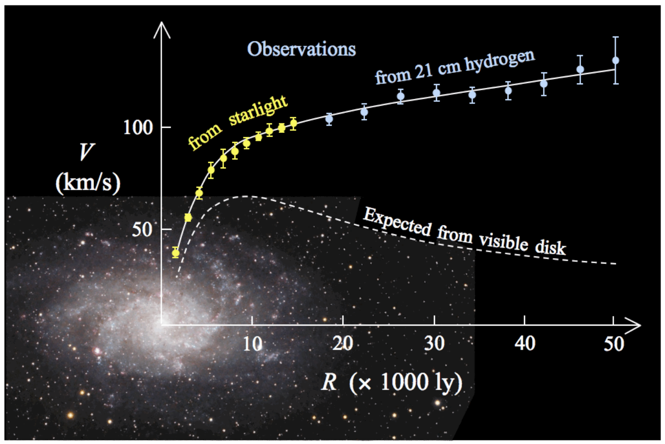
Éxito enorme!



(Y en colisionadores menos potentes)

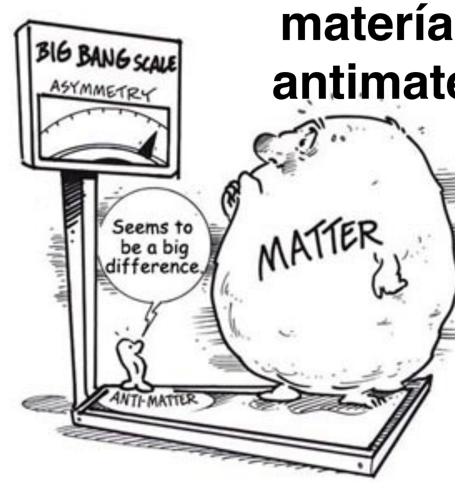
Cualquier "anomalía" recibe una enorme atención…

Demasiado éxito?



Materia oscura
(~80% de la materia del universo!)

Por qué hay más materia que antimateria?

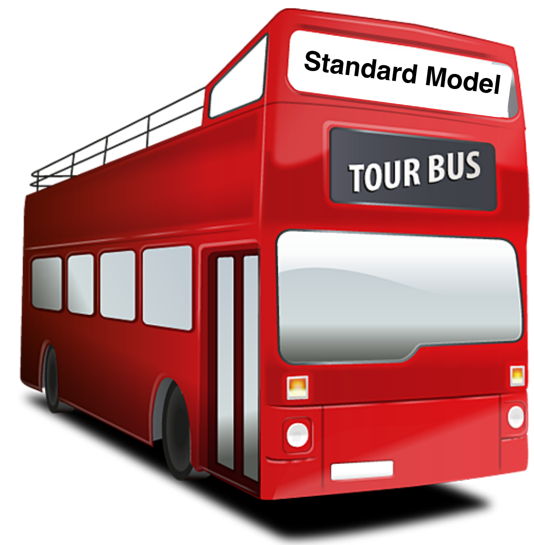


Qué subyace bajo la tabla periódica del Modelo Estándar?

…

Para más visitas guiadas…

- *La brújula de la ciencia* (A. Aparici, podcast);
- Blogs: *Of particular significance, Resonaances, …*
- *El tejido del cosmos* (Brian Greene);
- *Electrones, neutrinos y quarks* (F. J. Yndurain);
- *The inward bound* (A. Pais, historia);
- …



Backup slides

La fuerza relativa de las interacciones

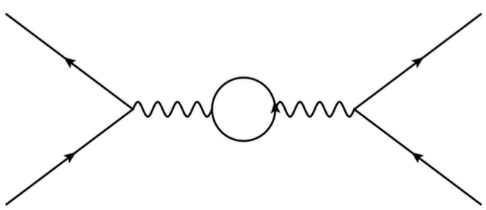
Properties of the Interactions

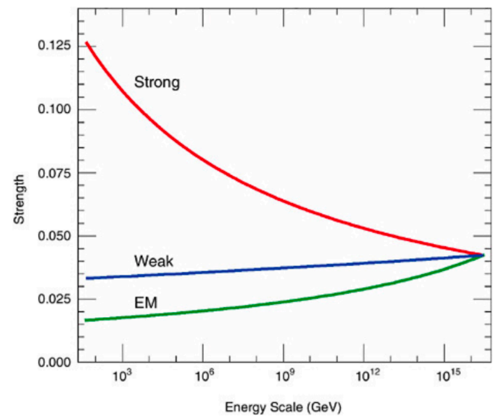
The strengths of the interactions (forces) are shown relative to the strength of the electromagnetic force for two u quarks separated by the specified distances.

Property	Gravitational Interaction	Weak Interaction (Electroweak)	Electromagnetic Interaction	Strong Interaction
Acts on:	Mass – Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically Charged	Quarks, Gluons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	γ	Gluons
Strength at 10^{-18} m	10^{-41}	0.8	1	25
Strength at 3×10^{-17} m	10^{-41}	10^{-4}	1	60

- **Las constantes de acoplamiento no son constantes!**

- EL **vacío cuántico** actúa como dieléctrico





$F \sim g^2 / r^2$

- **Recordar: Distancia ∼1/Energía**

Simetrías

Ley
(fuerza / Lagrangiano)

Antes →

← Ahora

Simetría