



Masterclass 2025

El Modelo Estándar de las partículas elementales

Los neutrinos y sus interacciones

Luis Alvarez Ruso



VNIVERSITAT
DE VALÈNCIA

Tabla periódica de los elementos

1 H Hydrogen 1																	2 He Helium 4
3 Li Lithium 7	4 Be Beryllium 9											5 B Boron 11	6 C Carbon 12	7 N Nitrogen 14	8 O Oxygen 16	9 F Fluorine 19	10 Ne Neon 20
11 Na Sodium 23	12 Mg Magnesium 24											13 Al Aluminum 27	14 Si Silicon 28	15 P Phosphorus 31	16 S Sulphur 32	17 Cl Chlorine 35	18 Ar Argon 40
19 K Potassium 39	20 Ca Calcium 40	21 Sc Scandium 45	22 Ti Titanium 48	23 V Vanadium 51	24 Cr Chromium 52	25 Mn Manganese 55	26 Fe Iron 56	27 Co Cobalt 59	28 Ni Nickel 58	29 Cu Copper 63	30 Zn Zinc 64	31 Ga Gallium 69	32 Ge Germanium 74	33 As Arsenic 75	34 Se Selenium 80	35 Br Bromine 79	36 Kr Krypton 84
37 Rb Rubidium 85	38 Sr Strontium 88	39 Y Yttrium 89	40 Zr Zirconium 90	41 Nb Niobium 93	42 Mo Molybdenum 98	43 Tc Technetium 97	44 Ru Ruthenium 102	45 Rh Rhodium 103	46 Pd Palladium 106	47 Ag Silver 107	48 Cd Cadmium 114	49 In Indium 115	50 Sn Tin 120	51 Sb Antimony 121	52 Te Tellurium 130	53 I Iodine 127	54 Xe Xenon 132
55 Cs Caesium 133	56 Ba Barium 138	57-71	72 Hf Hafnium 180	73 Ta Tantalum 181	74 W Tungsten 184	75 Re Rhenium 187	76 Os Osmium 192	77 Ir Iridium 193	78 Pt Platinum 195	79 Au Gold 197	80 Hg Mercury 202	81 Tl Thallium 205	82 Pb Lead 208	83 Bi Bismuth 209	84 Po Polonium 209	85 At Astatine 210	86 Rn Radon 222
87 Fr Francium 223	88 Ra Radium 226	89-103	104 Unq Unnilquadium 260	105 Unp Unnilpentium 262	106 Unh Unnilhexium 263	107 Uns Unnilseptium 262	108 Uno Unniloctium 265	109 Une Unnilennium 266									
57 La Lanthanum 139	58 Ce Cerium 140	59 Pr Praseodymium 141	60 Nd Neodymium 142	61 Pm Promethium 145	62 Sm Samarium 152	63 Eu Europium 153	64 Gd Gadolinium 158	65 Tb Terbium 159	66 Dy Dysprosium 164	67 Ho Holmium 165	68 Er Erbium 168	69 Tm Thulium 169	70 Yb Ytterbium 174	71 Lu Lutetium 175			
89 Ac Actinium 227	90 Th Thorium 232	91 Pa Protactinium 231	92 U Uranium 238	93 Np Neptunium 237	94 Pu Plutonium 244	95 Am Americium 243	96 Cm Curium 247	97 Bk Berkelium 247	98 Cf Californium 251	99 Es Einsteinium 254	100 Fm Fermium 257	101 Md Mendelevium 258	102 No Nobelium 255	103 Lr Lawrencium 256			



Дмитрій Иванович Менделєв 1869

“Tabla Periódica” de las partículas elementales

mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
charge →	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs boson
QUARKS	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	$91.2 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
LEPTONS	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
				GAUGE BOSONS	

Modelo Estándar

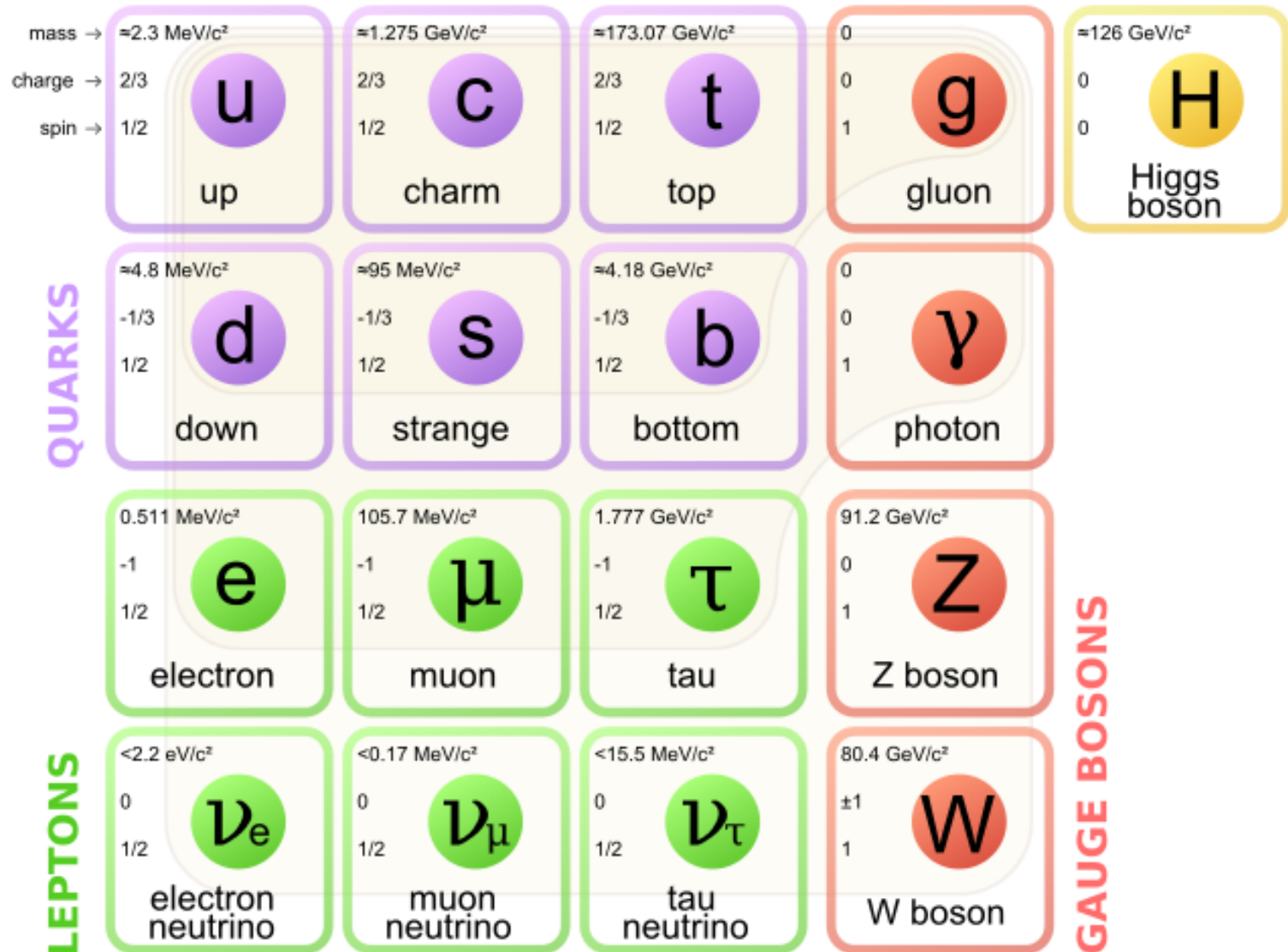


Tabla periódica de los elementos

1 H Hydrogen 1																	2 He Helium 4
3 Li Lithium 7	4 Be Beryllium 9											5 B Boron 11	6 C Carbon 12	7 N Nitrogen 14	8 O Oxygen 16	9 F Fluorine 19	10 Ne Neon 20
11 Na Sodium 23	12 Mg Magnesium 24											13 Al Aluminum 27	14 Si Silicon 28	15 P Phosphorus 31	16 S Sulphur 32	17 Cl Chlorine 35	18 Ar Argon 40
19 K Potassium 39	20 Ca Calcium 40	21 Sc Scandium 45	22 Ti Titanium 48	23 V Vanadium 51	24 Cr Chromium 52	25 Mn Manganese 55	26 Fe Iron 56	27 Co Cobalt 59	28 Ni Nickel 58	29 Cu Copper 63	30 Zn Zinc 64	31 Ga Gallium 69	32 Ge Germanium 74	33 As Arsenic 75	34 Se Selenium 80	35 Br Bromine 79	36 Kr Krypton 84
37 Rb Rubidium 85	38 Sr Strontium 88	39 Y Yttrium 89	40 Zr Zirconium 90	41 Nb Niobium 93	42 Mo Molybdenum 98	43 Tc Technetium 97	44 Ru Ruthenium 102	45 Rh Rhodium 103	46 Pd Palladium 106	47 Ag Silver 107	48 Cd Cadmium 114	49 In Indium 115	50 Sn Tin 120	51 Sb Antimony 121	52 Te Tellurium 130	53 I Iodine 127	54 Xe Xenon 132
55 Cs Caesium 133	56 Ba Barium 138	57-71	72 Hf Hafnium 180	73 Ta Tantalum 181	74 W Tungsten 184	75 Re Rhenium 187	76 Os Osmium 192	77 Ir Iridium 193	78 Pt Platinum 195	79 Au Gold 197	80 Hg Mercury 202	81 Tl Thallium 205	82 Pb Lead 208	83 Bi Bismuth 209	84 Po Polonium 209	85 At Astatine 210	86 Rn Radon 222
87 Fr Francium 223	88 Ra Radium 226	89-103	104 Unq Unnilquadium 260	105 Unp Unnilpentium 262	106 Unh Unnilhexium 263	107 Uns Unnilseptium 262	108 Uno Unniloctium 265	109 Une Unnilennium 266									
57 La Lanthanum 139	58 Ce Cerium 140	59 Pr Praseodymium 141	60 Nd Neodymium 142	61 Pm Promethium 145	62 Sm Samarium 152	63 Eu Europium 153	64 Gd Gadolinium 158	65 Tb Terbium 159	66 Dy Dysprosium 164	67 Ho Holmium 165	68 Er Erbium 168	69 Tm Thulium 169	70 Yb Ytterbium 174	71 Lu Lutetium 175			
89 Ac Actinium 227	90 Th Thorium 232	91 Pa Protactinium 231	92 U Uranium 238	93 Np Neptunium 237	94 Pu Plutonium 244	95 Am Americium 243	96 Cm Curium 247	97 Bk Berkelium 247	98 Cf Californium 251	99 Es Einsteinium 254	100 Fm Fermium 257	101 Md Mendelevium 258	102 No Nobelium 255	103 Lr Lawrencium 256			



■ Elementos químicos ⇔ átomos

Дмитрій Иванович Менделѣевъ 1869

Tabla periódica de los elementos

1
H
Hydrogen
1

2
He
Helium
4

3
Li
Lithium
7

4
Be
Beryllium
9

11
Na
Sodium
23

12
Mg
Magnesium
24

19
K
Potassium
39

20
Ca
Calcium
40

37
Rb
Rubidium
85

38
Sr
Strontium
88

55
Cs
Caesium
133

56
Ba
Barium
138

87
Fr
Francium
223

88
Ra
Radium
226

5
B
Boron
11

6
C
Carbon
12

7
N
Nitrogen
14

8
O
Oxygen
16

9
F
Fluorine
19

10
Ne
Neon
20

13
Al
Aluminum
27

14
Si
Silicon
28

15
P
Phosphorus
31

16
S
Sulphur
32

17
Cl
Chlorine
35

18
Ar
Argon
40

31
Ga
Gallium
69

32
Ge
Germanium
74

33
As
Arsenic
75

34
Se
Selenium
80

35
Br
Bromine
79

36
Kr
Krypton
84

49
In
Indium
115

50
Sn
Tin
120

51
Sb
Antimony
121

52
Te
Tellurium
130

53
I
Iodine
127

54
Xe
Xenon
132

81
Tl
Thallium
205

82
Pb
Lead
208

83
Bi
Bismuth
209

84
Po
Polonium
209

85
At
Astatine
210

86
Rn
Radon
222

21
Sc
Scandium
45

22
Ti
Titanium
48

23
V
Vanadium
51

24
Cr
Chromium
52

25
Mn
Manganese
55

26
Fe
Iron
56

27
Co
Cobalt
59

28
Ni
Nickel
58

29
Cu
Copper
63

30
Zn
Zinc
64

39
Y
Yttrium
89

40
Zr
Zirconium
90

41
Nb
Niobium
93

42
Mo
Molybdenum
98

43
Tc
Technetium
97

44
Ru
Ruthenium
102

45
Rh
Rhodium
103

46
Pd
Palladium
106

47
Ag
Silver
107

48
Cd
Cadmium
114

72
Hf
Hafnium
180

73
Ta
Tantalum
181

74
W
Tungsten
184

75
Re
Rhenium
187

76
Os
Osmium
192

77
Ir
Iridium
193

78
Pt
Platinum
195

79
Au
Gold
197

80
Hg
Mercury
202

104
Unq
Unnilquadium
260

105
Unp
Unnilpentium
262

106
Unh
Unnilhexium
263

107
Uns
Unnilseptium
262

108
Uno
Unniloctium
265

109
Une
Unnilennium
266

57
La
Lanthanum
139

58
Ce
Cerium
140

59
Pr
Praseodymium
141

60
Nd
Neodymium
142

61
Pm
Promethium
145

62
Sm
Samarium
152

63
Eu
Europium
153

64
Gd
Gadolinium
158

65
Tb
Terbium
159

66
Dy
Dysprosium
164

67
Ho
Holmium
165

68
Er
Erbium
168

69
Tm
Thulium
169

70
Yb
Ytterbium
174

71
Lu
Lutetium
175

89
Ac
Actinium
227

90
Th
Thorium
232

91
Pa
Protactinium
231

92
U
Uranium
238

93
Np
Neptunium
237

94
Pu
Plutonium
244

95
Am
Americium
243

96
Cm
Curium
247

97
Bk
Berkelium
247

98
Cf
Californium
251

99
Es
Einsteinium
254

100
Fm
Fermium
257

101
Md
Mendelevium
258

102
No
Nobelium
255

103
Lr
Lawrencium
256

Alkali metals

Alkali-earth metals

Transition metals

Rare earths

Radioactive rare earths

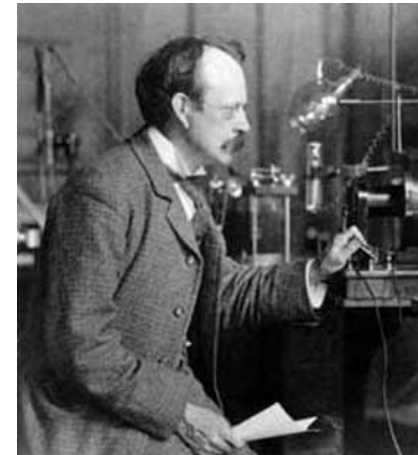
Other metals

Semimetals

Non-metals

Noble gases

Hydrogen



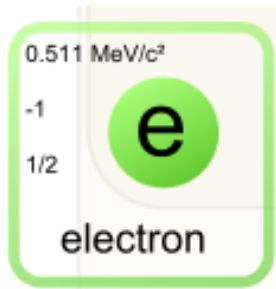
■ Elementos químicos ⇔ átomos

■ Pero, ¿son los átomos “elementales”?

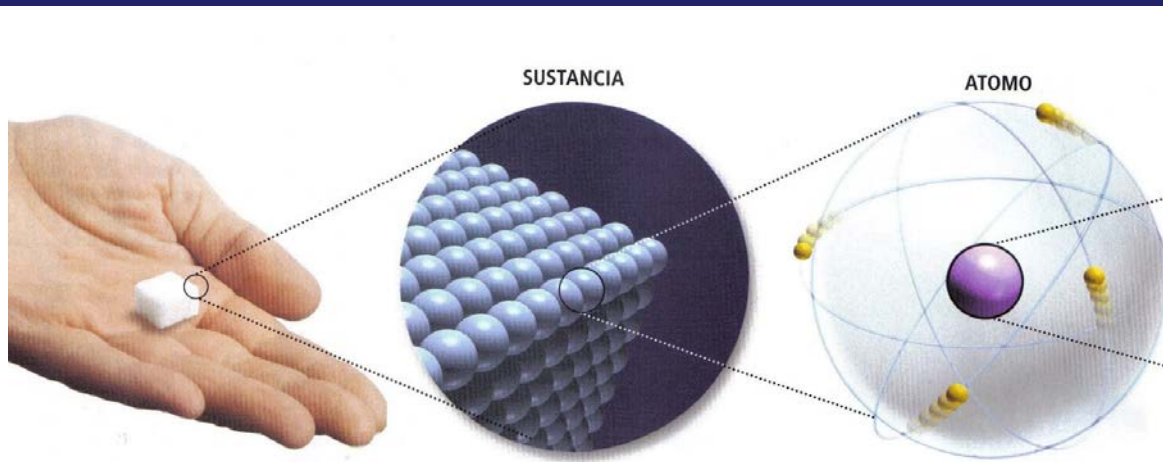
■ **No**: iones, **electrones**: primera **partícula elemental** descubierta.

■ J. J. Thomson (1897) **corpúsculos**

Modelo Estándar



La estructura del átomo

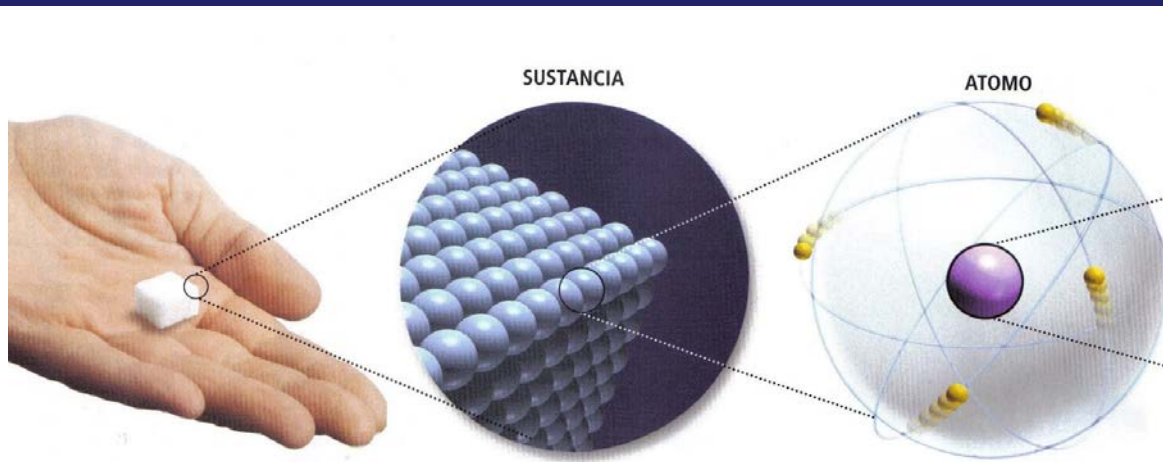


E. Rutherford

■ ¡Los átomos están vacíos!

■ Radio atómico $\sim 1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m} \gg$ Radio nuclear $\sim 1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$

La estructura del átomo

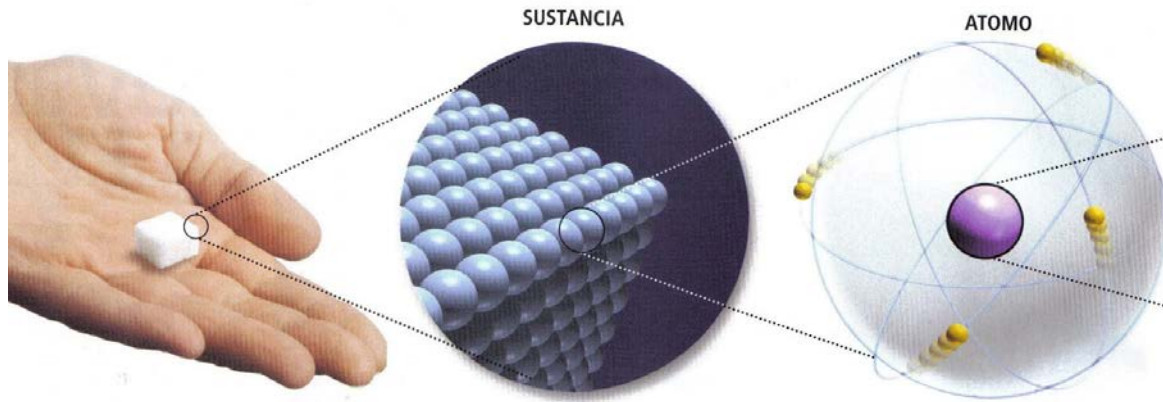


W. Heisenberg

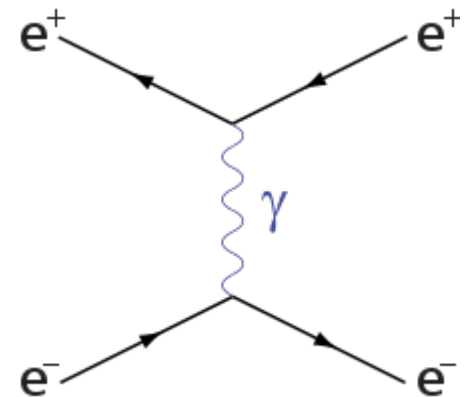
- **Física clásica:** $\vec{r}_i(t)$, $\vec{p}_i(t)$
- **Física cuántica:** predice la **probabilidad** de que el sistema se encuentre en un cierto estado.
 - Los electrones en el átomo **no** se mueven en trayectorias clásicas.
 - Principio de incertidumbre de Heisenberg: limita la capacidad de determinar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

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

La estructura del átomo

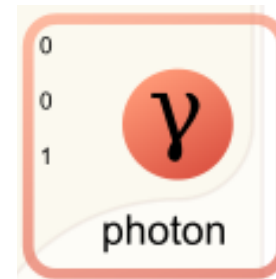
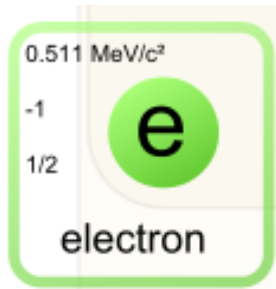


- **Física clásica:** $\vec{r}_i(t)$, $\vec{p}_i(t)$
- **Física cuántica:** predice la **probabilidad** de que el sistema se encuentre en un cierto estado.
 - Interacción electromagnética: intercambio de cuantos de luz (**fotones**) entre cargas
 - Fotones: partículas elementales, neutras y sin masa

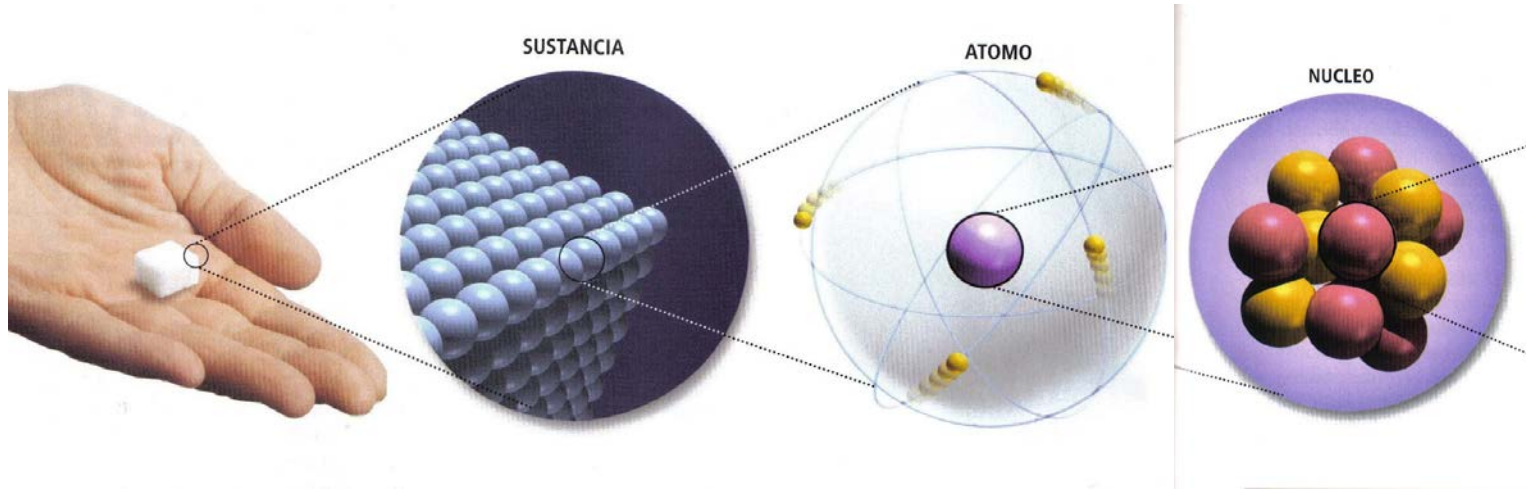


Modelo Estándar

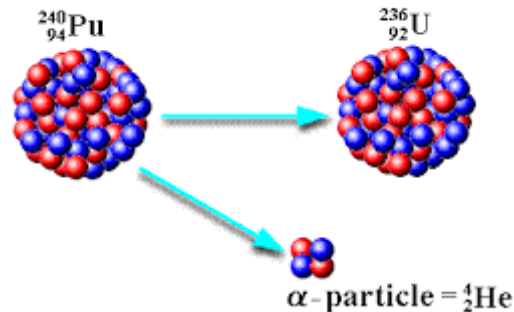
c



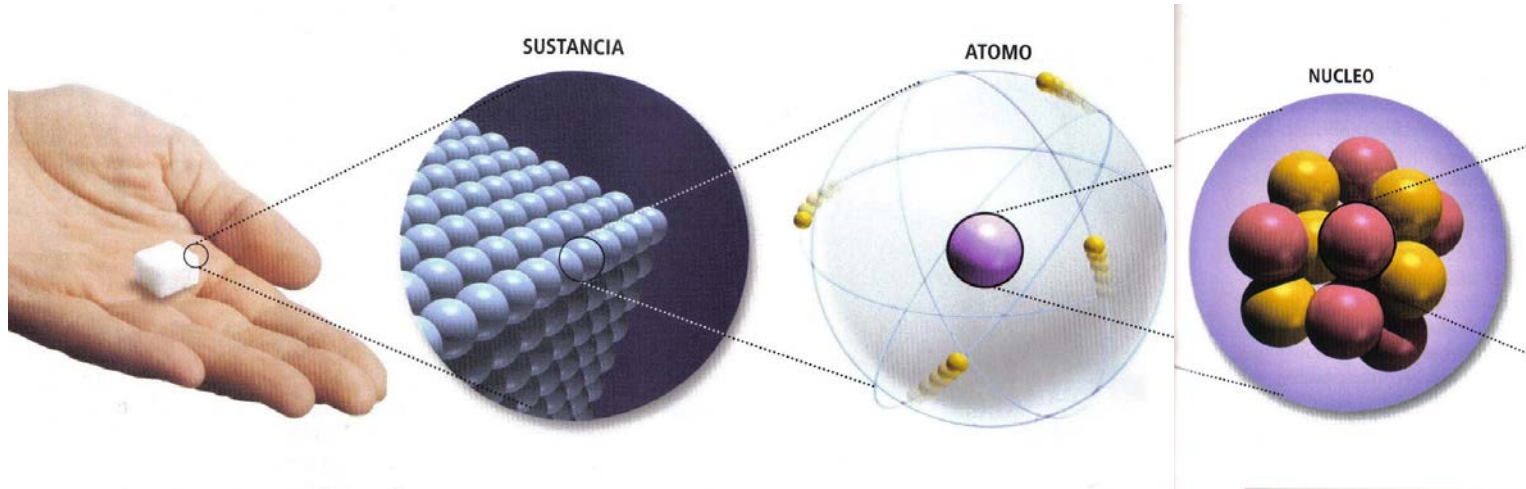
La estructura del átomo



- ¡Los átomos están vacíos!
 - Radio atómico $\sim 1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m} \gg$ Radio nuclear $\sim 1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$
- Los núcleos tampoco son elementales.
 - Ejemplo: **radiactividad α**



La estructura del átomo



- ¡Los átomos están vacíos!
 - Radio atómico $\sim 1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m} \gg$ Radio nuclear $\sim 1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$
- 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.



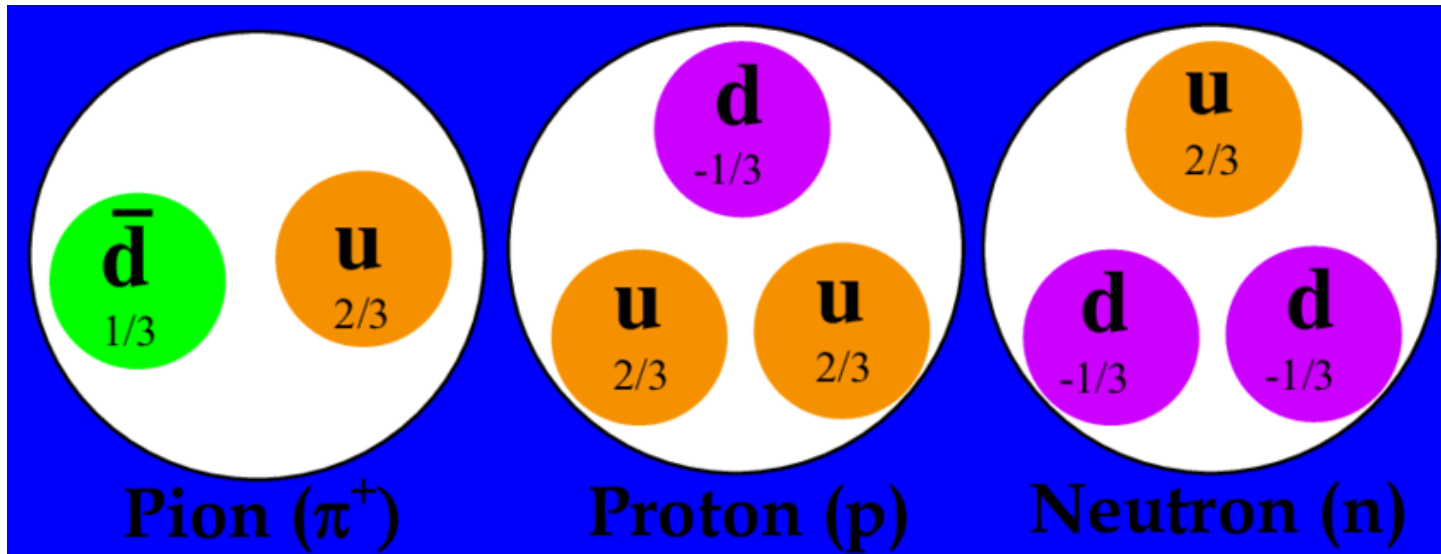
J. Chadwick 1932

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 , ...

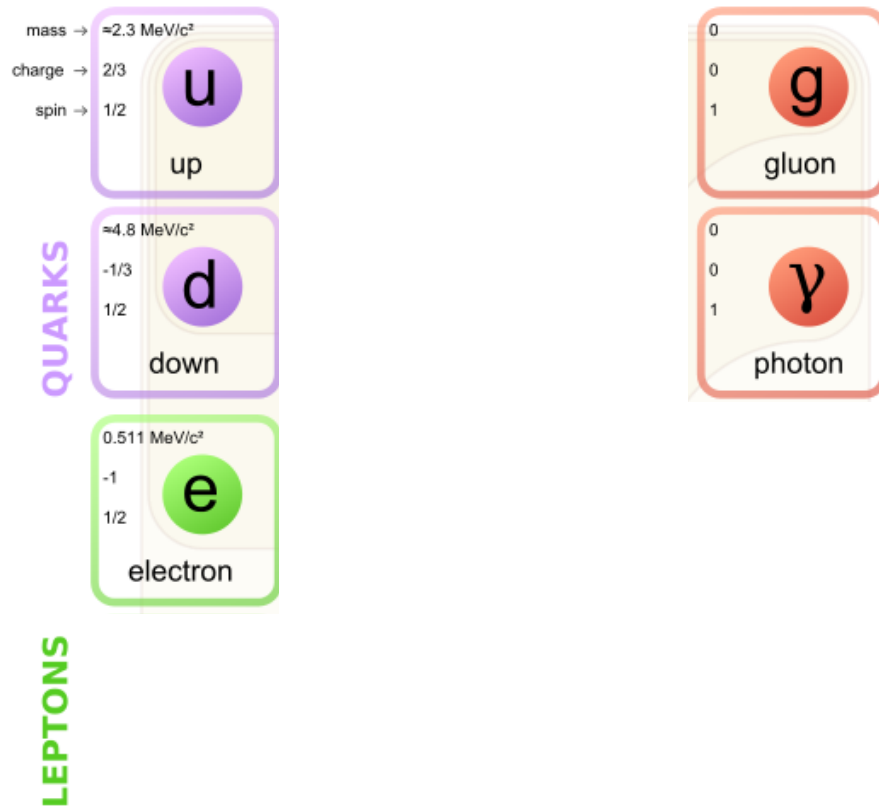
Partículas subnucleares

- 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

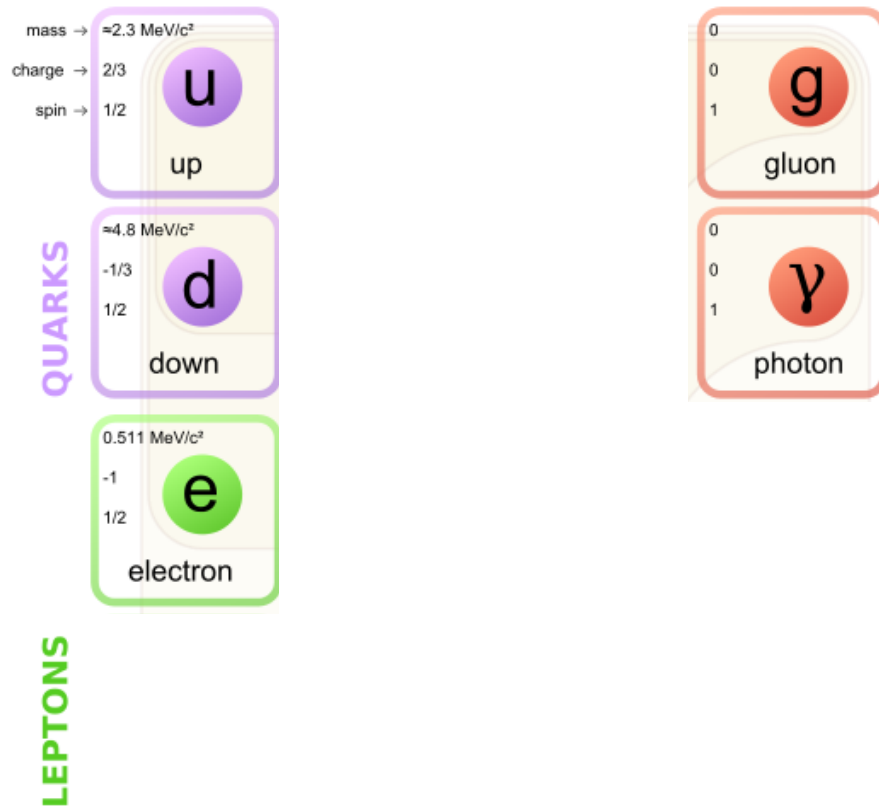


Partículas subnucleares

- 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 , ...
 - ...

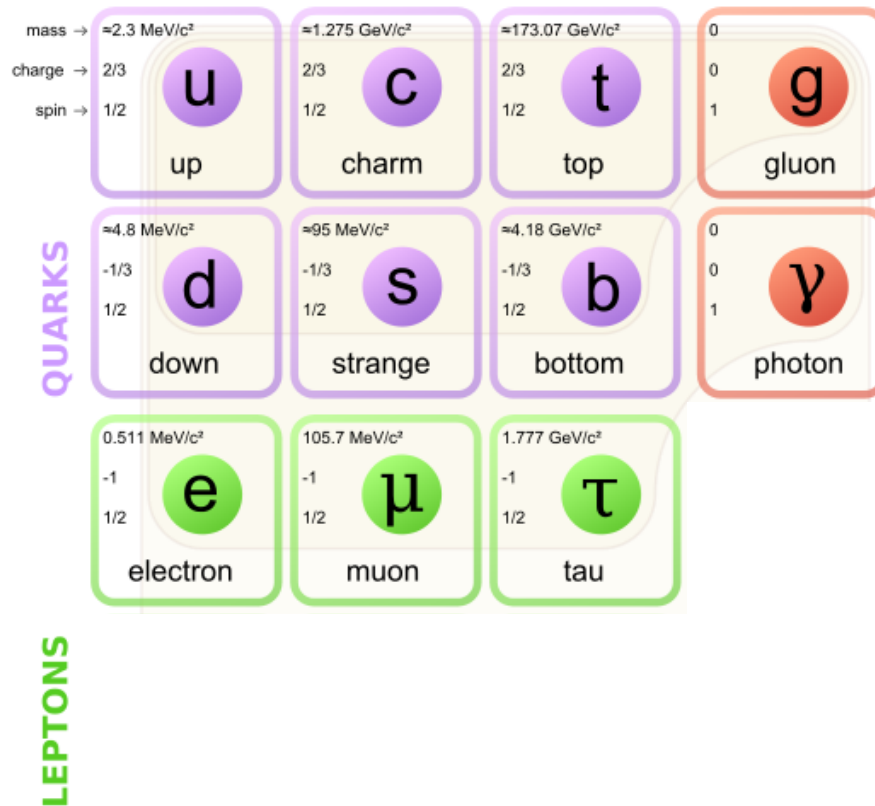
Modelo Estándar

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



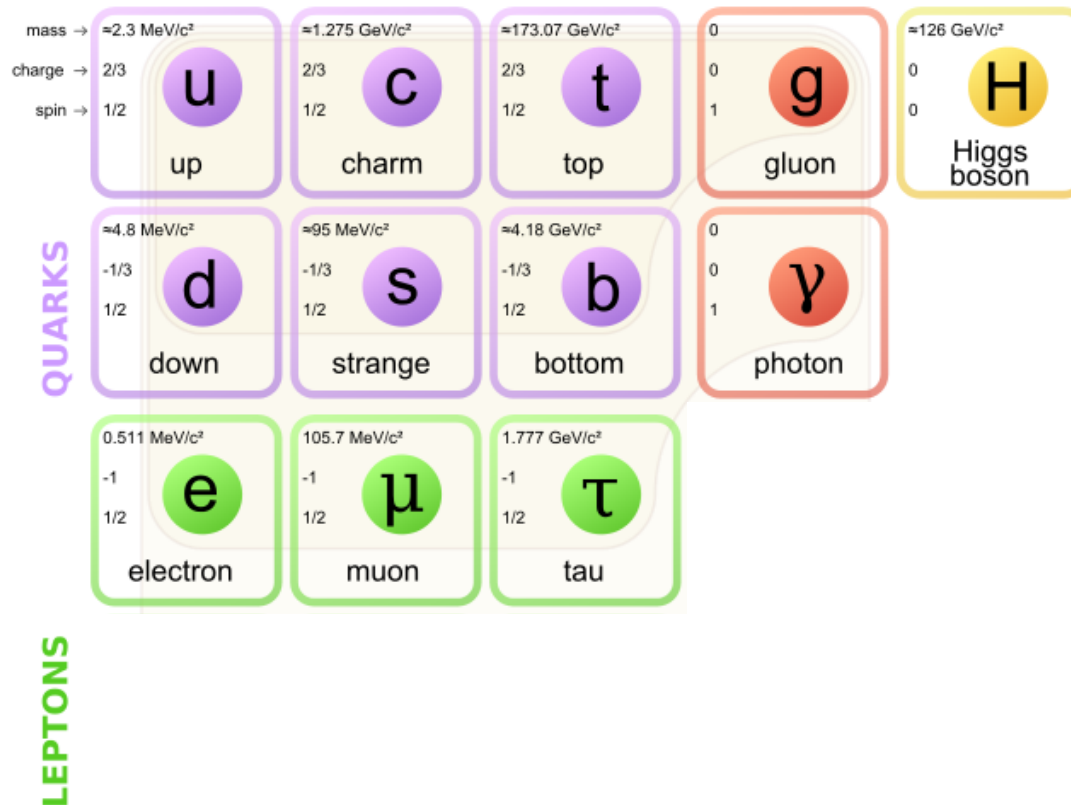
Modelo Estándar

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

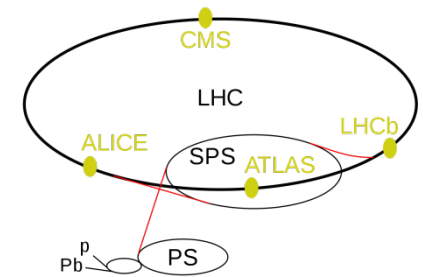


Modelo Estándar

- 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

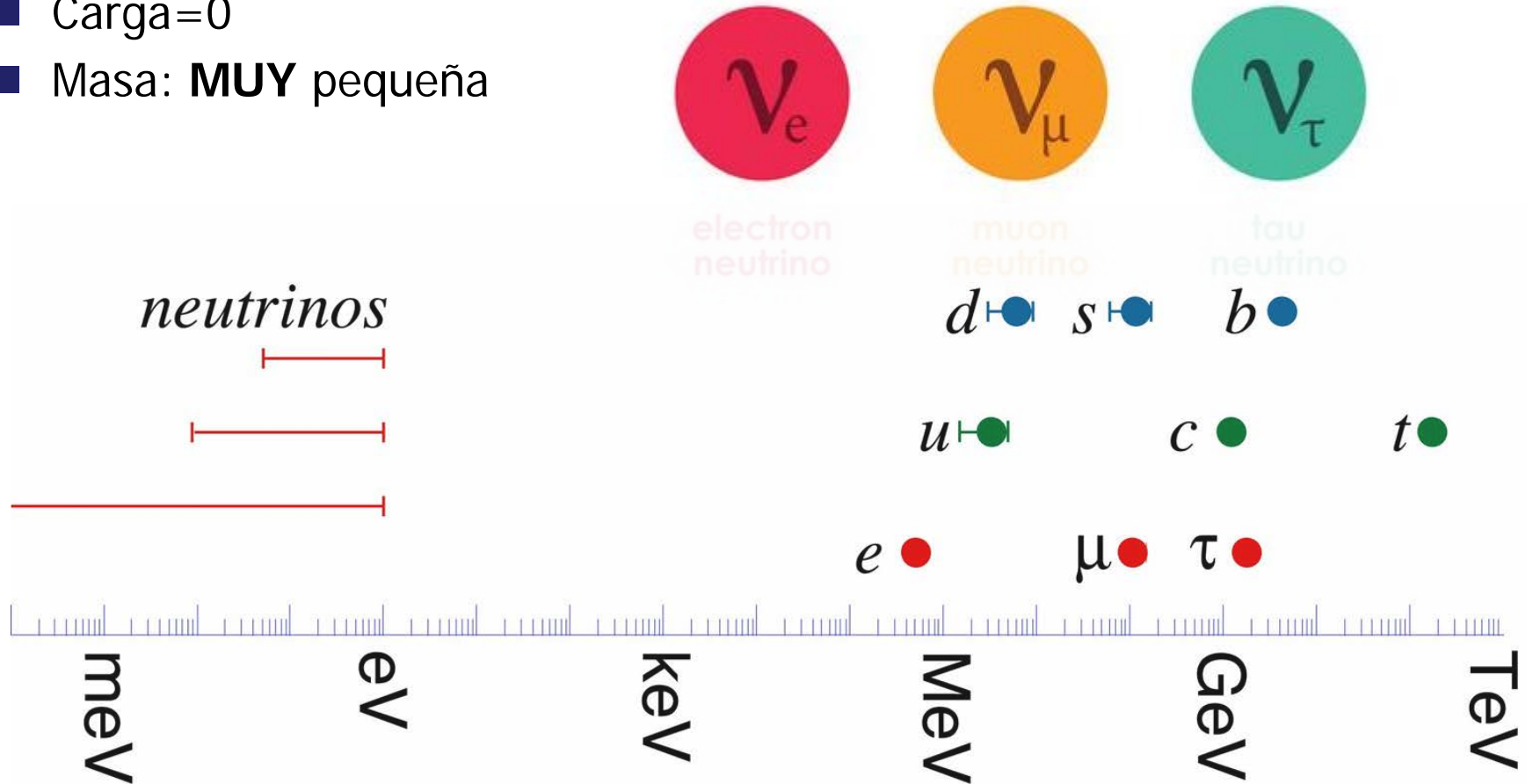


Los neutrinos

mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
charge →	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs boson
QUARKS	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ -1/3 1/2 d down	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ -1/3 1/2 s strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ -1/3 1/2 b bottom	0 0 1 γ photon	
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 1/2 e electron	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ -1 1/2 μ muon	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ -1 1/2 τ tau	$91.2 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 Z Z boson	
LEPTONS	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 1/2 ν_e electron neutrino	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 1/2 ν_μ muon neutrino	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 1/2 ν_τ tau neutrino	$80.4 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1 W W boson	GAUGE BOSONS

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

mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
charge →	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs boson
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	$91.2 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	±1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	

QUARKS

LEPTONS

GAUGE BOSONS

Fuentes de neutrinos

- El big bang, las supernovas, el sol y ...

Fuentes de neutrinos

- El big bang, las supernovas, el sol y ...

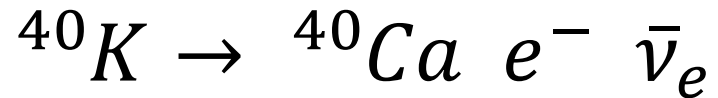
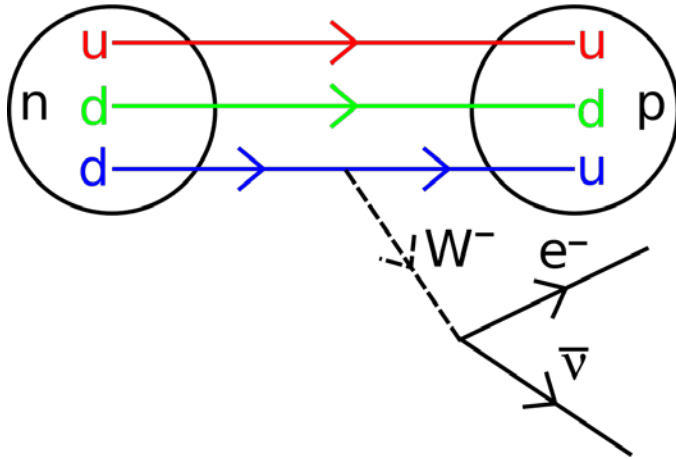


Un plátano emite más de un millón de neutrinos al día.

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

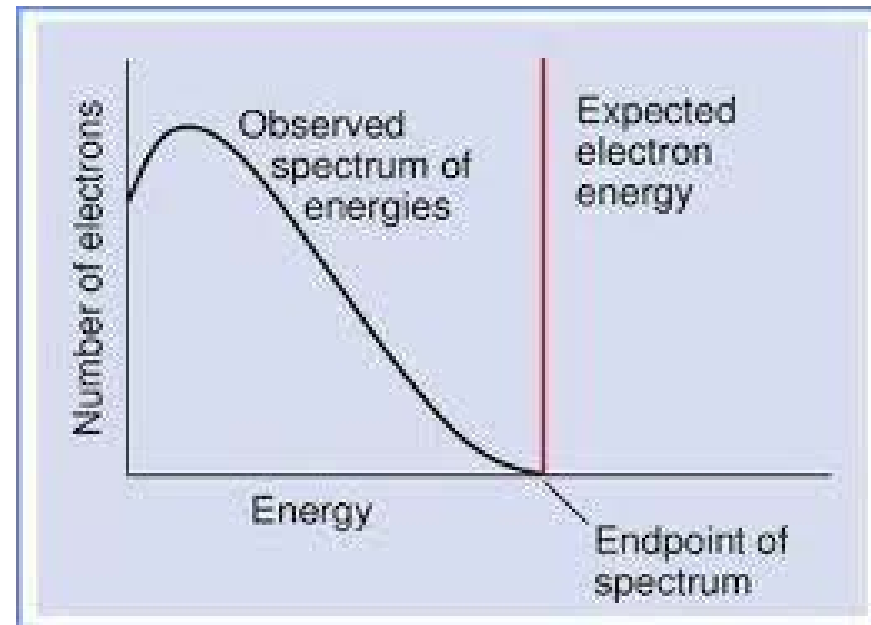
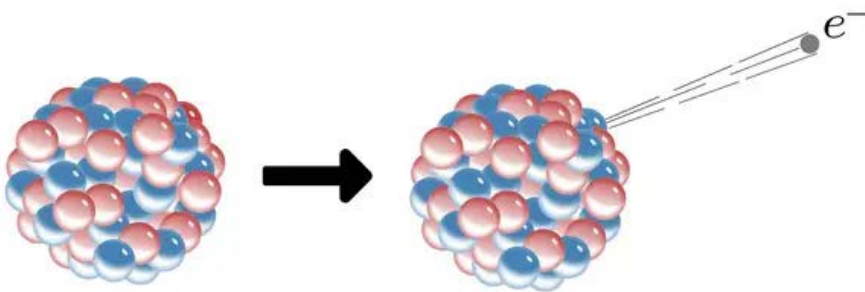
Desintegración beta

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



½ mg de ${}^{40}\text{K}$ en un plátano

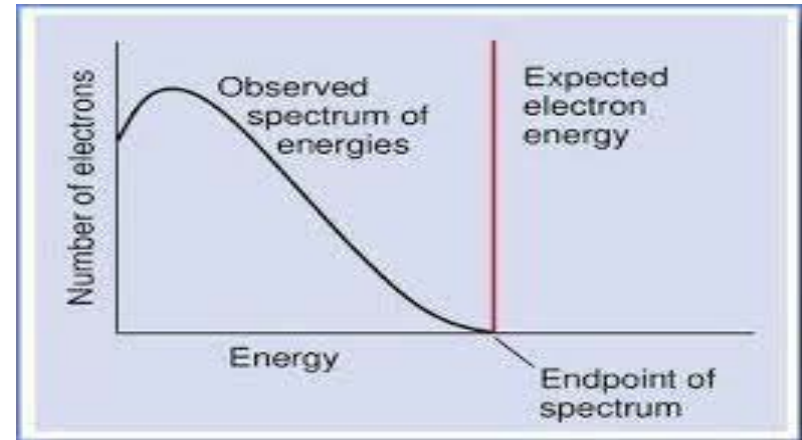
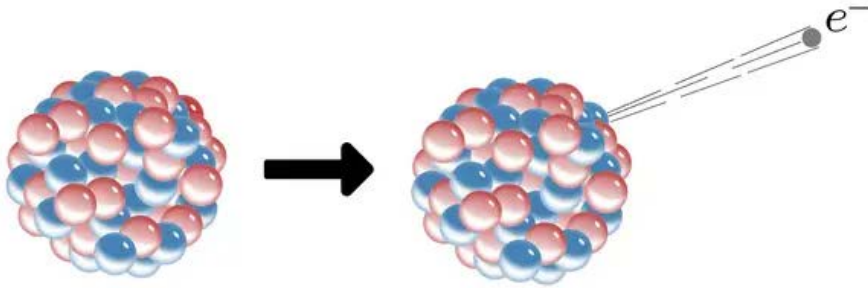
- el antineutrino emitido es invisible:



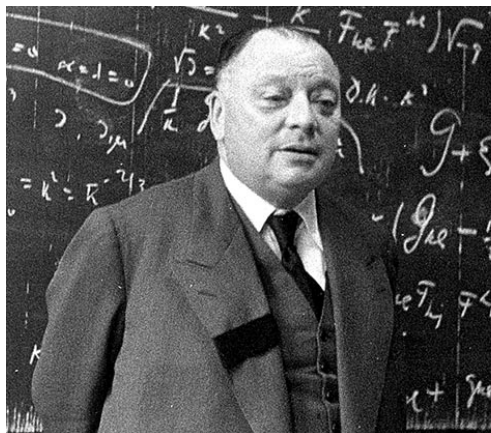
¿Se conserva la energía?

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

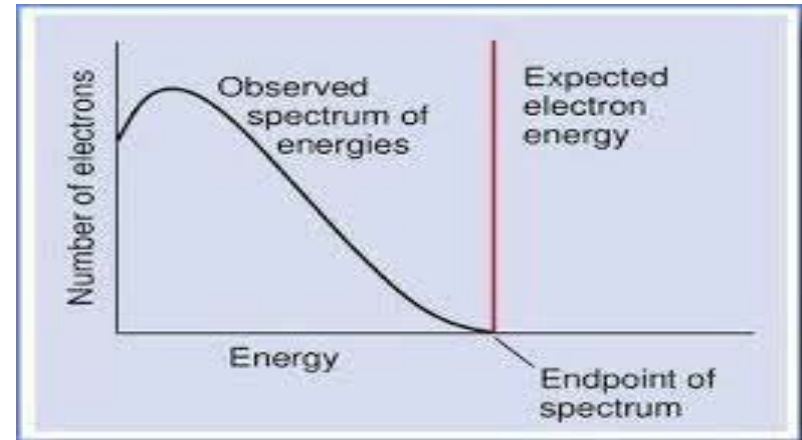
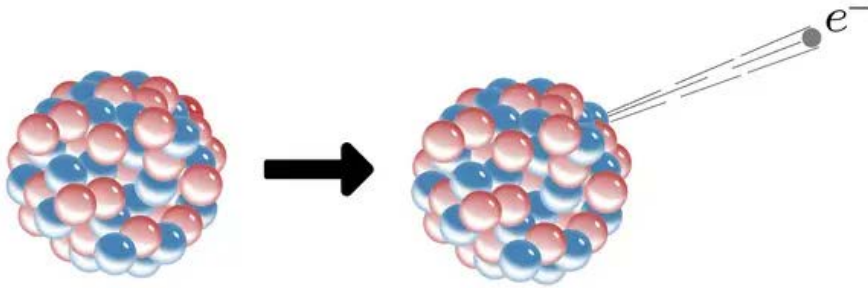
Zürich, 4. Dez. 1930
Gloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

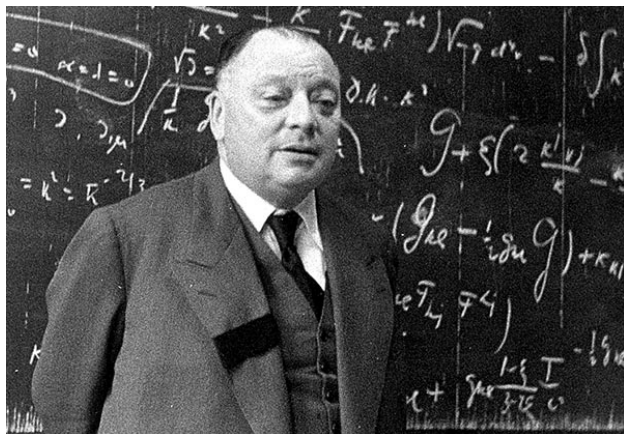
Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich huldvollst
anzuhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich
angesichts der "falschen" Statistik der N- und Li-6 Kerne, sowie
des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verweifelten Ausweg
verfallen um den "Wechselsatz" (1) der Statistik 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?



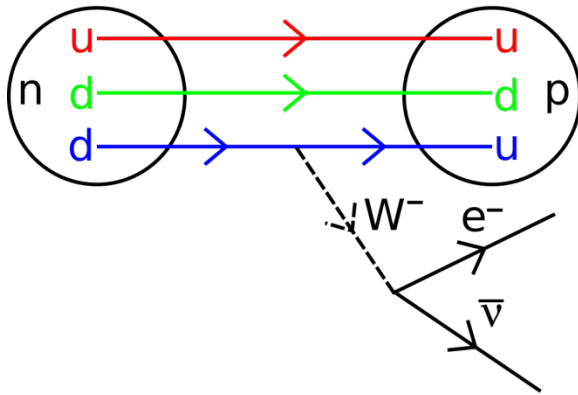
- W. Pauli (1930): una solución desesperada:



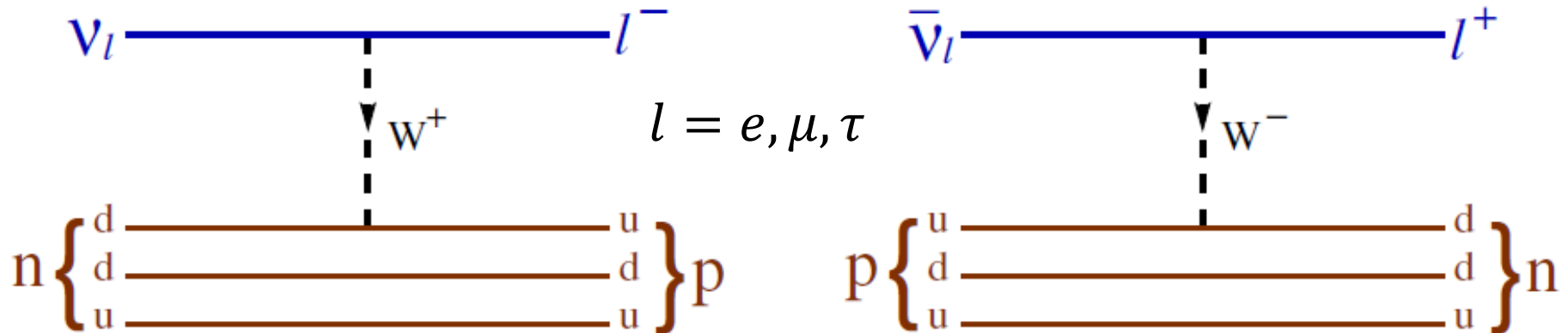
He hecho algo terrible. He postulado una partícula que no puede ser detectada.

Interacciones de los neutrinos

- La existencia de la desintegración beta:



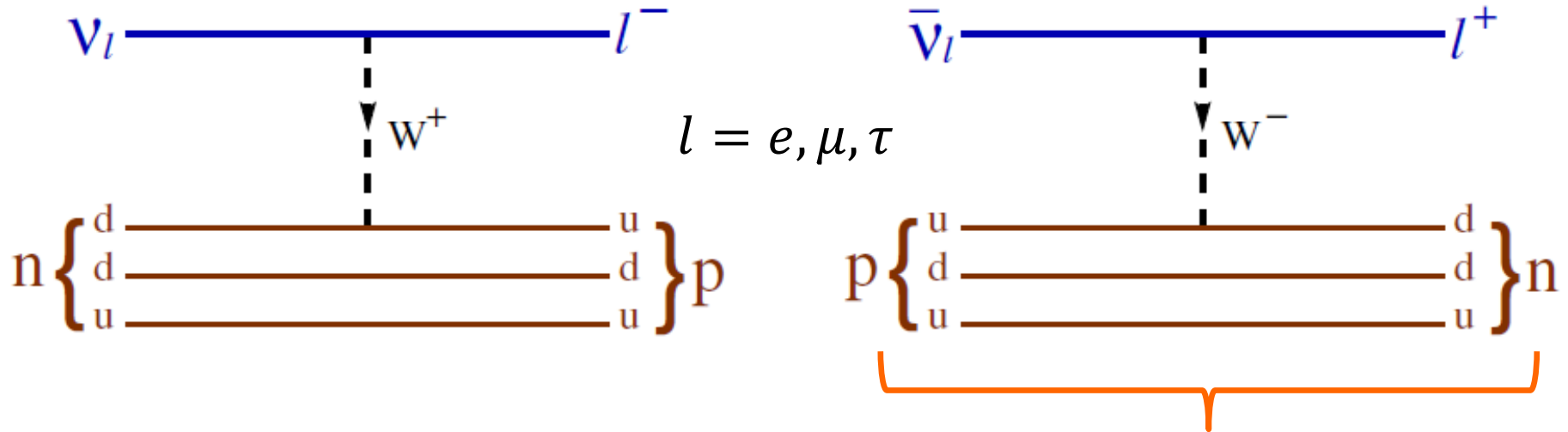
implica que:



- Interacciones por corrientes cargadas.

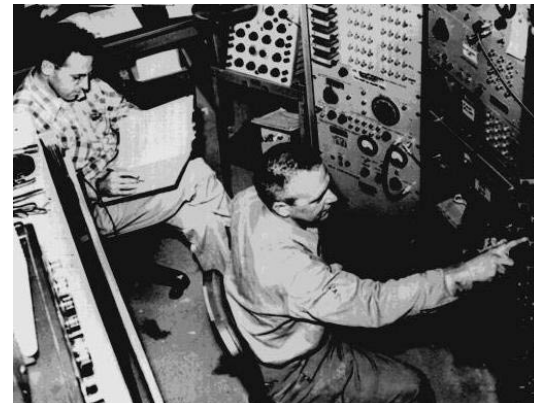
Interacciones de los neutrinos

- Interacciones por corrientes cargadas:



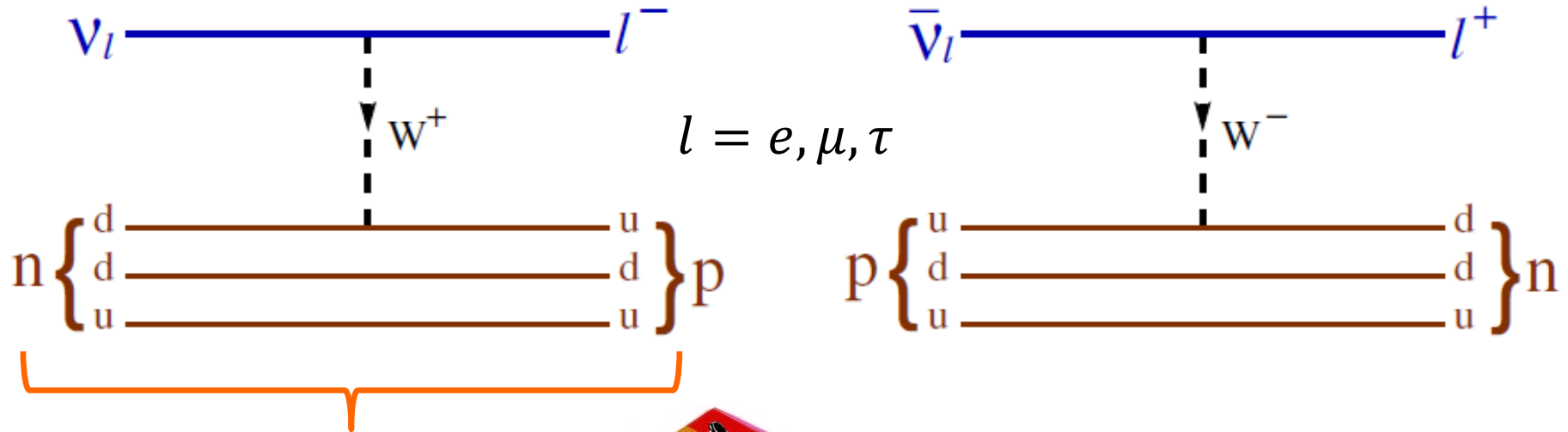
Proceso con el que se descubrió
el [antineutrino electrónico](#).

Cowan & Reines (1956)



Interacciones de los neutrinos

- Interacciones por corrientes cargadas:



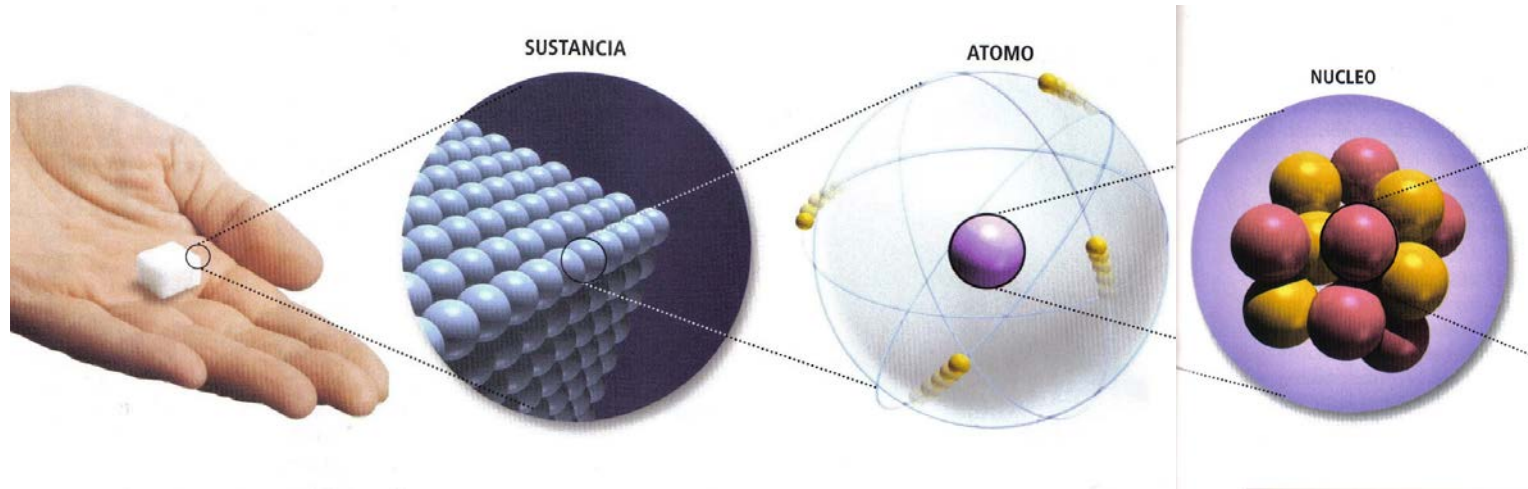
Tipo común de interacción en



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

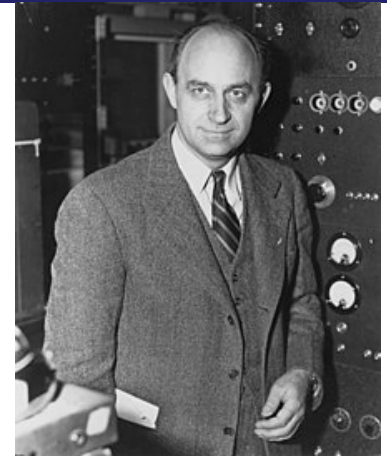
Núcleos

- Modelo de gas de Fermi:
 - Núcleo \approx 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**

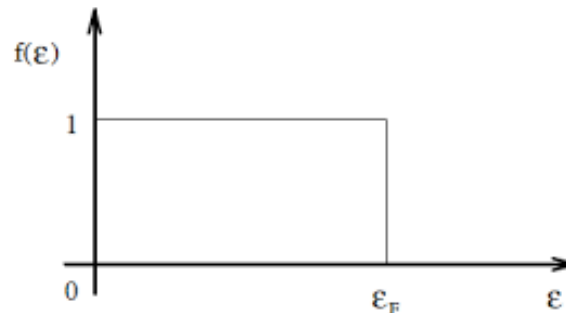
$$\rho = \frac{N}{V} = \frac{1}{3\pi^2} p_F^3$$

N : número de neutrones

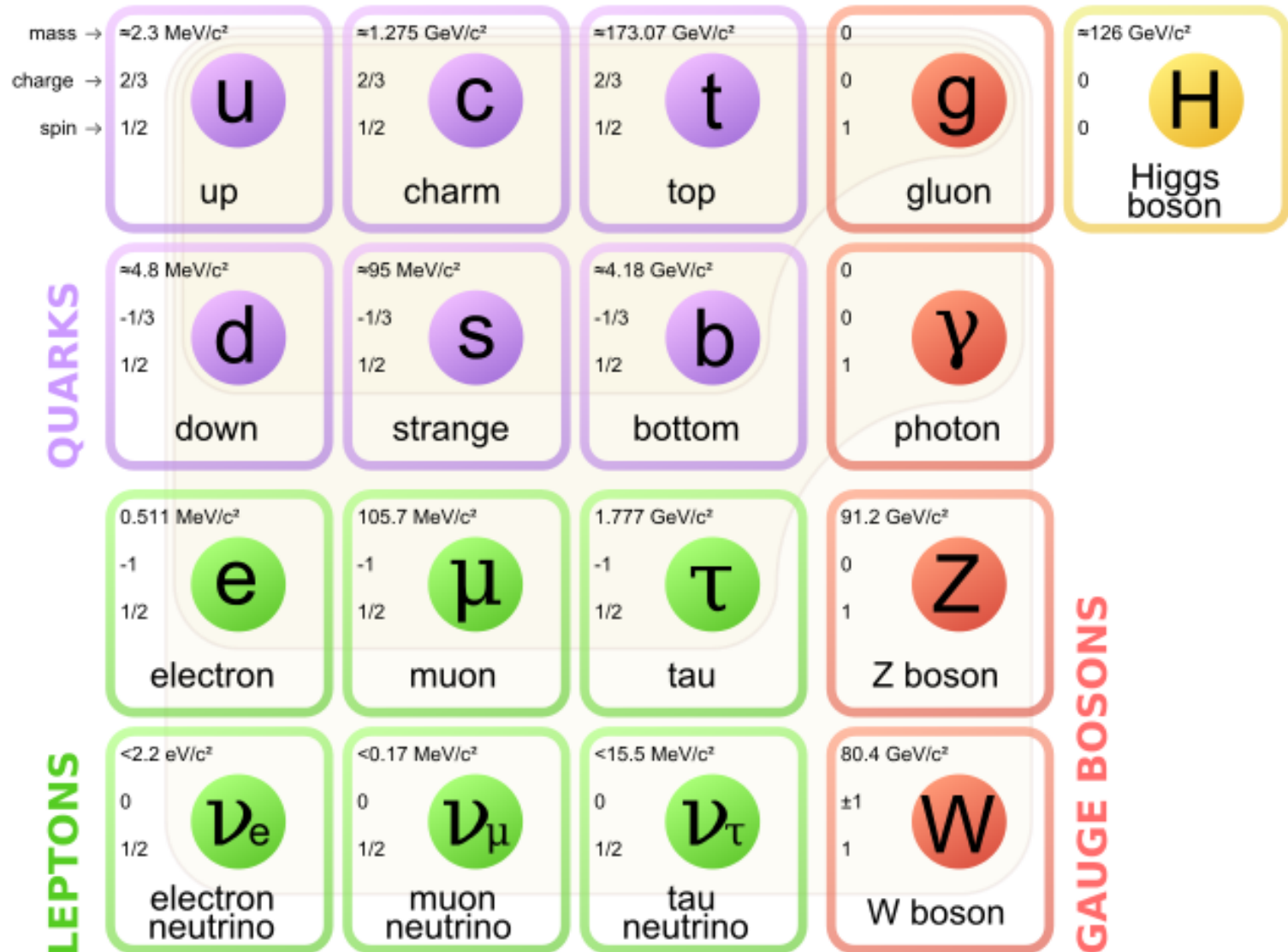
V : volumen del núcleo



E. Fermi



Modelo Estándar



Unidades de medida

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

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

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

$$[p] = \text{energía}/c$$

$$[m] = \text{energía}/c^2$$

$$[\text{energía}] = \text{MeV} = 10^6 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-13} \text{ J}$$

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

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

Cinemática relativista

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

- **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:

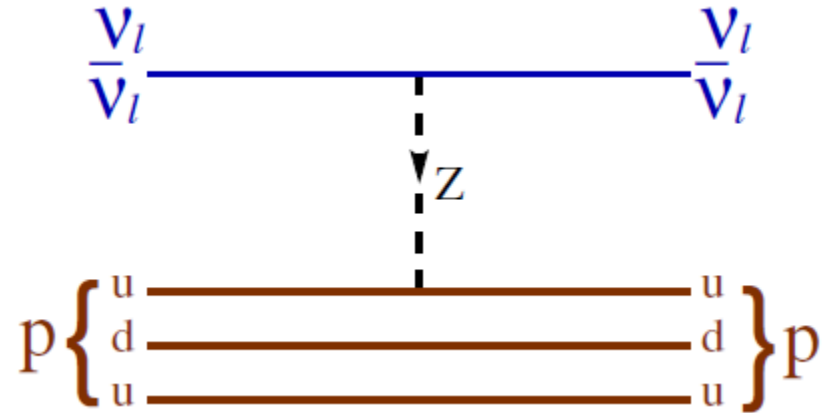
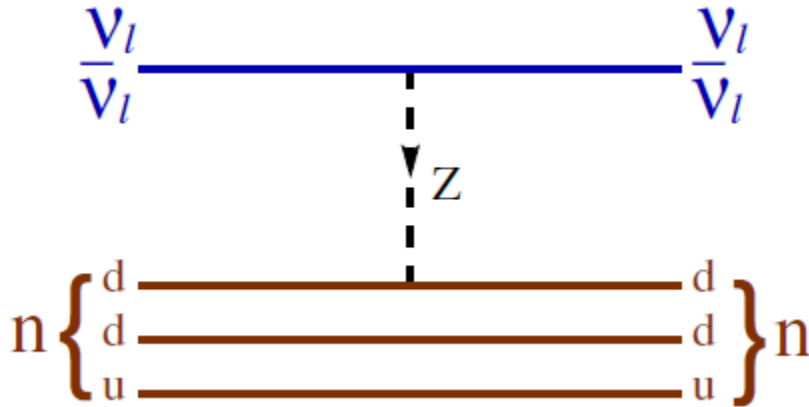
$$E^2 - (\vec{p} c)^2 = (m c^2)^2 \quad c = \text{velocidad de la luz}$$

¿Y si tuviéramos $\nu_{\mu} (nn) \rightarrow \mu^{-} p n$ pero 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.

mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
charge →	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs boson
QUARKS	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ -1/3 1/2	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ -1/3 1/2	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ -1/3 1/2	0 0 1	γ photon
	d down	s strange	b bottom		
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 1/2	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ -1 1/2	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ -1 1/2	Z Z boson	
LEPTONS	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 1/2	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 1/2	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 1/2	W W boson	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino		
				GAUGE BOSONS	