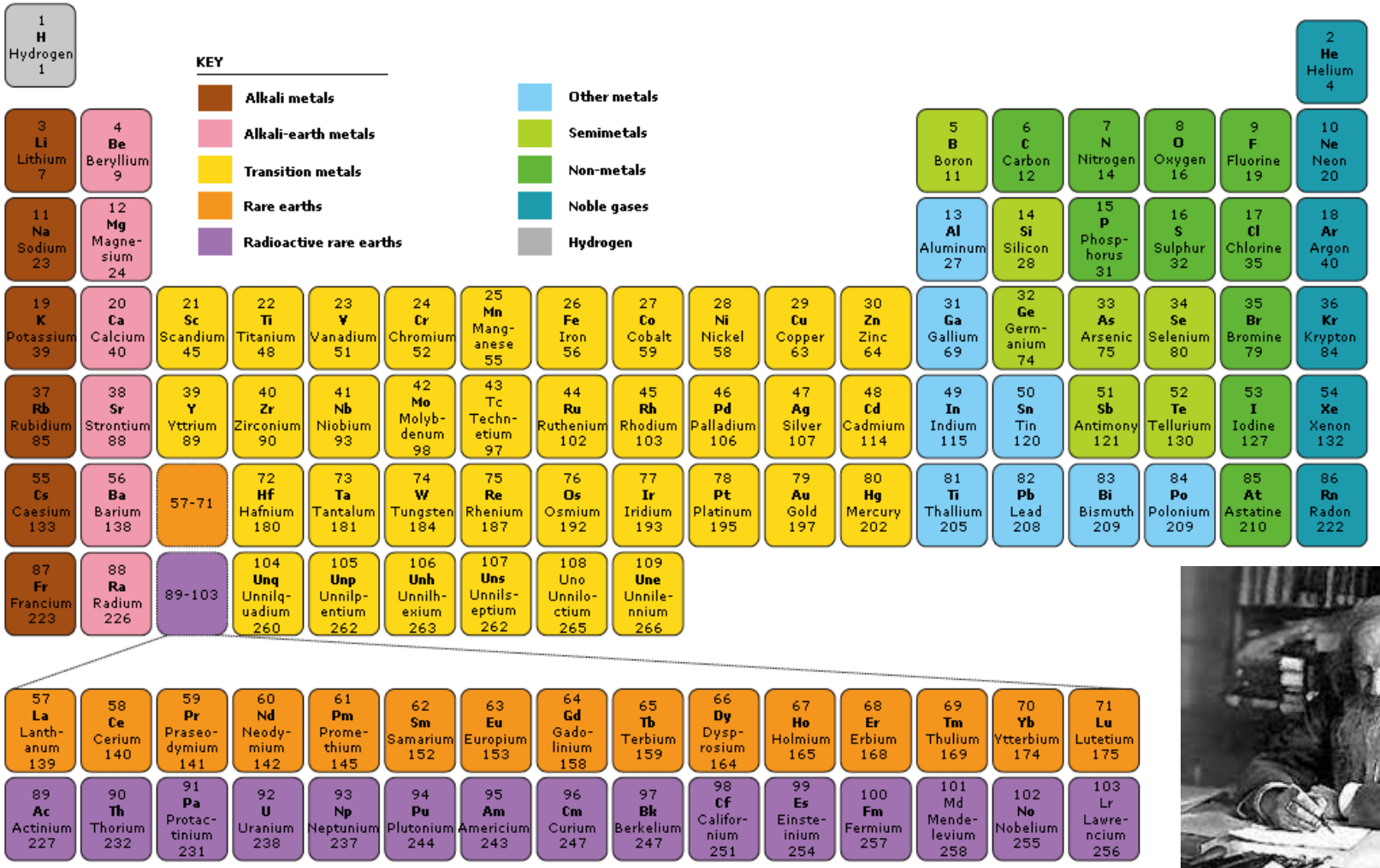
Masterclass 2024

El Modelo Estándar de las partículas elementales

Los neutrinos y sus interacciones

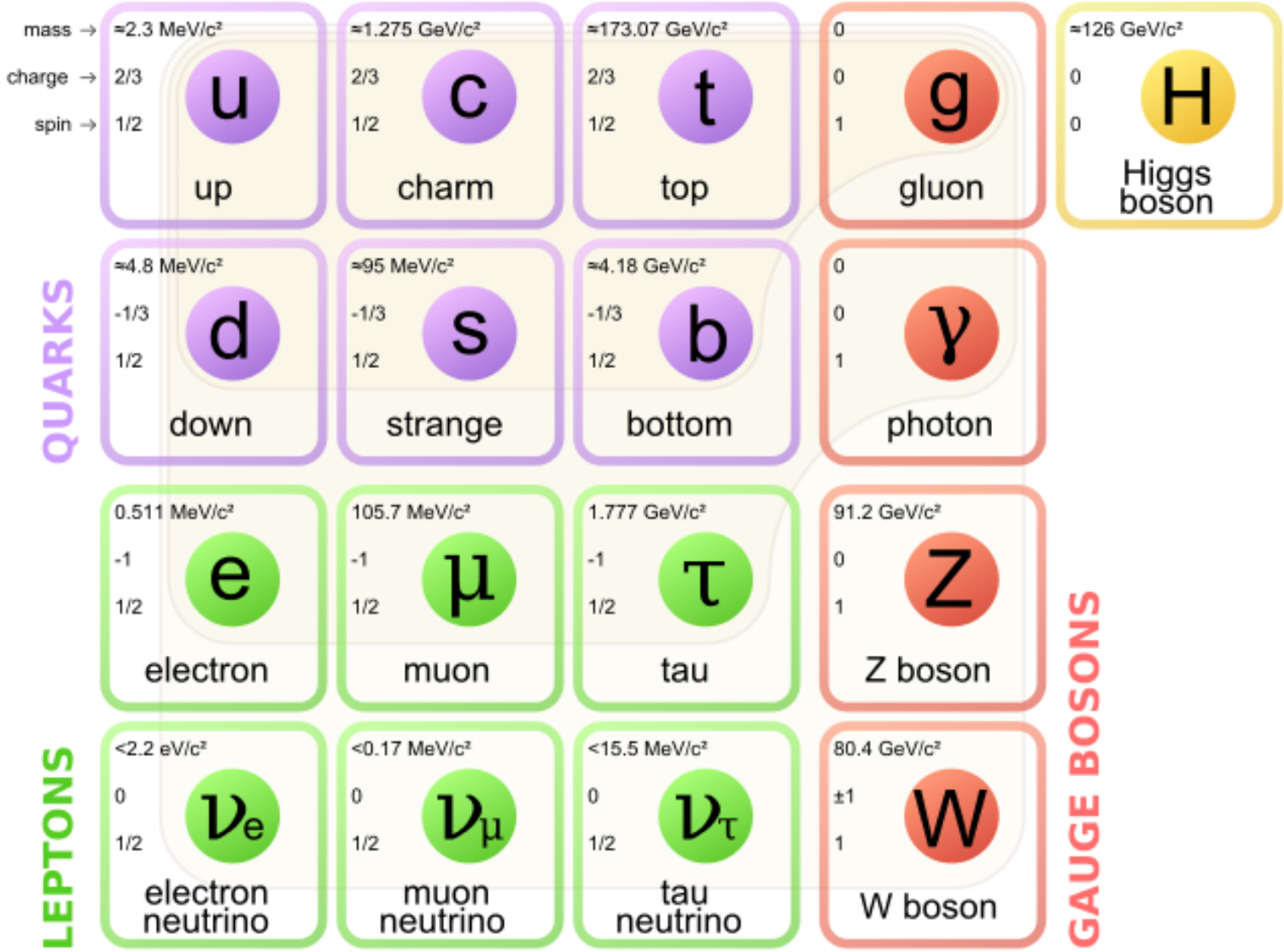
Luis Alvarez Ruso

Tabla periódica de los elementos



Дмитрій Ивановичъ Менделѣевъ 1869

“Tabla Periódica” de las partículas elementales



Modelo Estándar

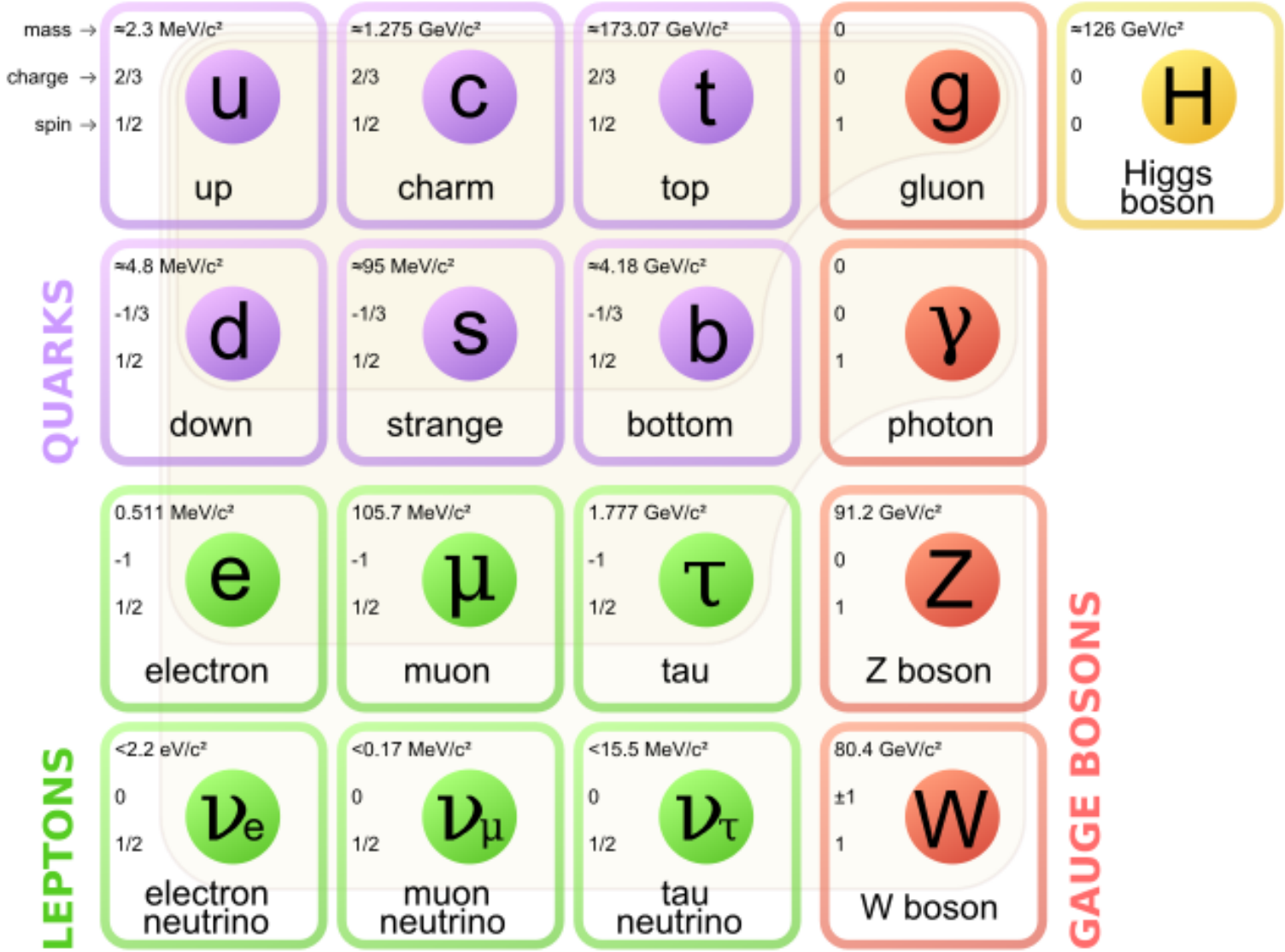
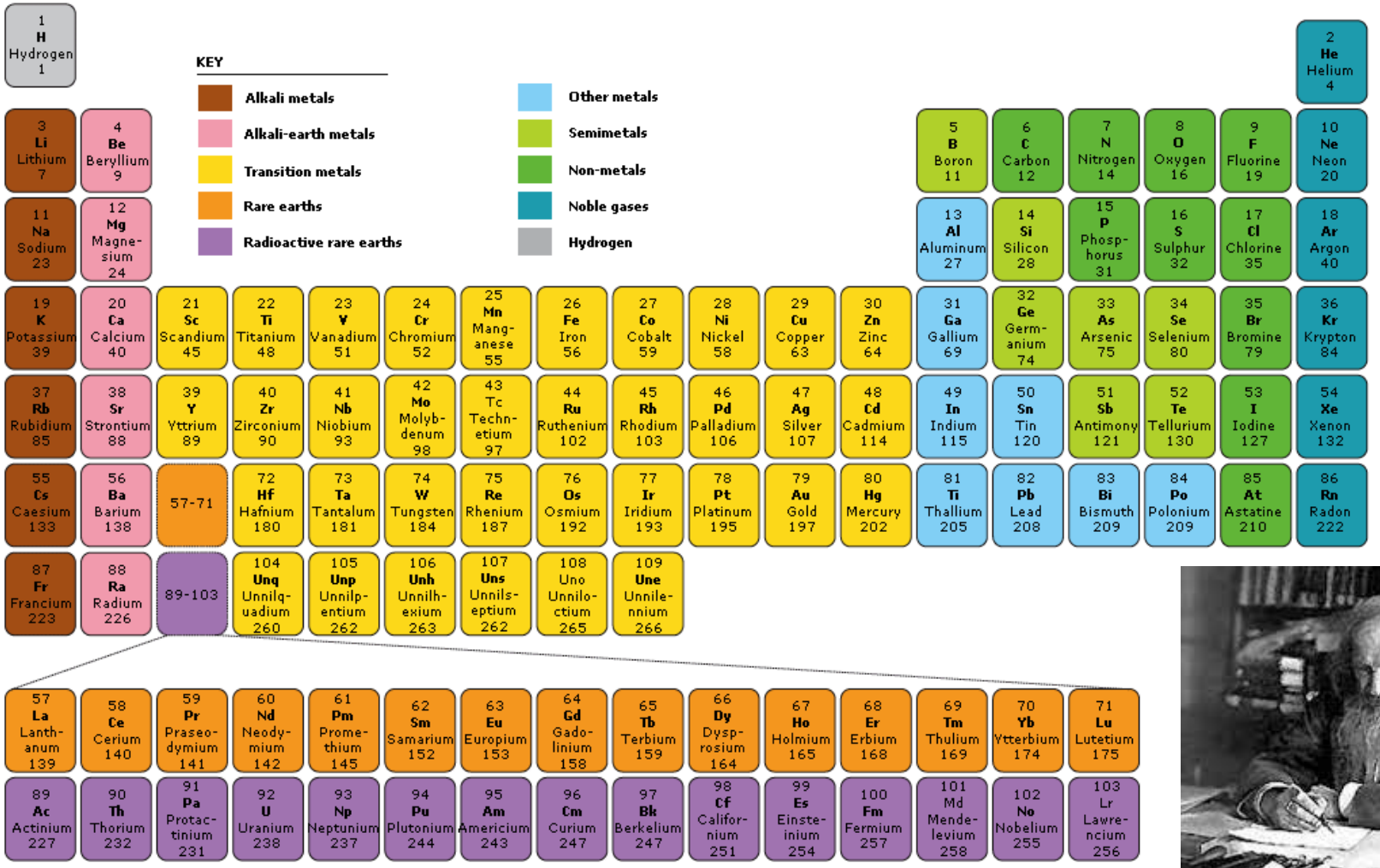


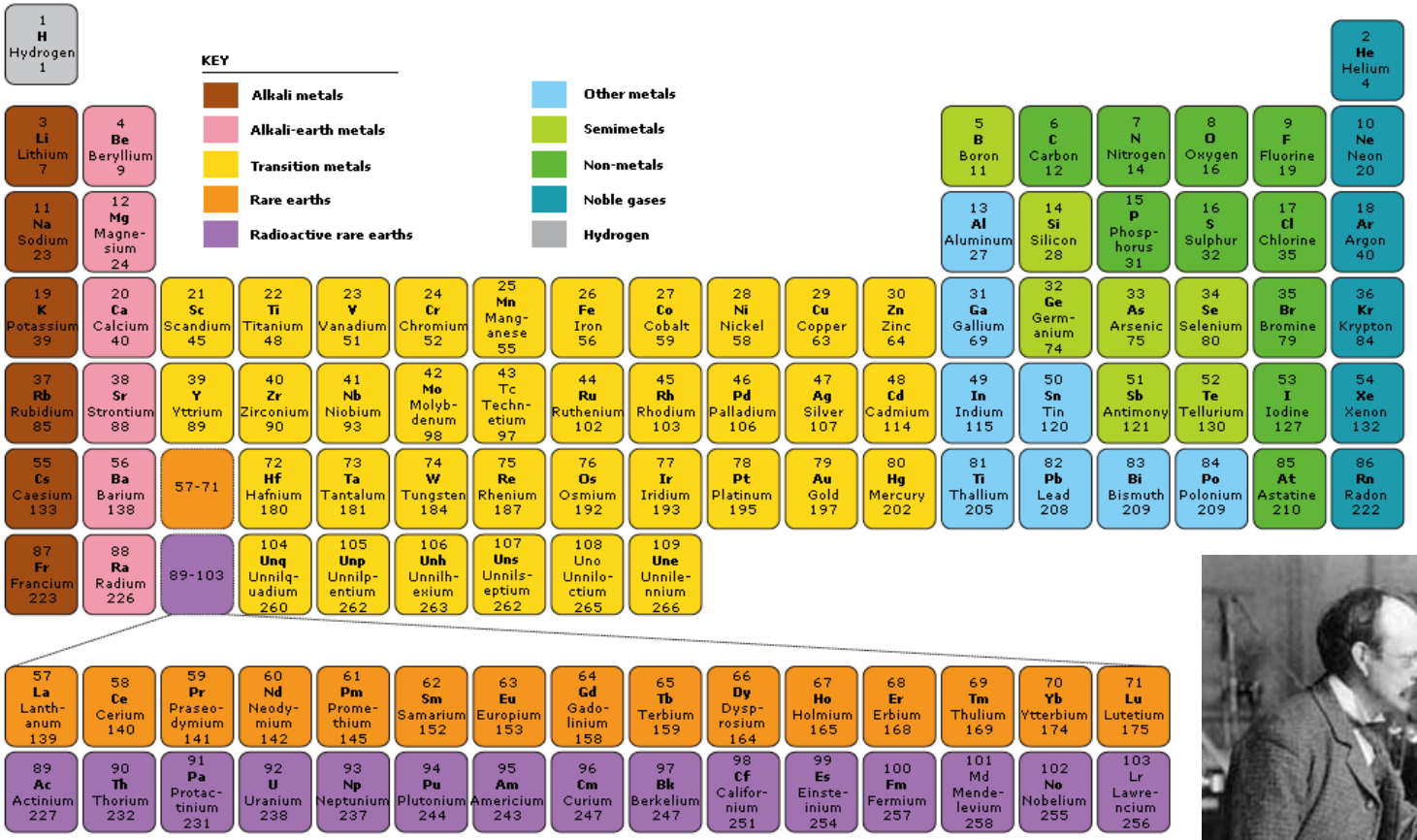
Tabla periódica de los elementos

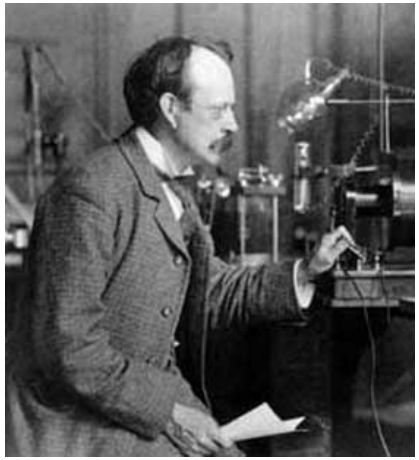


- Elementos químicos ⇔ átomos

Дмитрій Ивановичъ Менделѣевъ 1869

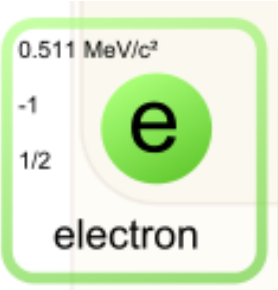
Tabla periódica de los elementos



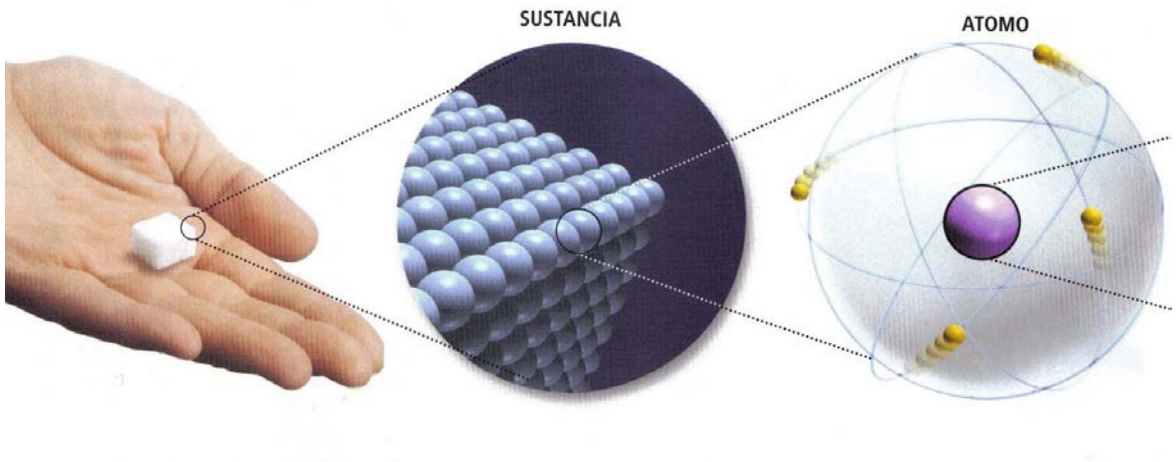


- Elementos químicos ⇔ átomos
- Pero, ¿son los átomos “elementales”?
  - **No**: iones, electrones: primera partícula elemental descubierta.
    - J. J. Thomson (1897) **corpúsculos**

Modelo Estándar



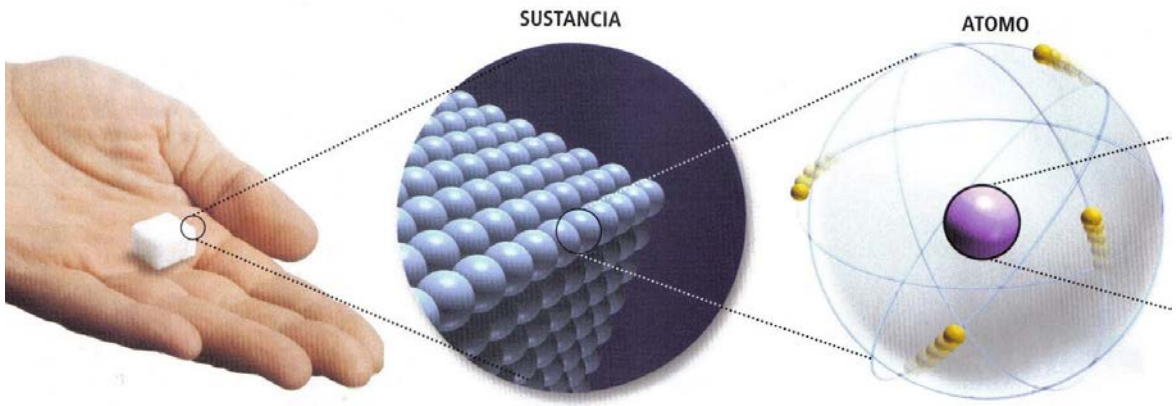
La estructura del átomo



E. Rutherford

- ¡Los átomos están vacíos!
  - Radio atómico ~ 1 Å = 10^{-10} m >> Radio nuclear ~ 1 fm = 10^{-15} m

La estructura del átomo

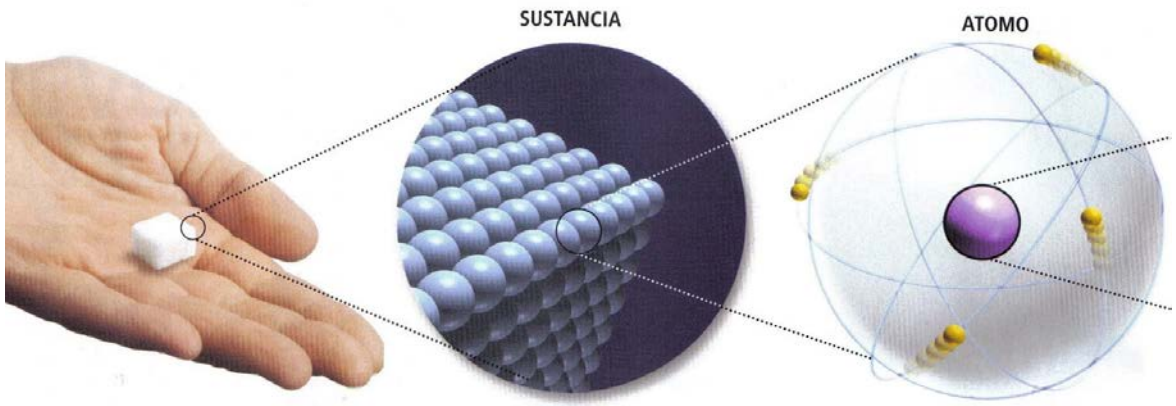


W. Heisenberg

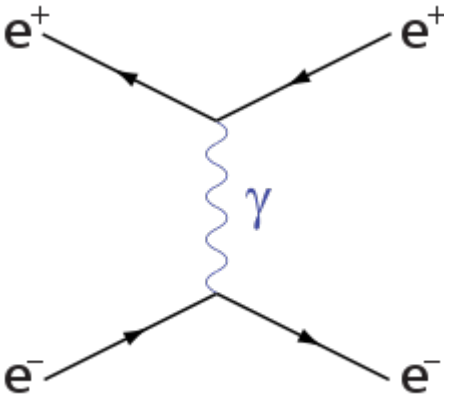
- **Física clásica**: $\vec{r}_i(t)$, $\vec{p}_i(t)$
- **Física cuántica**: predice la **probabilidad** de que el sistema se encuentre en un cierto estado.
  - Los electrones en el átomo **no** se mueven en trayectorias clásicas.
  - Principio de incertidumbre de Heisenberg: limita la capacidad de determinar **simultáneamente** la posición del electron y su momento lineal:

$$\Delta x \, \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \qquad h = (2\pi)\hbar$$: constante de Planck

La estructura del átomo



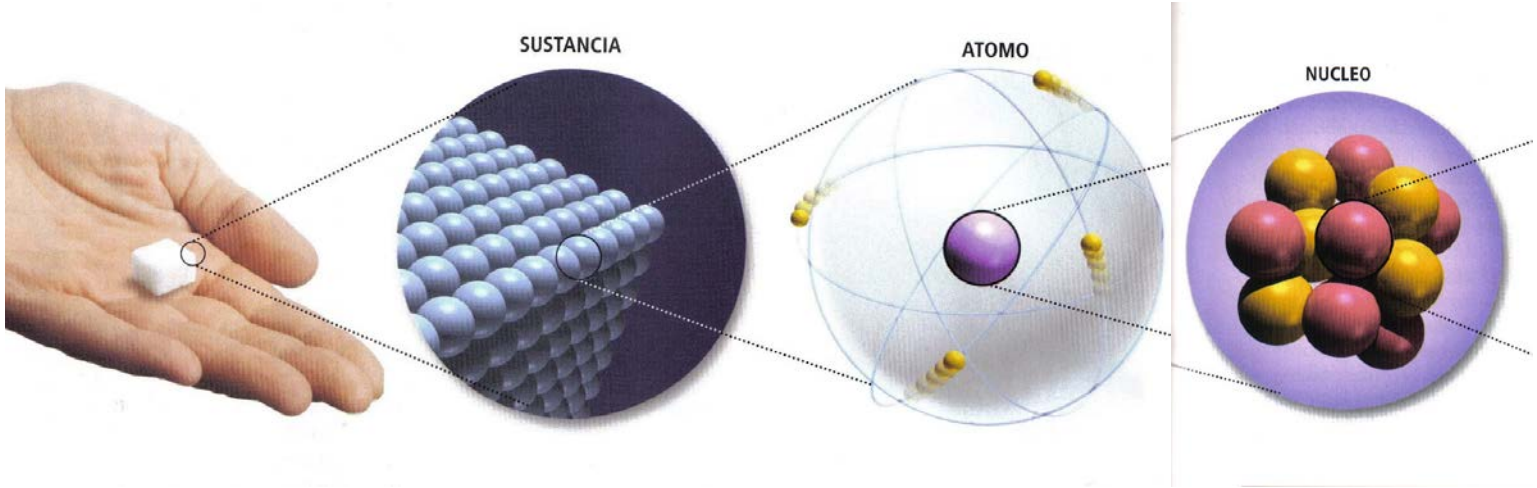
- **Física clásica**: $\vec{r}_i(t)$, $\vec{p}_i(t)$
- **Física cuántica**: predice la **probabilidad** de que el sistema se encuentre en un cierto estado.
  - Interacción electromagnética: intercambio de cuantos de luz (**fotones**) entre cargas
    - Fotones: partículas elementales, neutras y sin masa



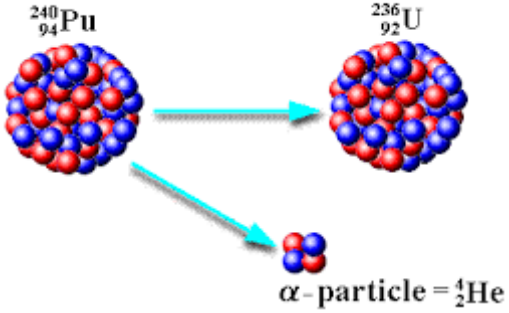
Modelo Estándar

c

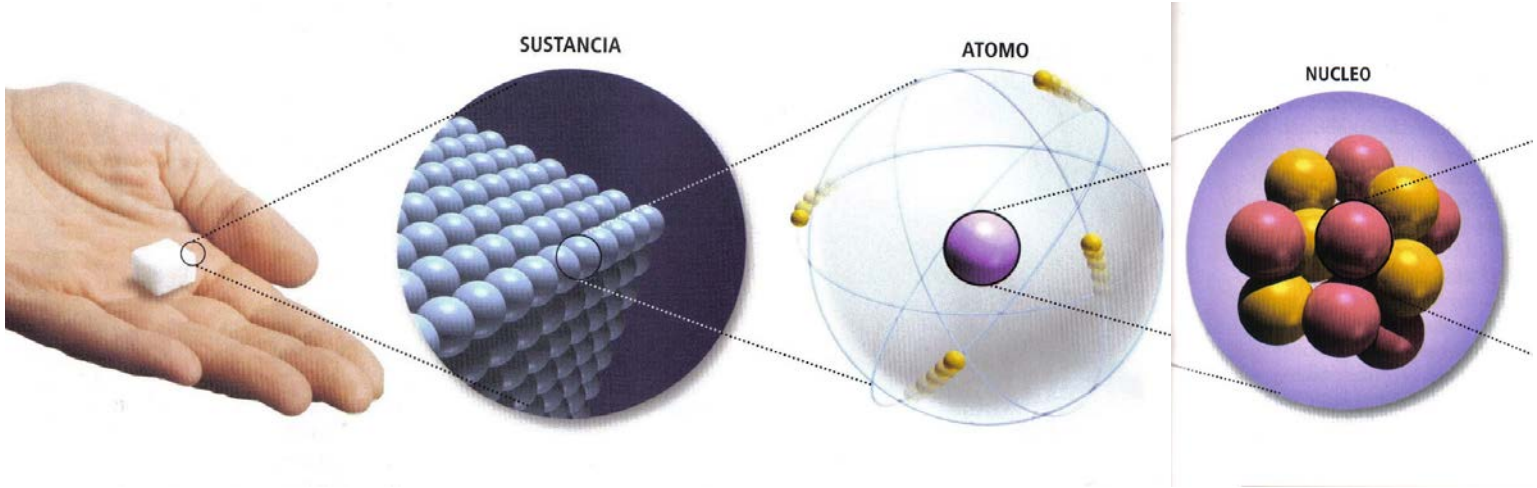
La estructura del átomo



- ¡Los átomos están vacíos!
  - Radio atómico ~ 1 Å = 10^{-10} m >> Radio nuclear ~ 1 fm = 10^{-15} m
- Los núcleos tampoco son elementales.
  - Ejemplo: **radiactividad** α



La estructura del átomo



- ¡Los átomos están vacíos!
  - Radio atómico ~ 1 Å = 10^{-10} m >> Radio nuclear ~ 1 fm = 10^{-15} m
- Los núcleos tampoco son elementales.
  - Ejemplo: **radiactividad** α
  - Compuestos por protones (núcleo del átomo de H) y **neutrones**
  - La interacción **fuerte** sujeta p y n en el núcleo.

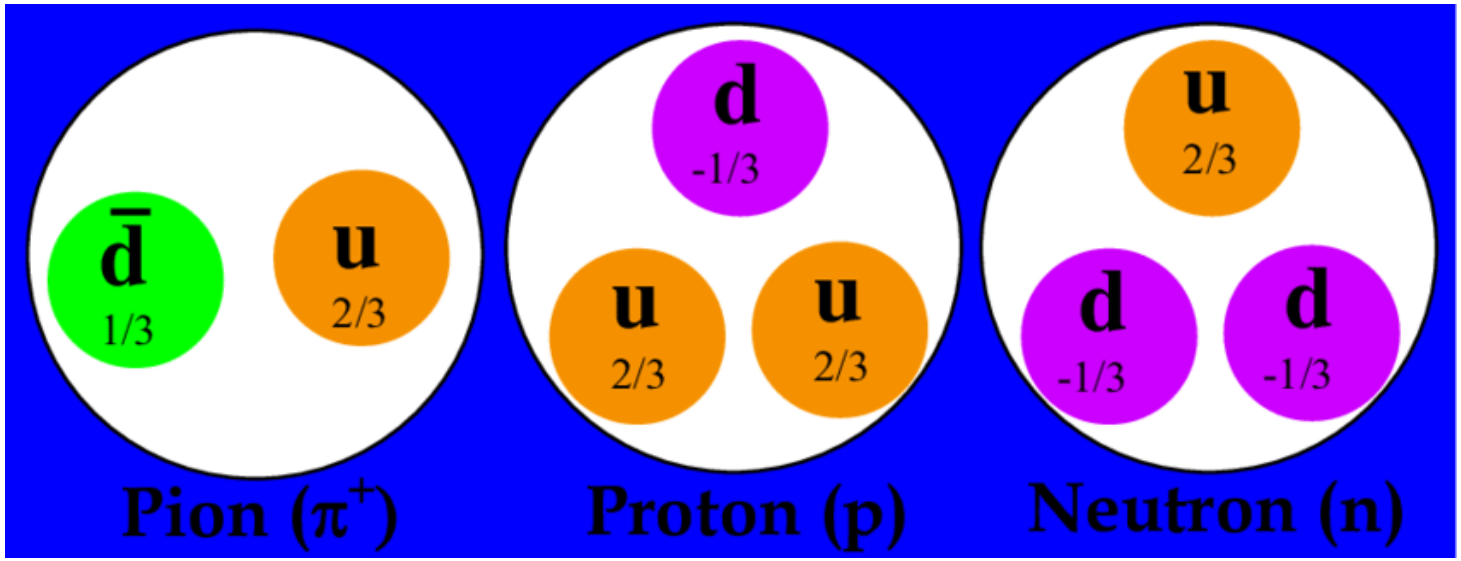
J. Chadwick 1932

Partículas subnucleares

- **p, n, e, γ ¿partículas elementales?** Pero...
- ¿cuál es el mediador de la interacción fuerte?
- Hadrones (interacción fuerte):
  - Mesones: π, ρ, ω, ...
  - Bariones: N*, Δ, ...

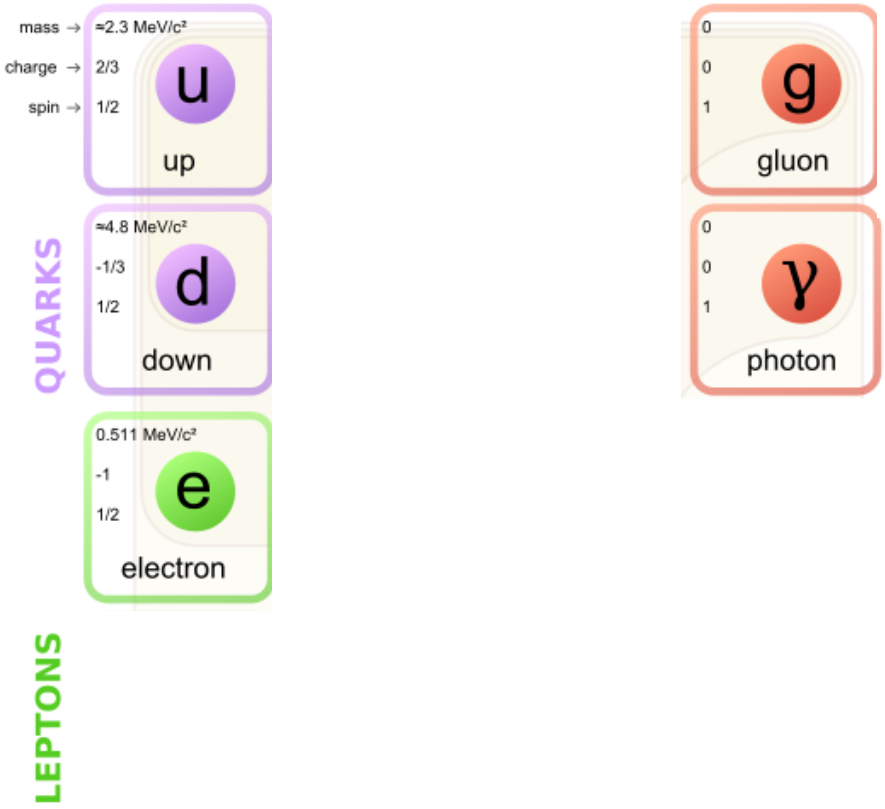
Partículas subnucleares

- Los hadrones están compuestos por **quarks**: u, d, ... (carga: 2/3, -1/3)
  - Mesones: quark + antiquark
  - Bariones: quark + quark + quark
- Mediador de la interacción fuerte: gluones
- Quarks y gluones están **confinados** en los hadrones



Modelo Estándar

- leptones: e
- mediador de la interacción electromagnética: γ
- quarks: u, d
- mediador de la interacción fuerte: g

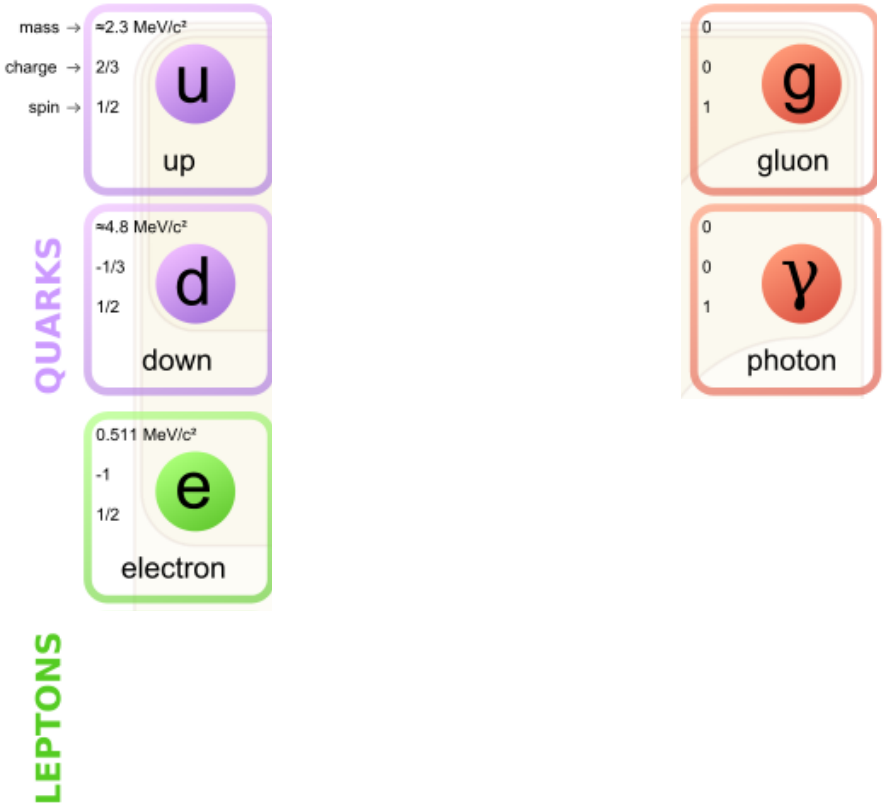


Partículas subnucleares

- Hadrones (interacción fuerte):
  - Mesones: π, ρ, ω, ...
    - con “extrañeza”: K, K*
    - con “encanto”: D, D*
    - ...
  - Bariones: N*, Δ, ...
    - con “extrañeza”: Λ, Σ, Ξ, ...
    - con “encanto”: Λ_c , Σ_c , ...
    - ...

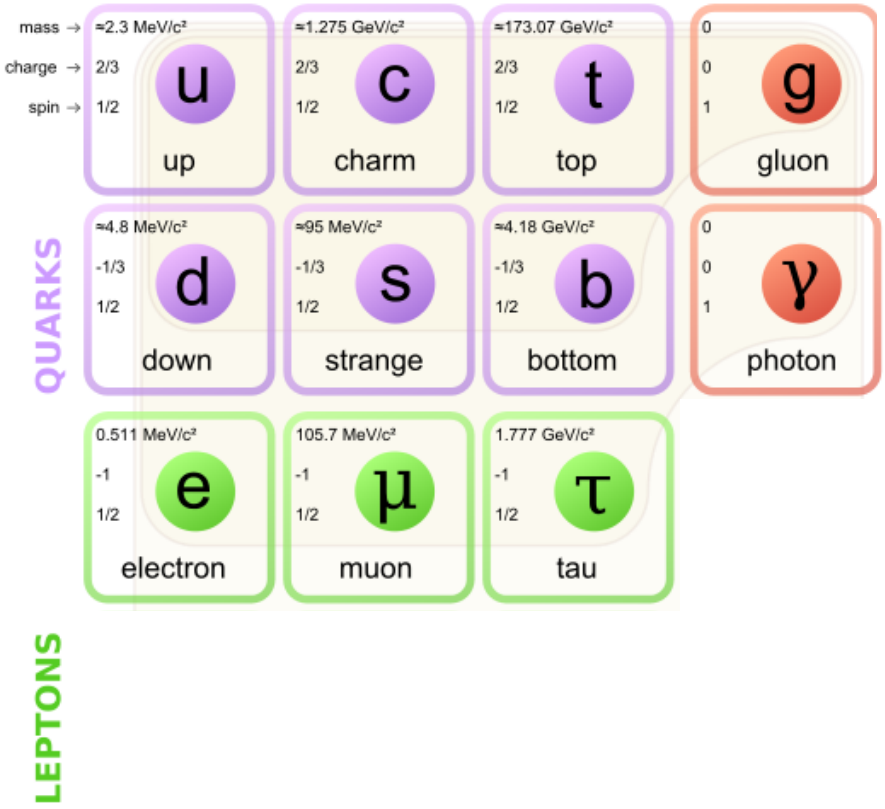
Modelo Estándar

- leptones: e
- mediador de la interacción electromagnética: γ
- quarks: u, d
- mediador de la interacción fuerte: g



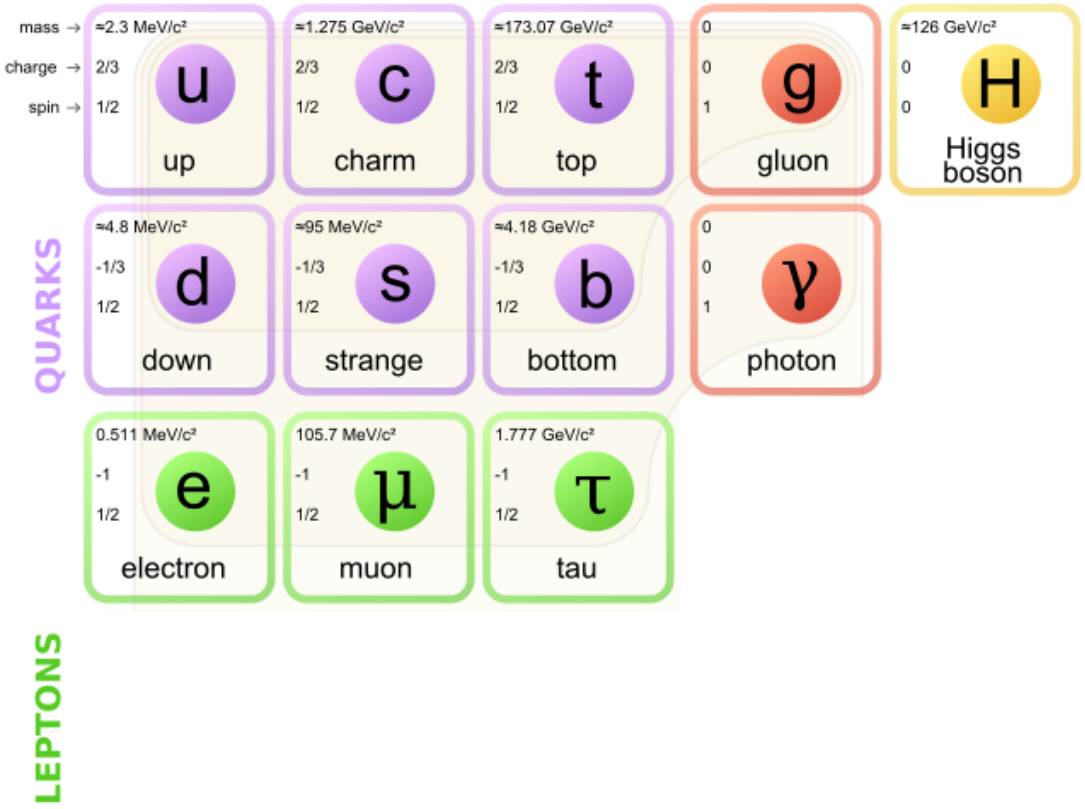
Modelo Estándar

- leptones: e, μ, τ
- mediador de la interacción electromagnética: γ
- quarks: u, d, c, s, t, b
- mediador de la interacción fuerte: g

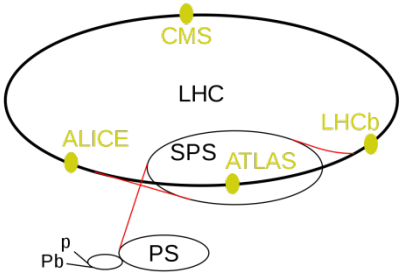


Modelo Estándar

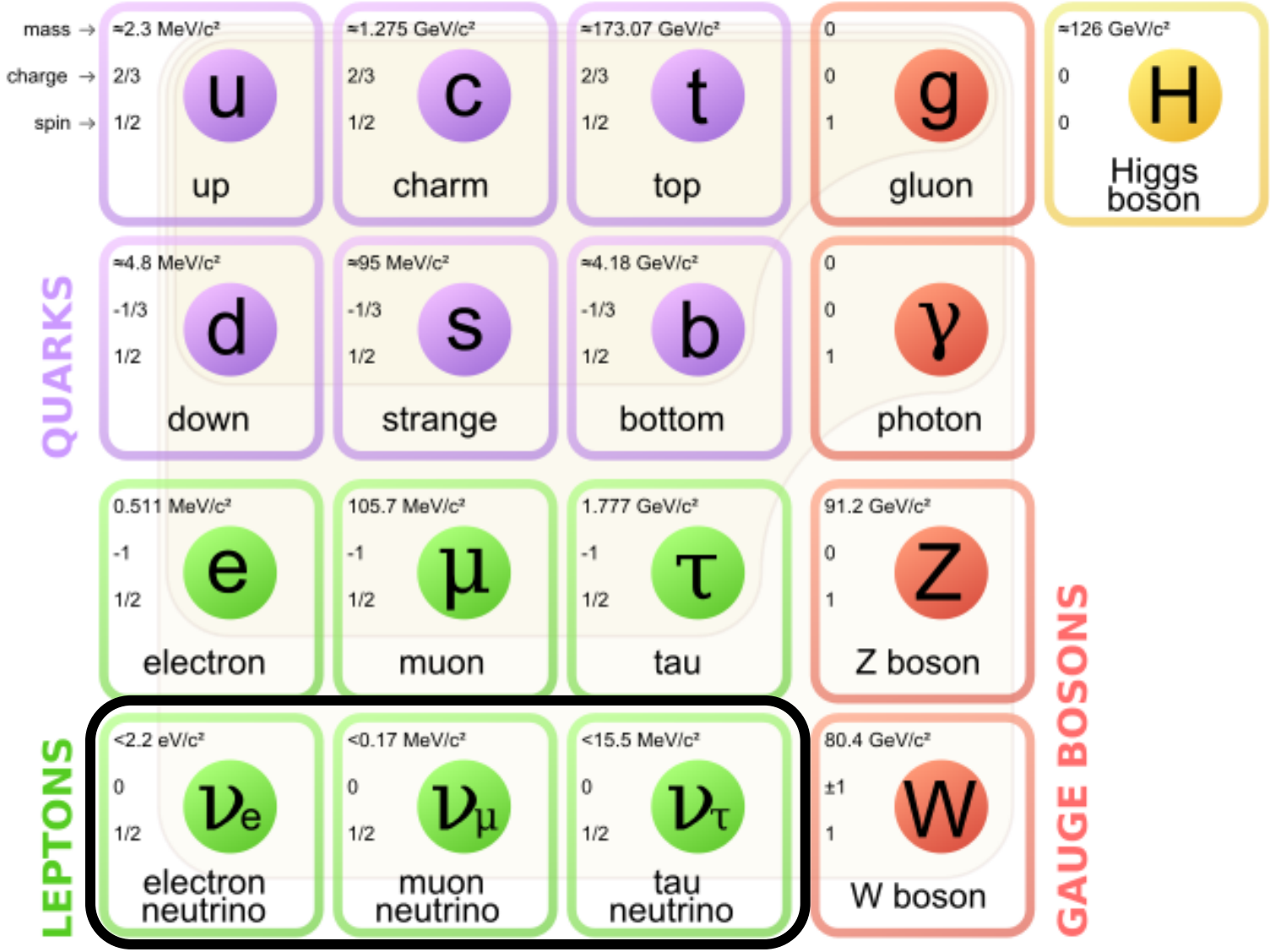
- leptones: e, μ, τ
- mediador de la interacción electromagnética: γ
- quarks: u, d, c, s, t, b
- mediador de la interacción fuerte: g



LHC, CERN, 2012

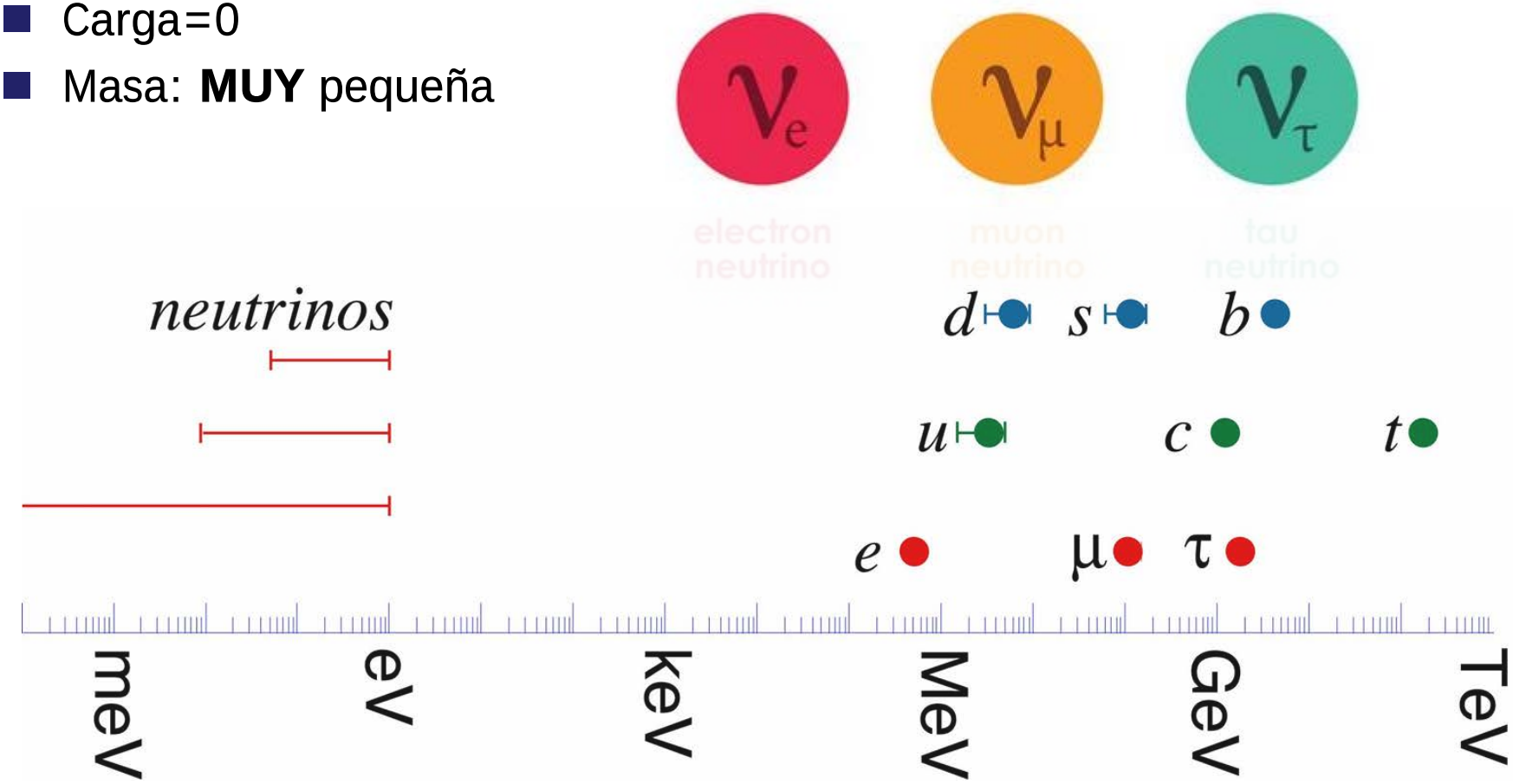


Los neutrinos



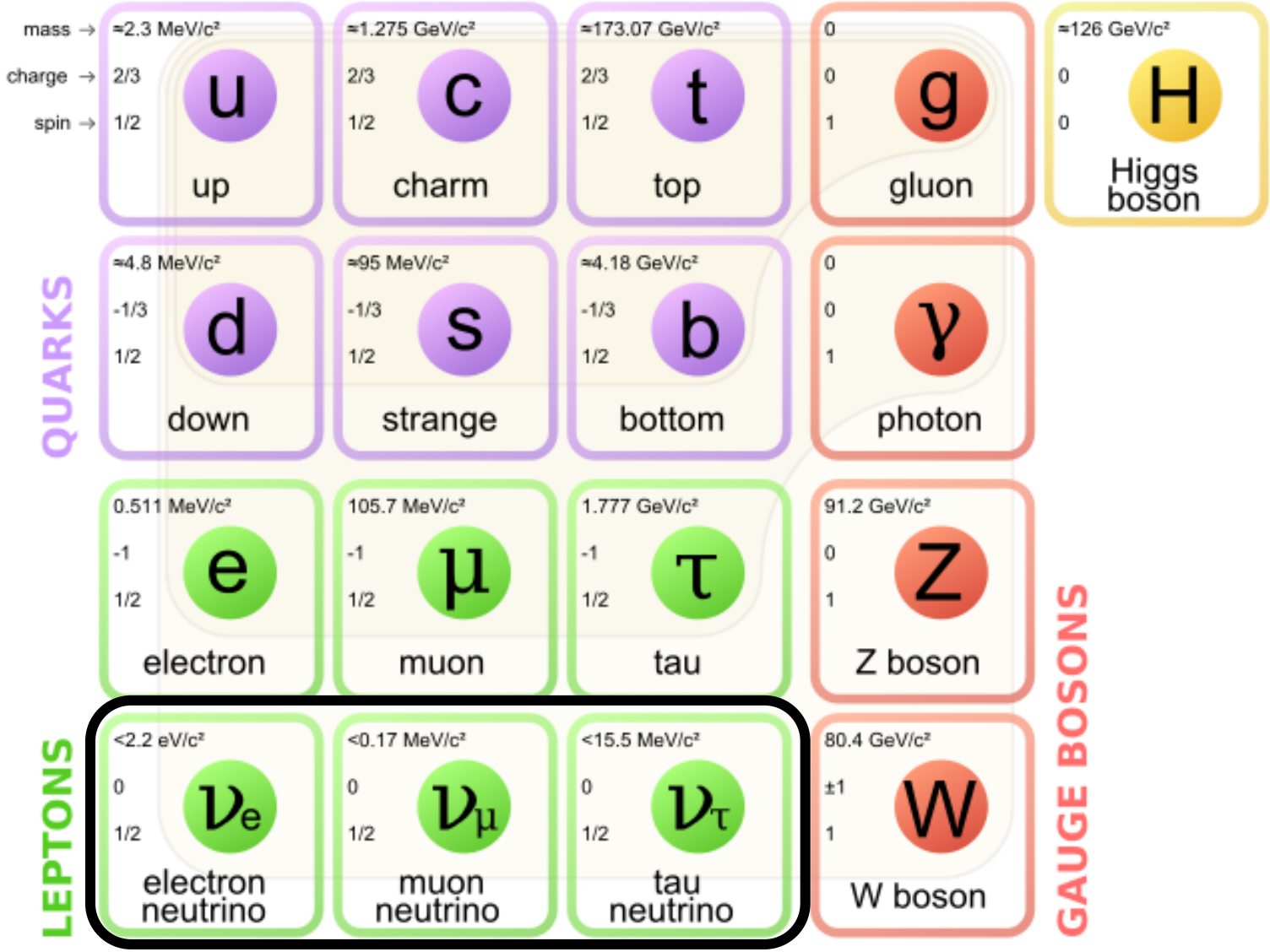
Propiedades de los neutrinos

- Carga=0
- Masa: **MUY** pequeña



- Interacciona **MUY** débilmente con la materia
  - Mediadores de la interacción débil: bosones **W, Z**

Los neutrinos



Fuentes de neutrinos

- El big bang, las supernovas, el sol, (siguiente presentación) y ...

Fuentes de neutrinos

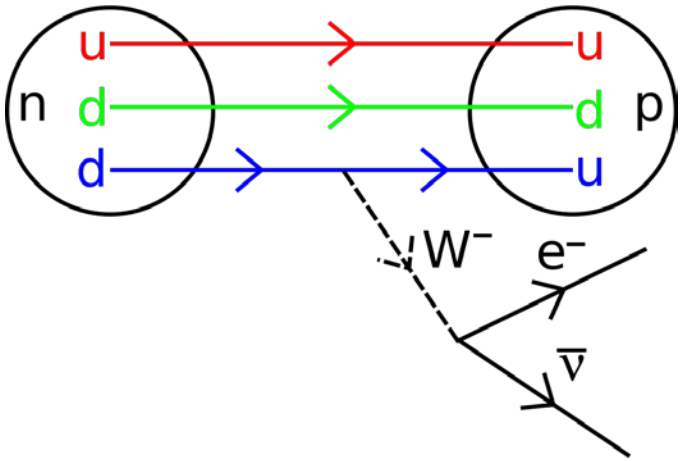
- El big bang, las supernovas, el sol, (siguiente presentación) y ...

Un plátano emite más de un millon de neutrinos al día.

https://www.youtube.com/watch?v=RvNTnvQMEM8

Desintegración beta

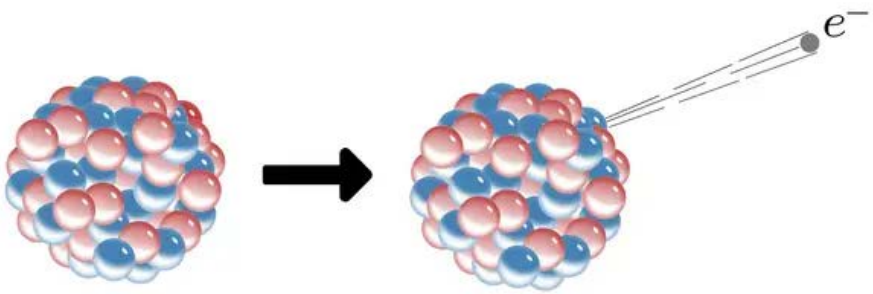
- Un platano emite más de un millon de neutrinos al día: **¿por qué?**

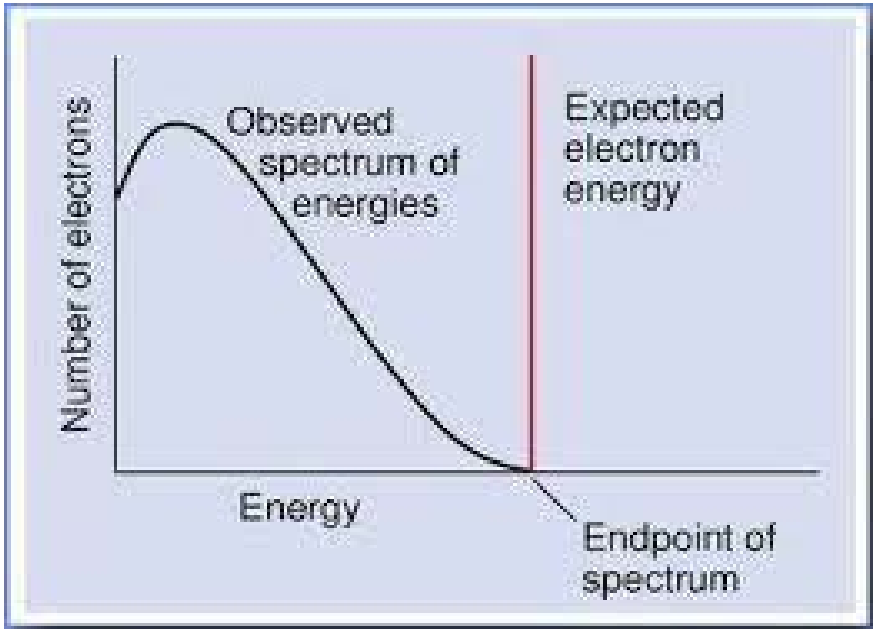


$$^{40}K \rightarrow {}^{40}Ca \;\; e^- \;\; \bar{\nu}_e$$

½ mg de ^{40}K en un plátano

- el antineutrino emitido es invisible:

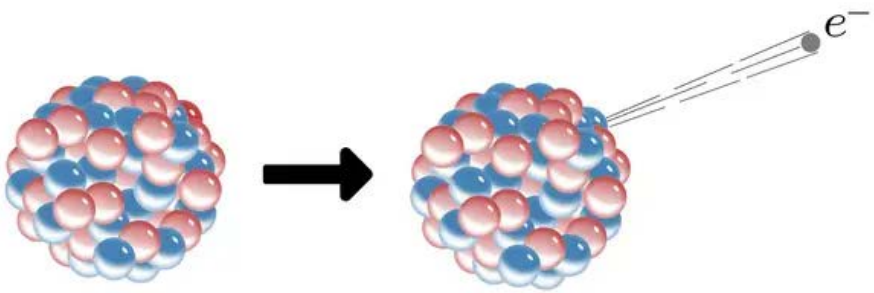


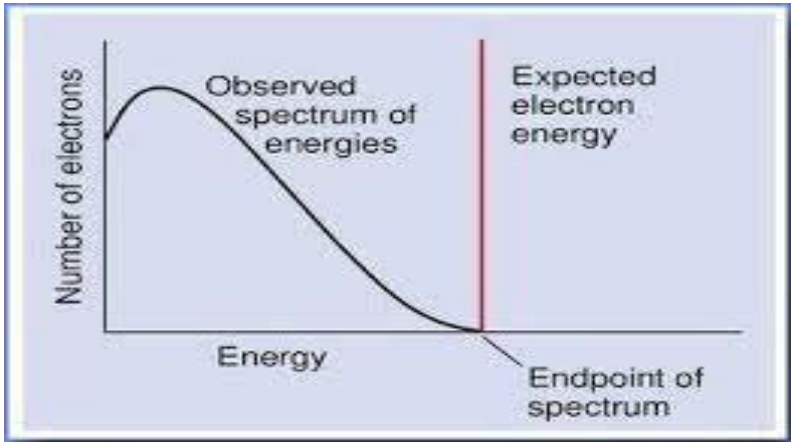


¿Se conserva la energía?

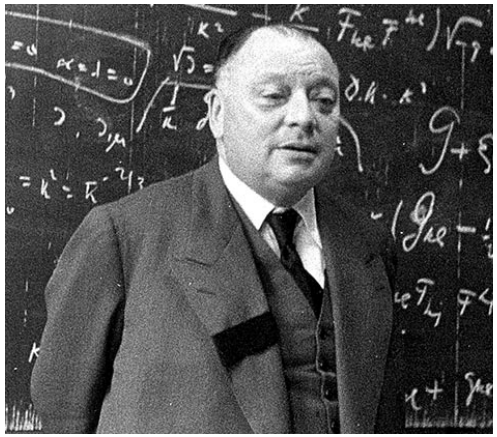
Desintegración beta

- **¿Se conserva la energía?**





- W. Pauli (1930): una solución desesperada:



Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der Gauvereins-Tagung zu Tübingen.

Abschrift

Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

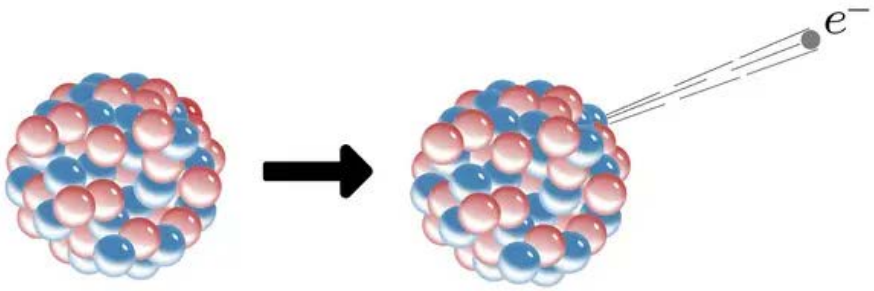
Zürich, 4. Dez. 1930
Gloriastrasse

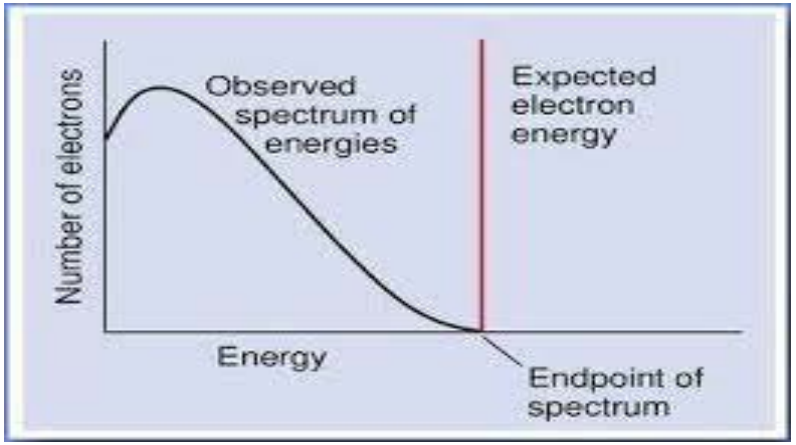
Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich huldvollst anzuhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich angesichts der "falschen" Statistik der N- und Li-6 Kerne, sowie des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verzweifelten Ausweg verfallen um den "Wechselsatz" (1) der Statistik und den Energiesatz zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren, welche den Spin 1/2 haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen

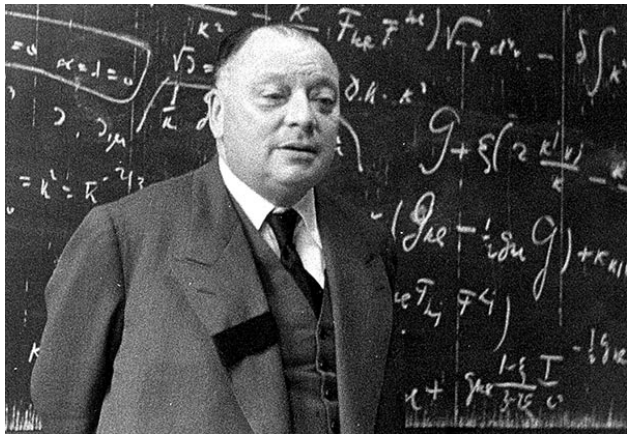
Desintegración beta

- **¿Se conserva la energía?**





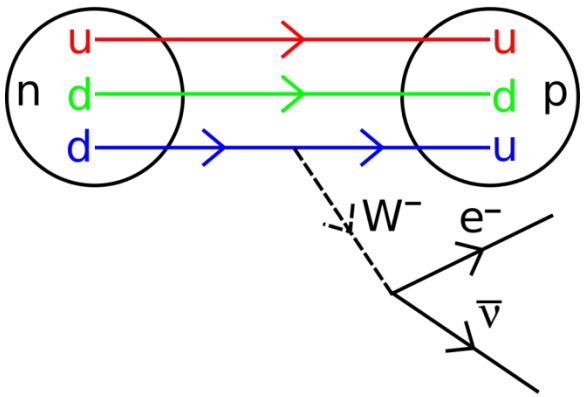
- W. Pauli (1930): una solución desesperada:



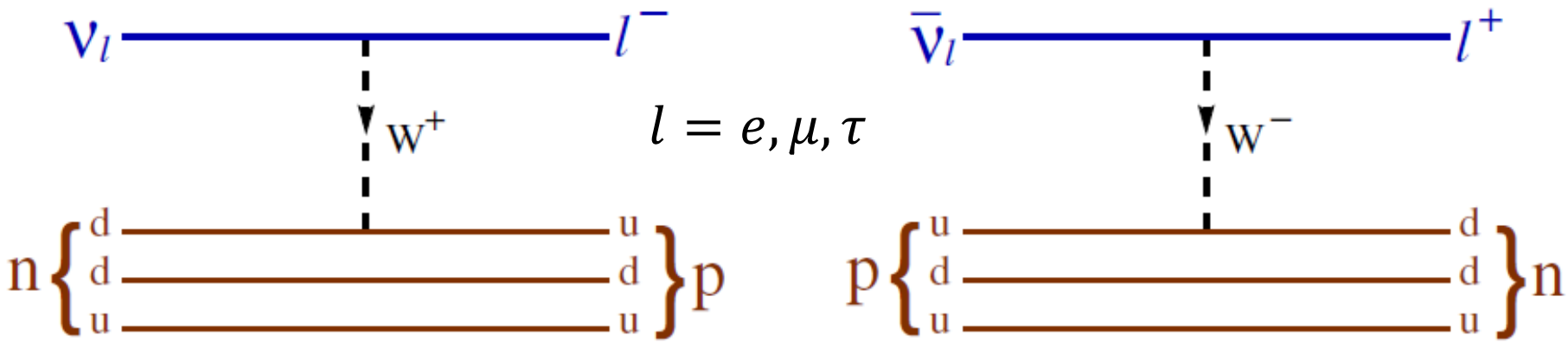
He hecho algo terrible. He postulado una partícula que no puede ser detectada.

Interacciones de los neutrinos

- La existencia de la desintegración beta:



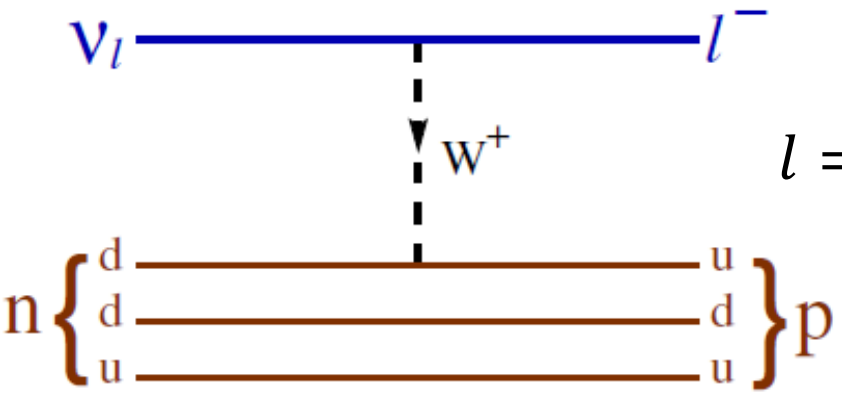
implica que:



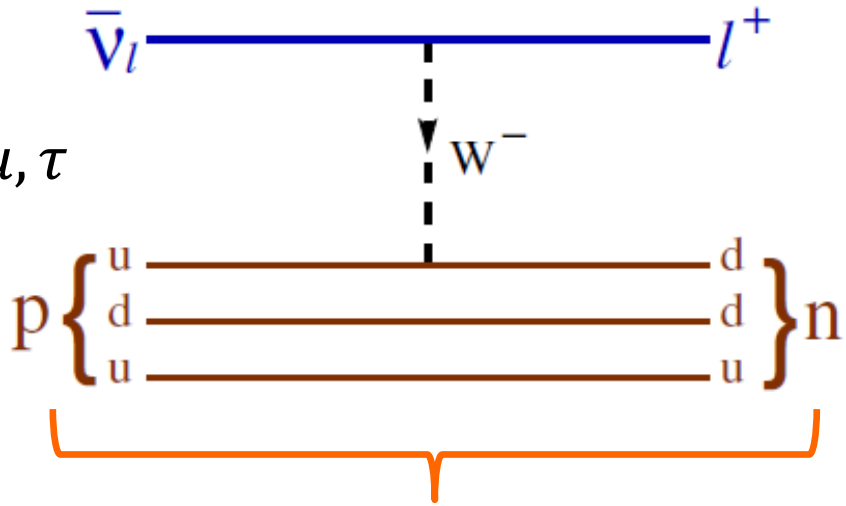
- Interacciones por corrientes cargadas.

Interacciones de los neutrinos

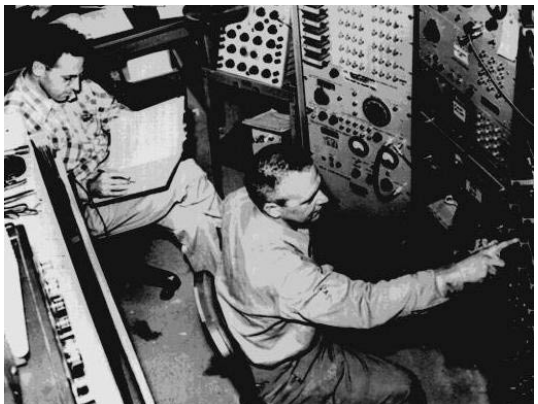
- Interacciones por corrientes cargadas:



$$l = e, \mu, \tau$$

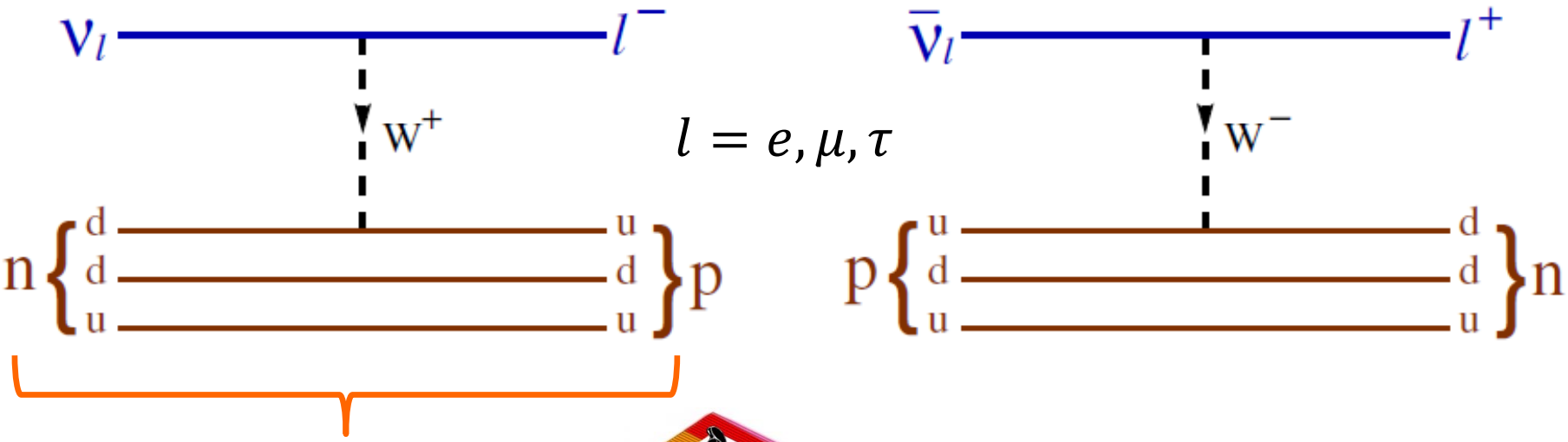


Proceso con el que se descubrió el antineutrino electrónico.
Cowan & Reines (1956)



Interacciones de los neutrinos

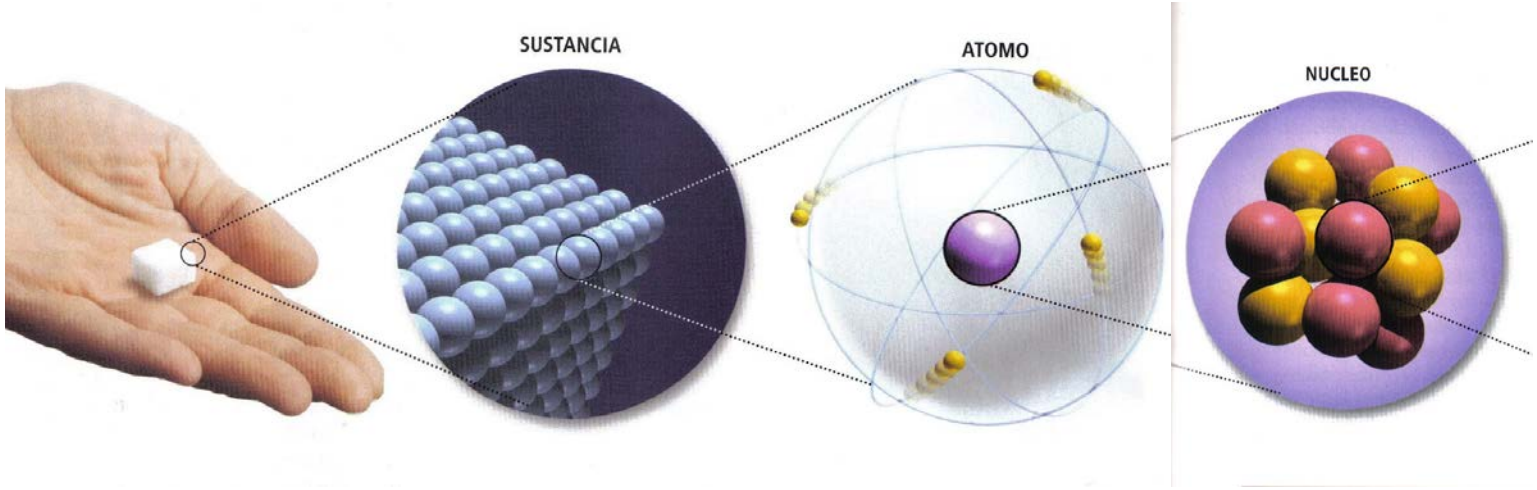
- Interacciones por corrientes cargadas:



Tipo común de interacción en donde los **n** forman parte de **^{12}C**

- Permiten identificar el sabor ($l = e, \mu, \tau$) de los neutrinos incidentes.
- Podemos determinar la energía del neutrino incidente (que no se conoce en los experimentos) a partir de los productos

Núcleos



Núcleos

- Los nucleones (p y n) en el núcleo **no** están en reposo.
- Modelo nuclear de capas:

Átomo	Núcleo
Campo Coulombiano	Campo medio creado por p y n
Electrones dispuestos en capas/orbitales	p y n dispuestos en capas independientes
Gases nobles	Números mágicos

E. Wigner

M. Göppert Mayer

H. Jensen

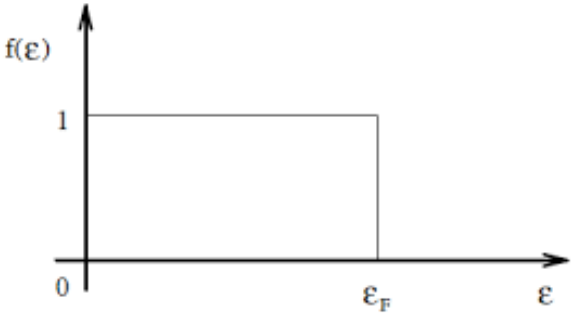
Núcleos

- Modelo de gas de Fermi:
  - Núcleo ≈ gas ideal de p y n en una “caja” a T=0
  - Los nucleones **no** pueden ocupar el mismo **estado cuántico**

    (caracterizado por su momento lineal)
  - Momento de Fermi = momento lineal **máximo**
    - relacionado con la **densidad**

E. Fermi

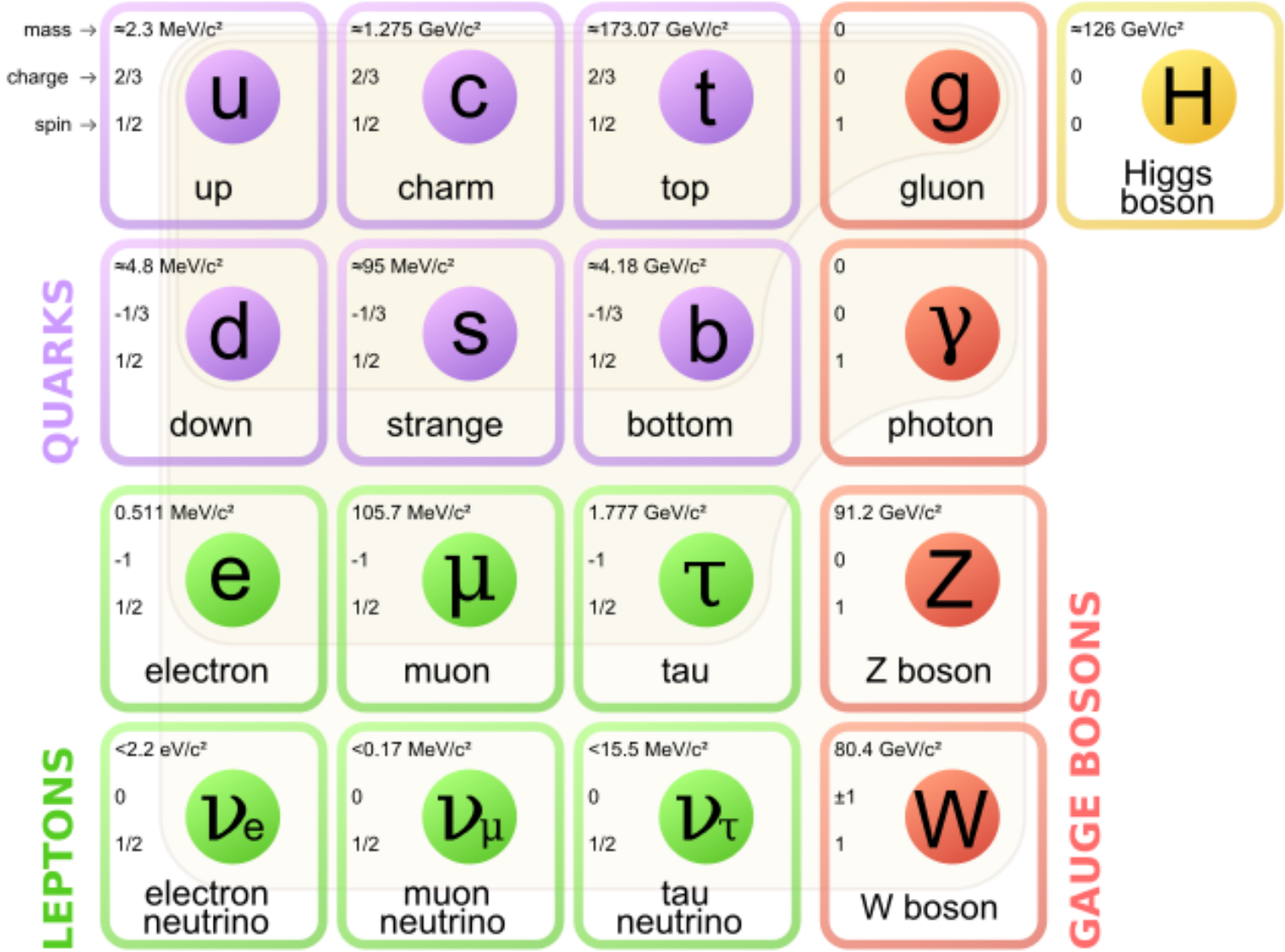
$$\rho = \frac{N}{V} = \frac{1}{3\pi^2} p_F^3$$



N: número de neutrones

V: volumen del núcleo

Modelo Estándar



Unidades de medida

- La energía, el momento lineal y la masa (en reposo) están relacionados:

$$E^2 - (\vec{p}\, c)^2 = (m\, c^2)^2$$ c = velocidad de la luz

$\Rightarrow$ $(\text{energía})^2 - (\text{energía}/c \times c)^2 = (\text{energía}/c^2 \times c^2)^2$

[p] = energía/c

[m] = energía/c^2

[energía] = MeV = 10^6 eV = 1.6×10^{-13} J

1 eV = energía adquirida por un electrón al moverse en una diferencia de potencial de 1 V

$m_{\mathbf{proton}} \approx 939$ MeV/c^2 $\approx 1.7 \times 10^{-27}$ kg

Cinemática relativista

- $\boldsymbol{\nu_\mu\, n \rightarrow \mu^-\, p}$

- **Incógnitas:**
  - 1 energía del neutrino (conocemos la dirección del neutrino)
  - 3 componentes del momento lineal del neutrón (en el laboratorio el núcleo está en reposo, pero **no los p y n** que lo componen.)

- **4 ecuaciones:** conservación de la energía + 3 conservación del momento lineal en cada una de las direcciones espaciales.

Teniendo en cuenta que:

la energía, el momento lineal y la masa (en reposo) están relacionados:

$$E^2 - (\vec{p}\, c)^2 = (m\, c^2)^2$$

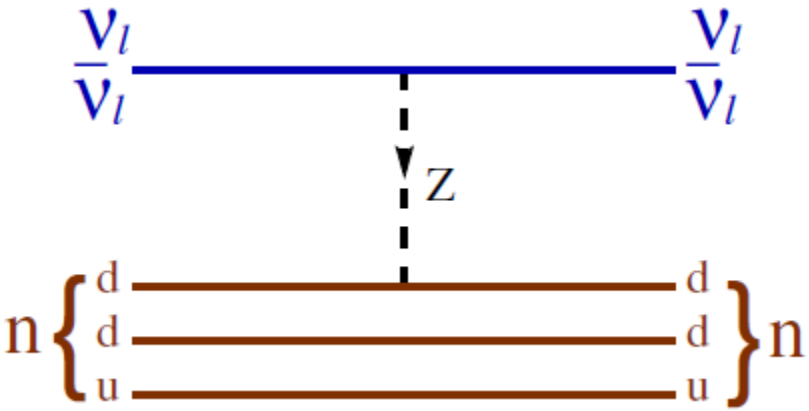
c = velocidad de la luz

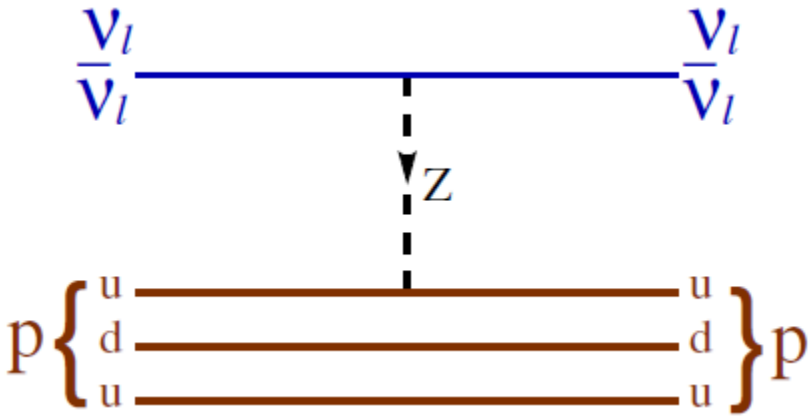
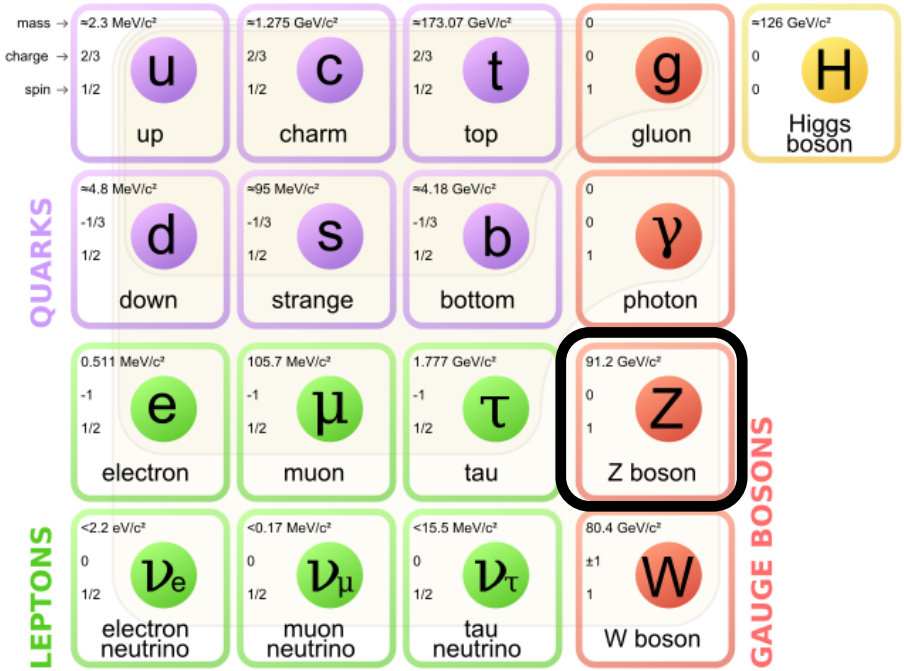
¿Y si tuvieramos $\boldsymbol{\nu_\mu\, (nn) \rightarrow \mu^-\, p\, n}$ no detectásemos el neutrón final?

Error en la determinación de la energía del neutrino.

Interacciones de los neutrinos

- Desde 1973 sabemos que existen también





- Interacciones por corrientes neutras.