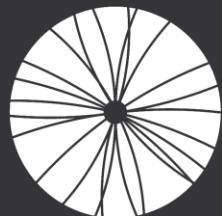


Masterclass de física de partículas: Un viaje al centro de la materia

Arnau Brossa Gonzalo

03/03/2023



IGFAE

Instituto Galego de Física de Altas Enerxías



XUNTA
DE GALICIA

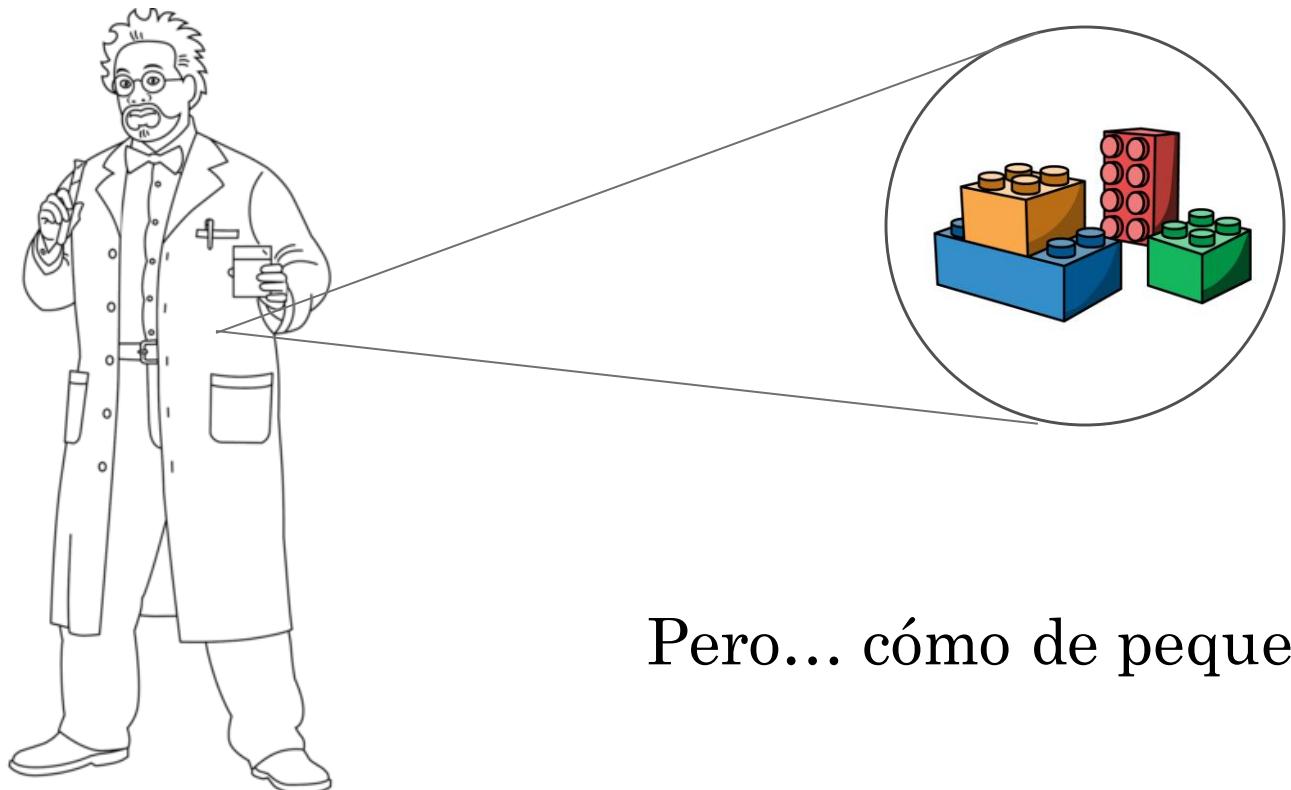


UNIÓN EUROPEA

galicia

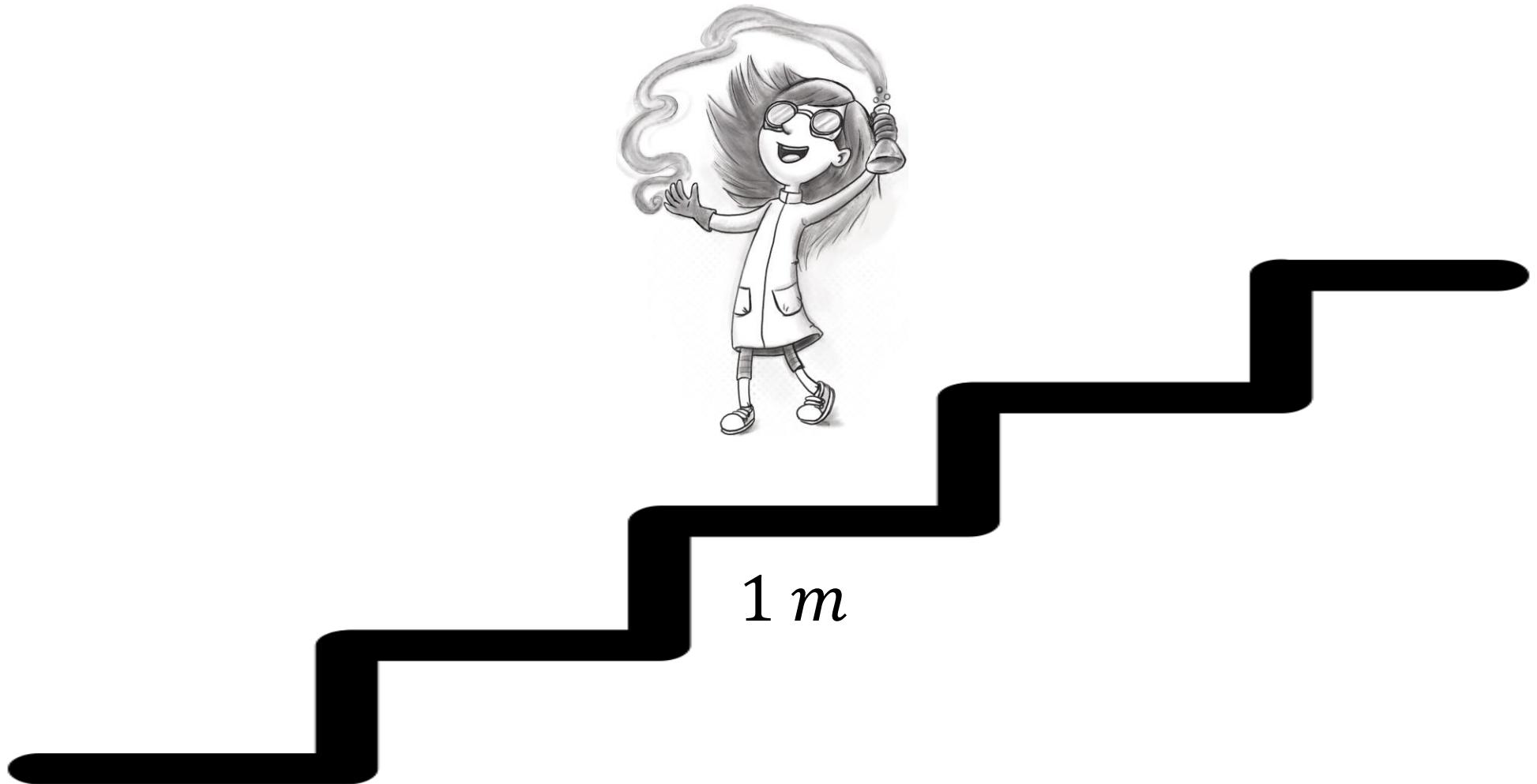
¿Qué es la física de partículas?

En física de partículas intentamos medir y observar los **bloques fundamentales de la materia**, es decir las piezas más pequeñas de las cuales estamos hechos.

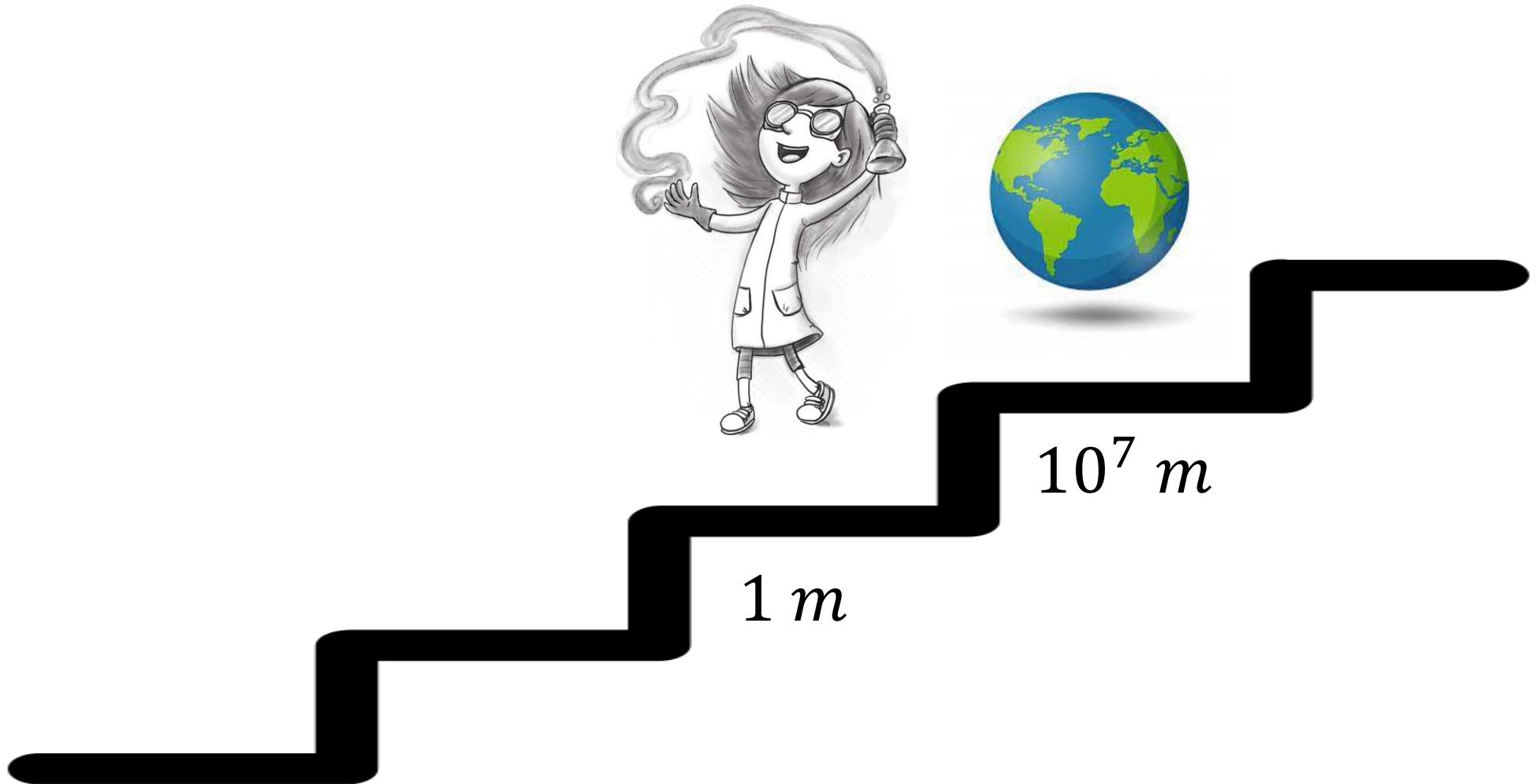


Pero... cómo de pequeñas son esas piezas?

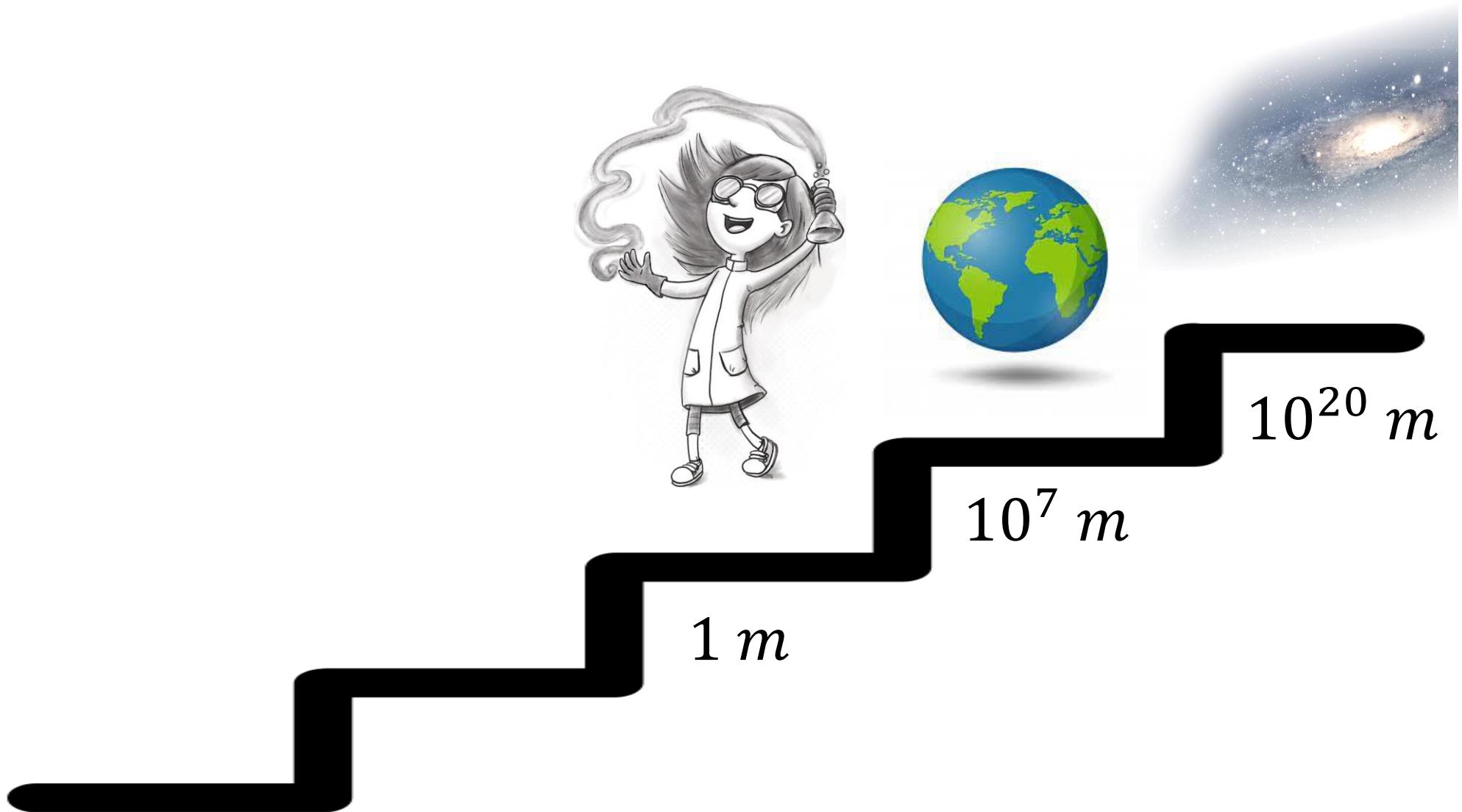
Las escalas de la naturaleza



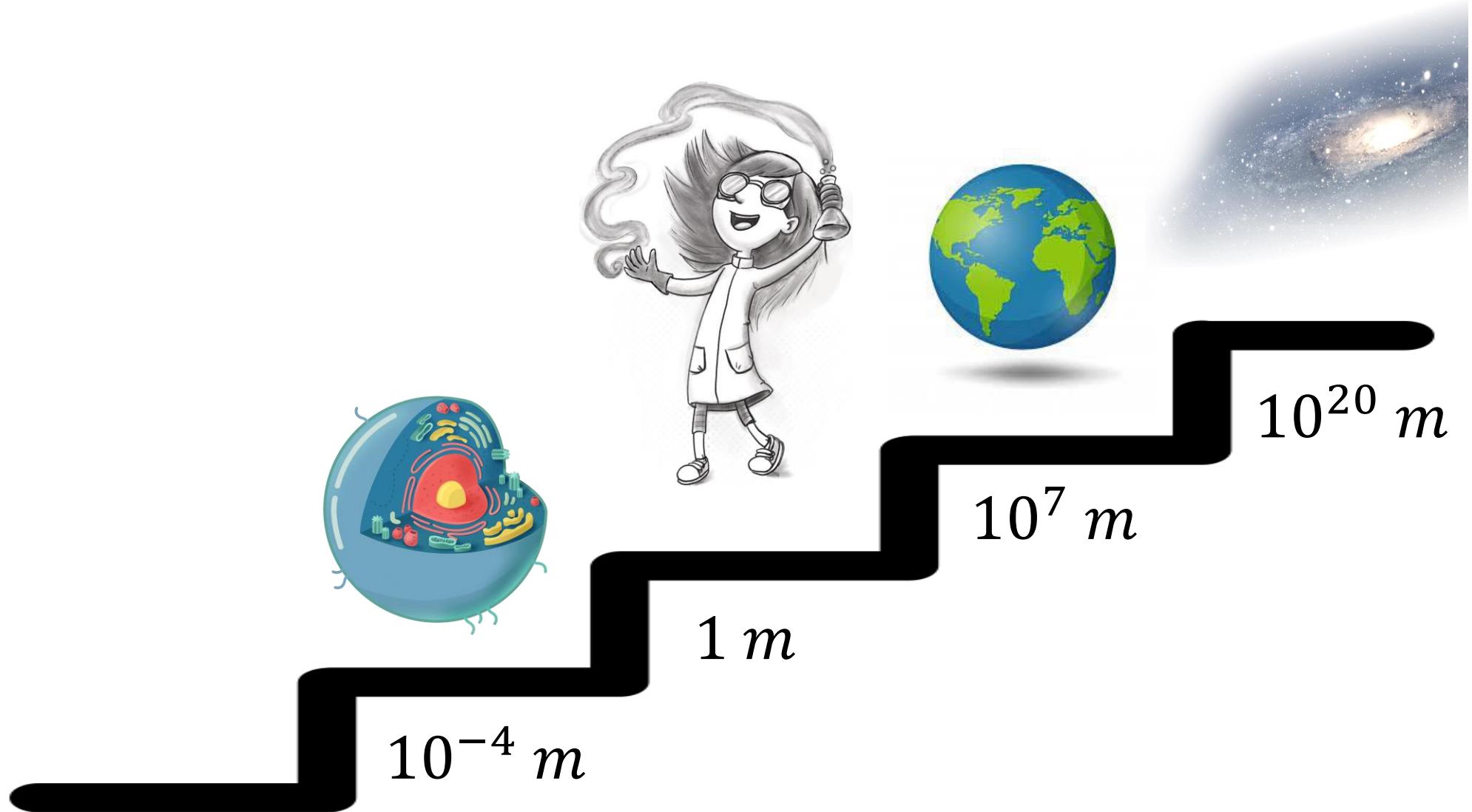
Las escalas de la naturaleza



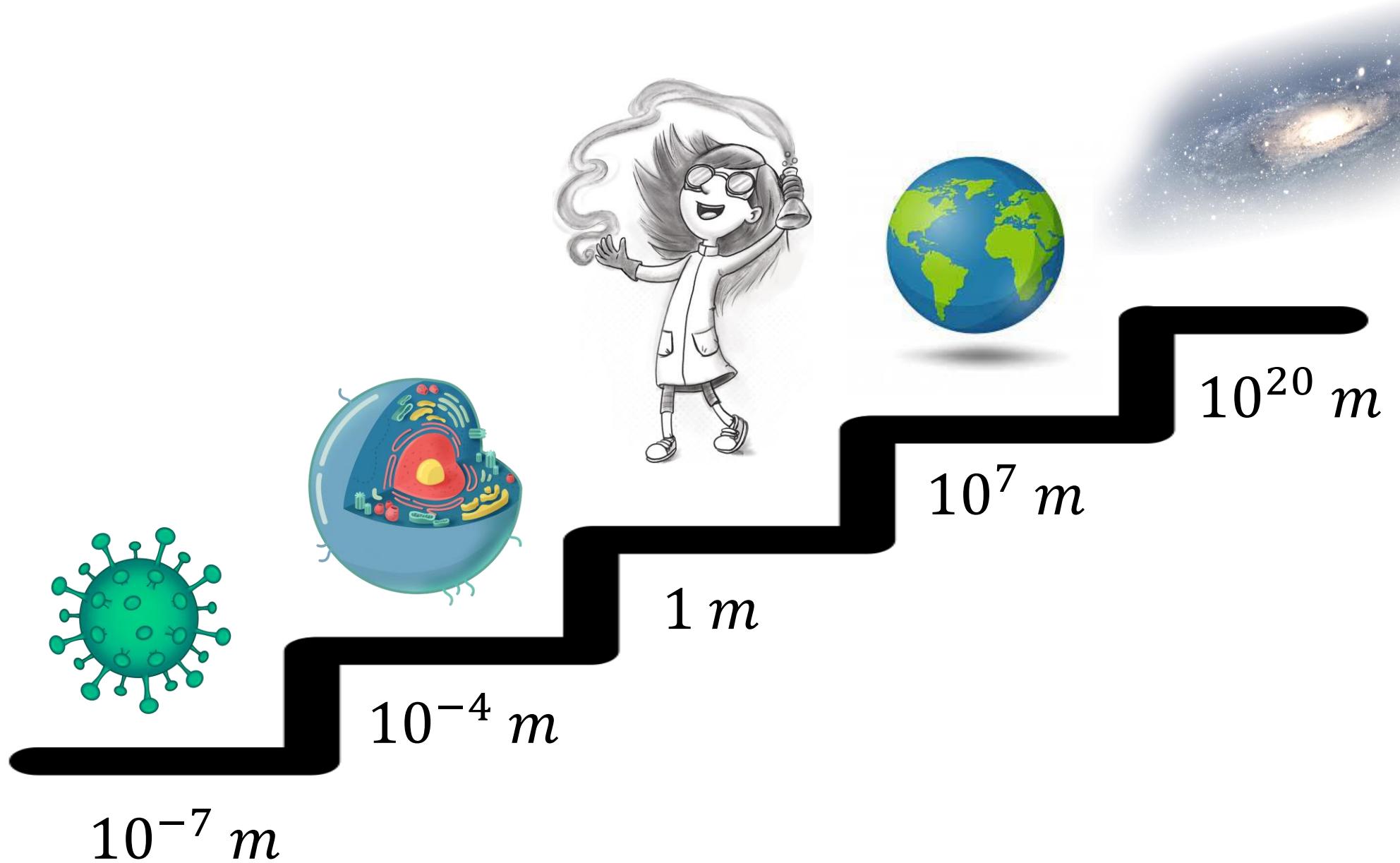
Las escalas de la naturaleza



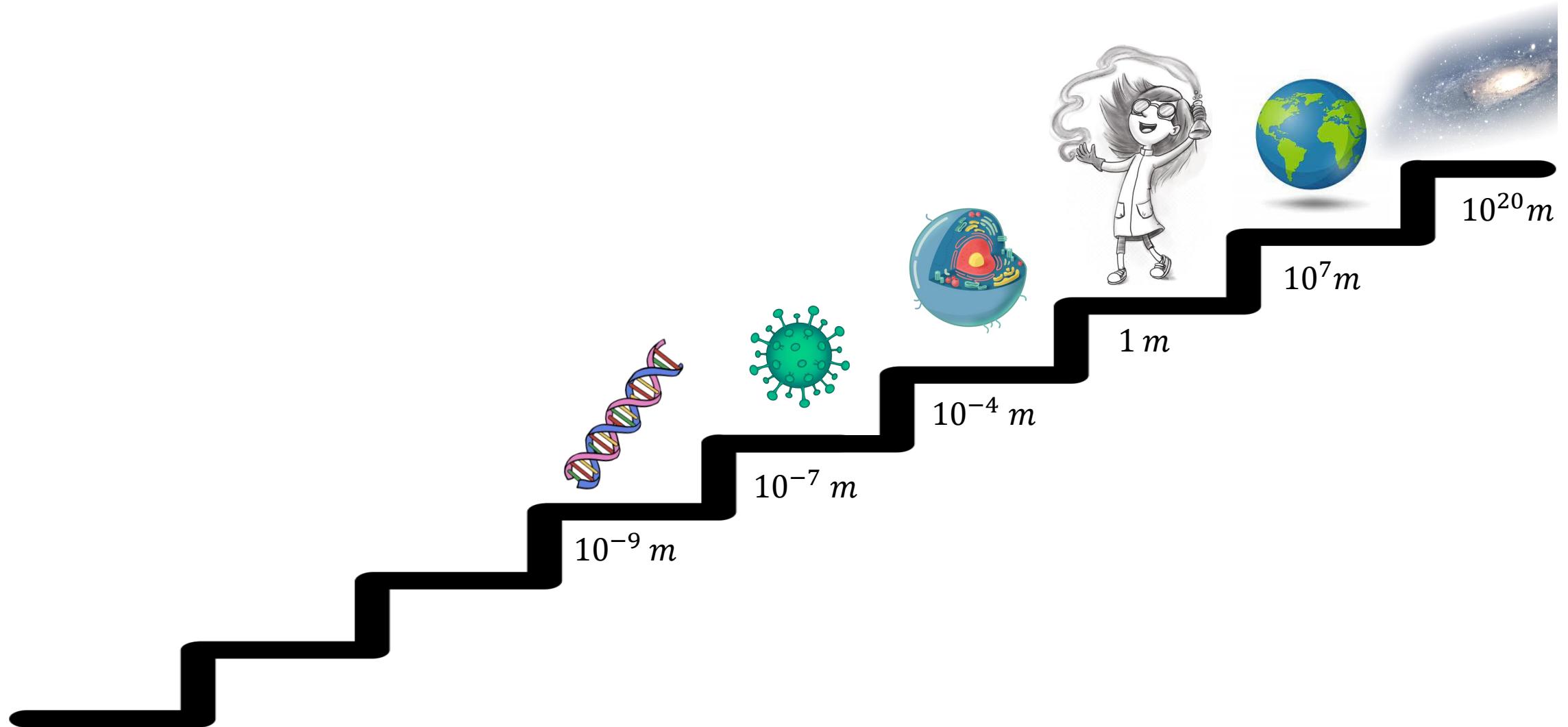
Las escalas de la naturaleza



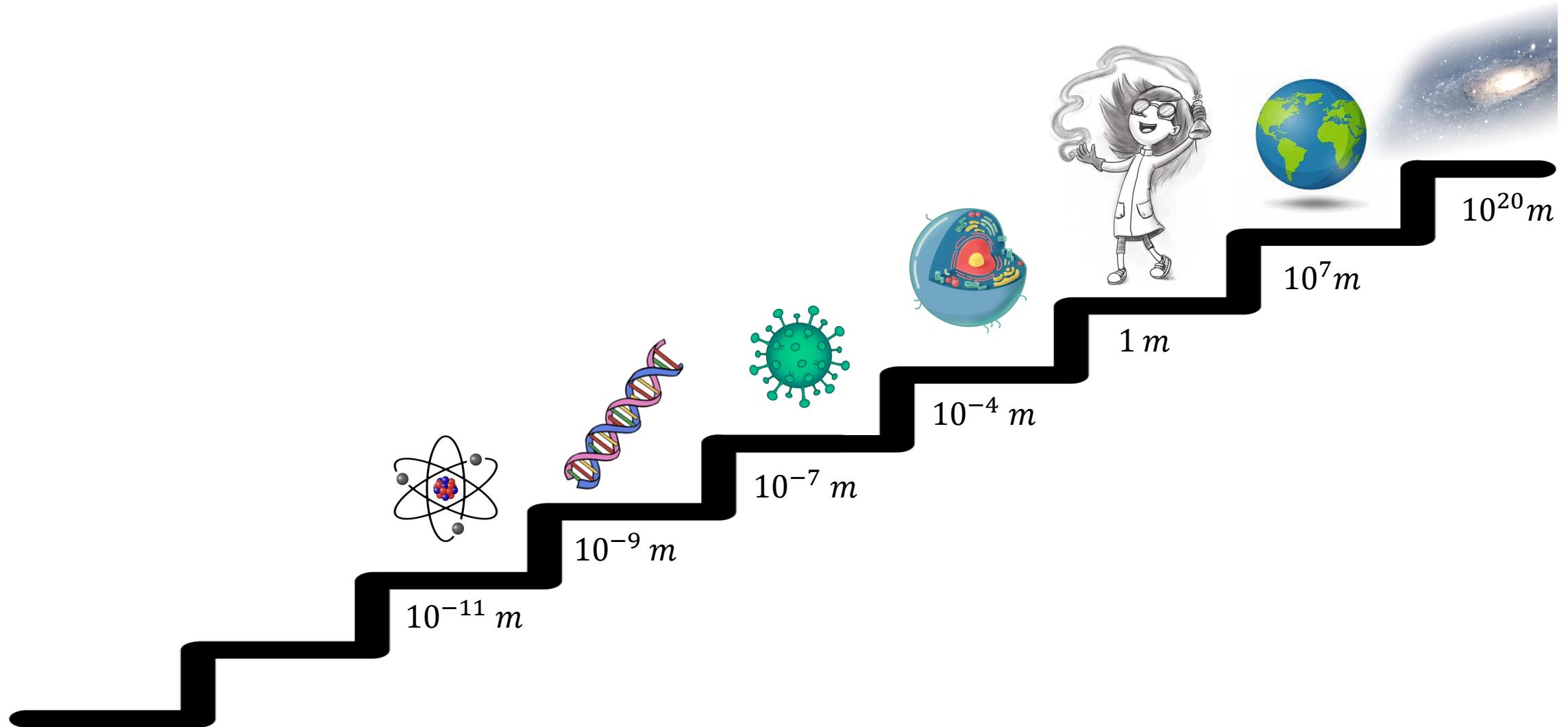
Las escalas de la naturaleza



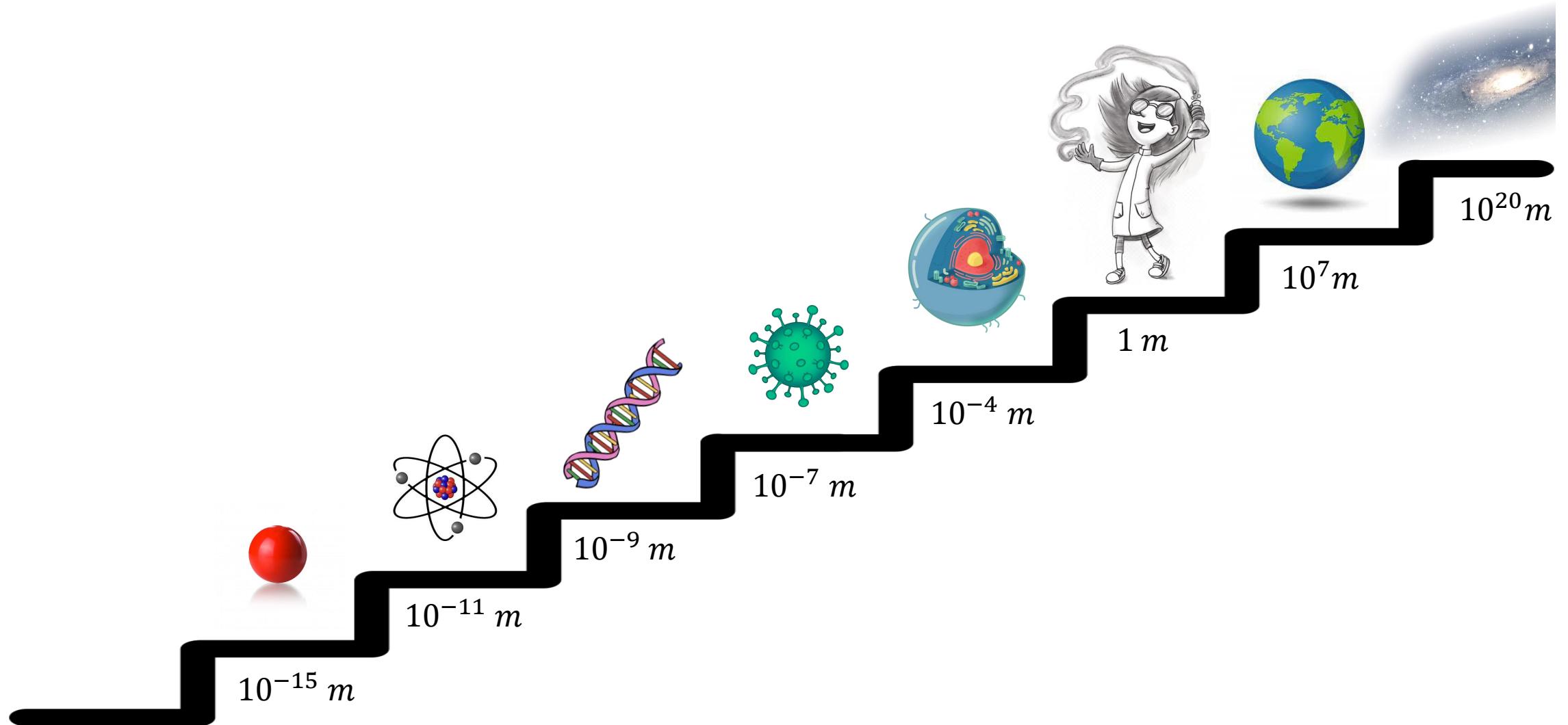
Las escalas de la naturaleza



Las escalas de la naturaleza



Las escalas de la naturaleza



10



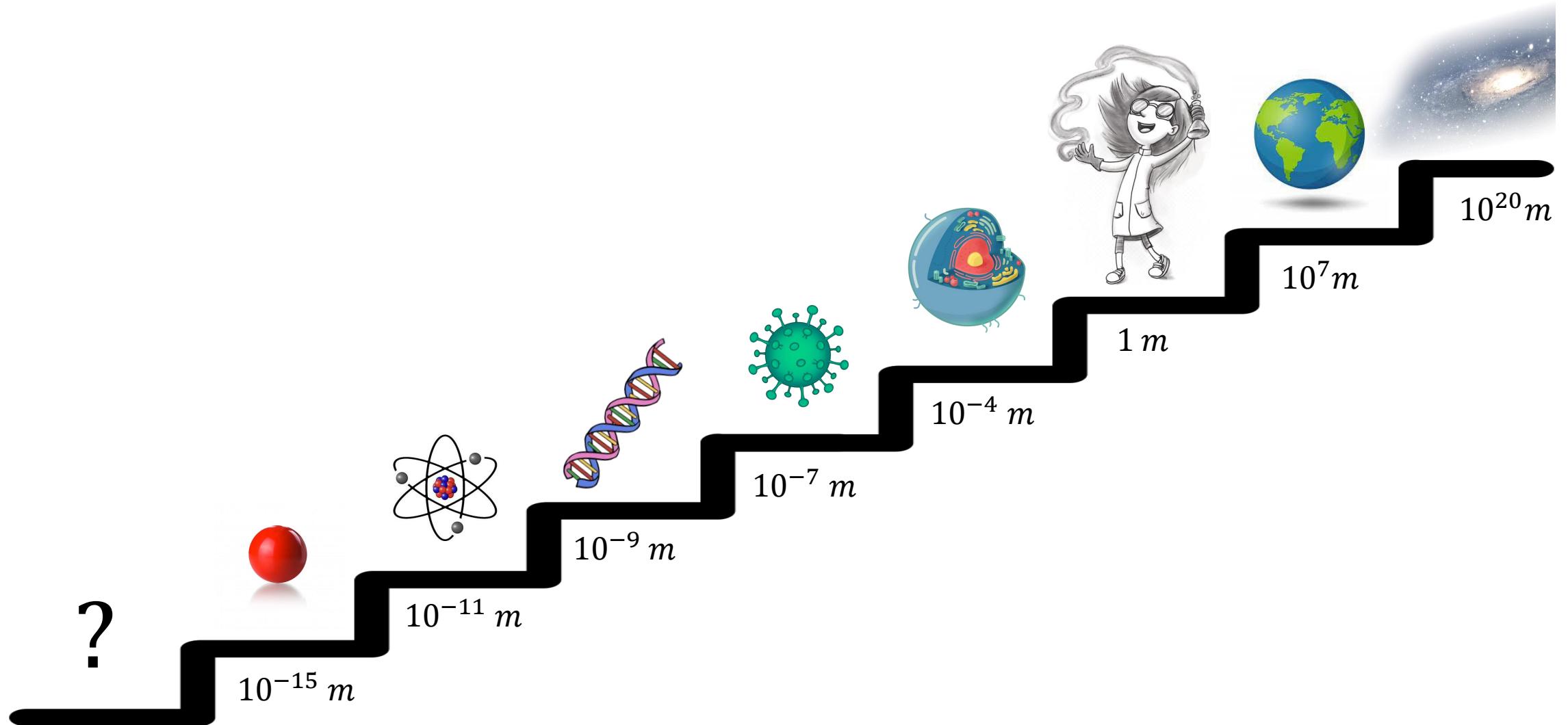
IGFAE

USC

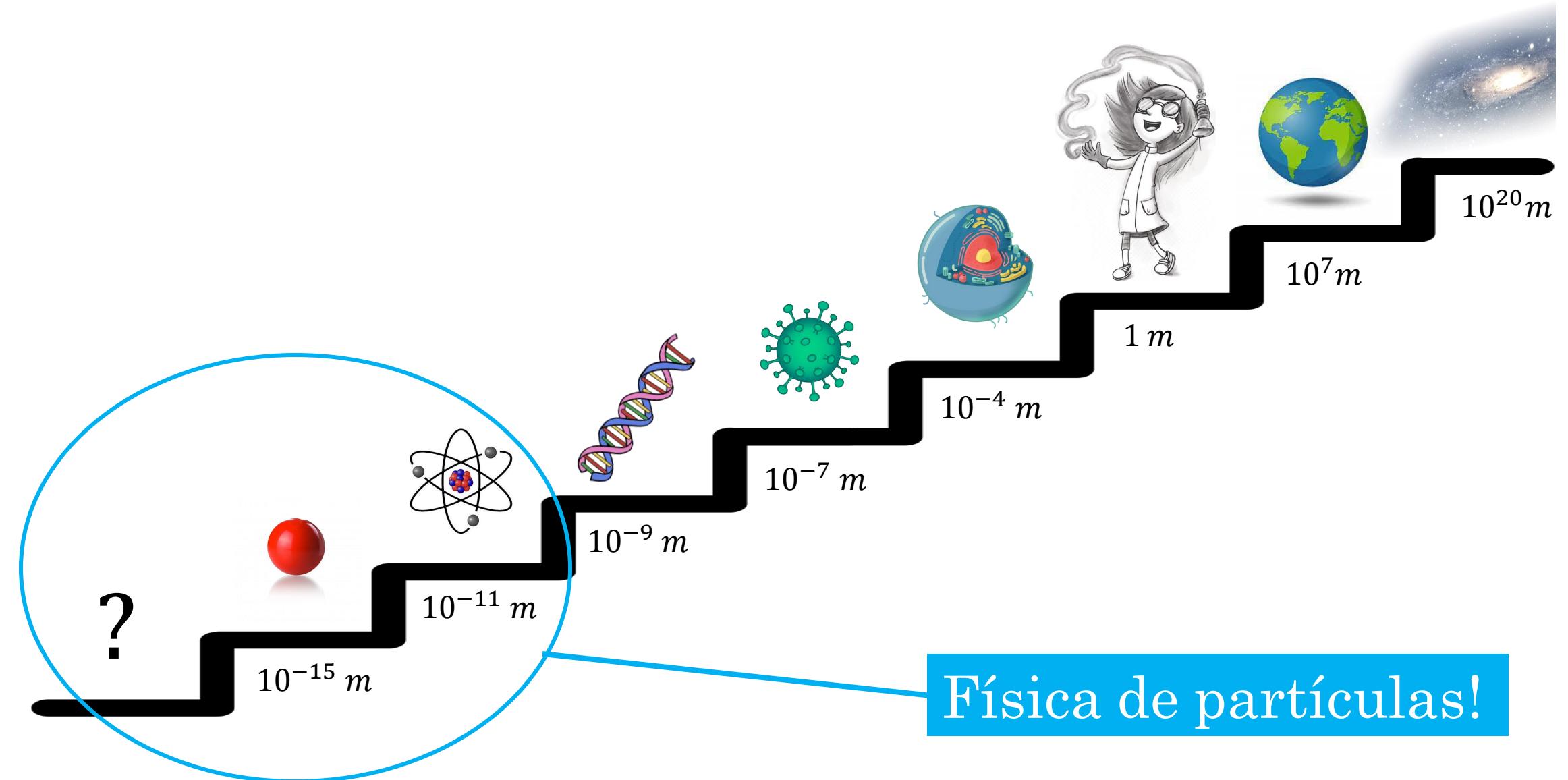
XUNTA
DE GALICIA

Instituto Gallego de Física de Altas Energías

Las escalas de la naturaleza

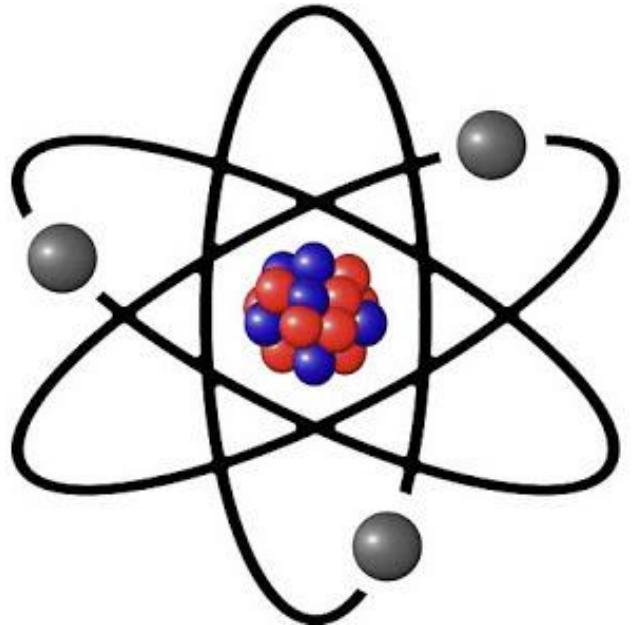


Las escalas de la naturaleza



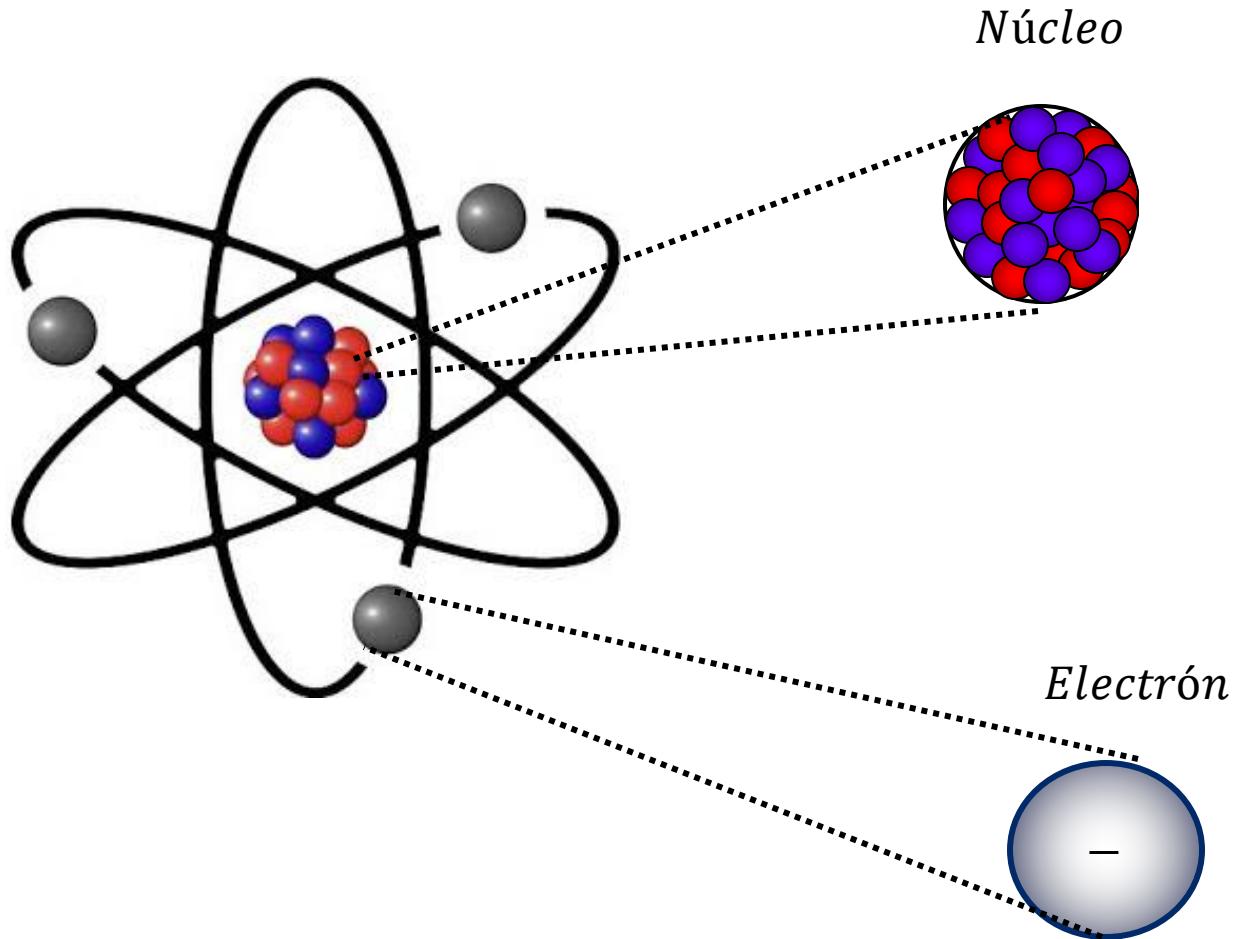
¿Cuáles son esas piezas fundamentales?

¿De qué está compuesto el átomo?



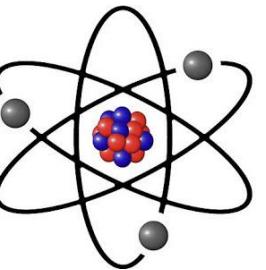
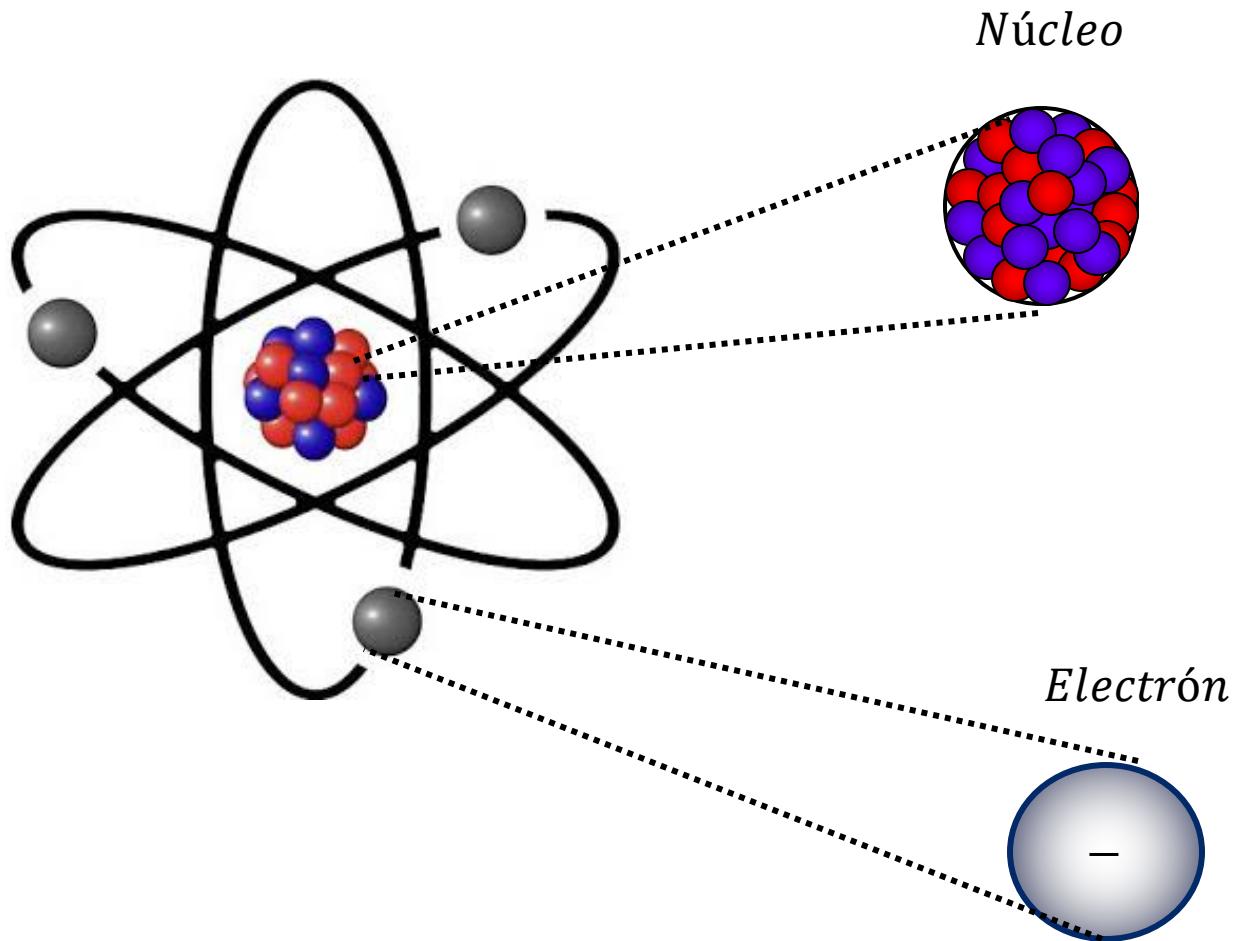
¿Cuáles son esas piezas fundamentales?

¿De qué está compuesto el átomo?

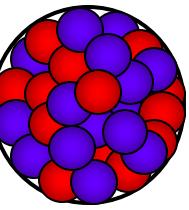


¿Cuáles son esas piezas fundamentales?

¿De qué está compuesto el átomo?



VS



=

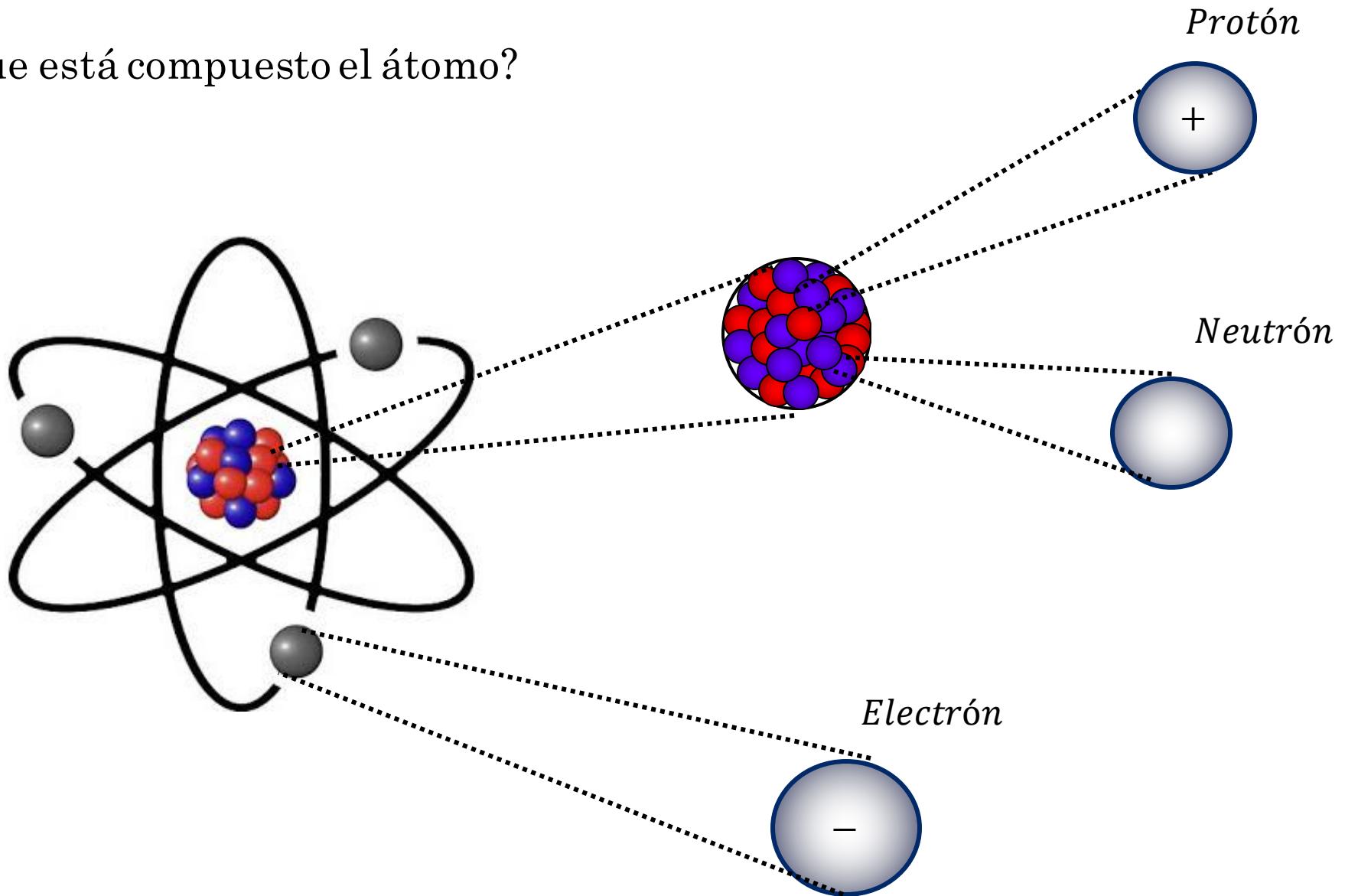


VS



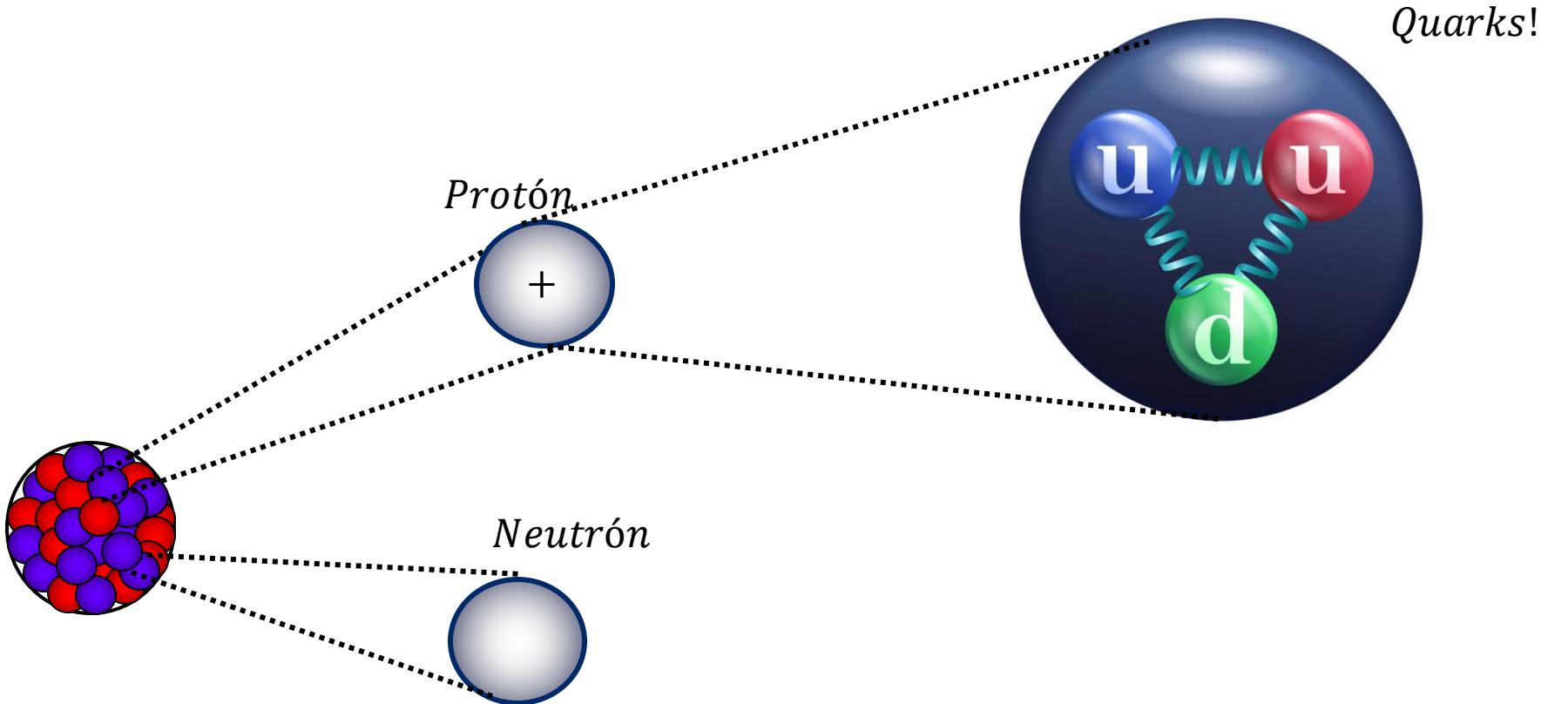
¿Cuáles son esas piezas fundamentales?

¿De qué está compuesto el átomo?



¿Cuáles son esas piezas fundamentales?

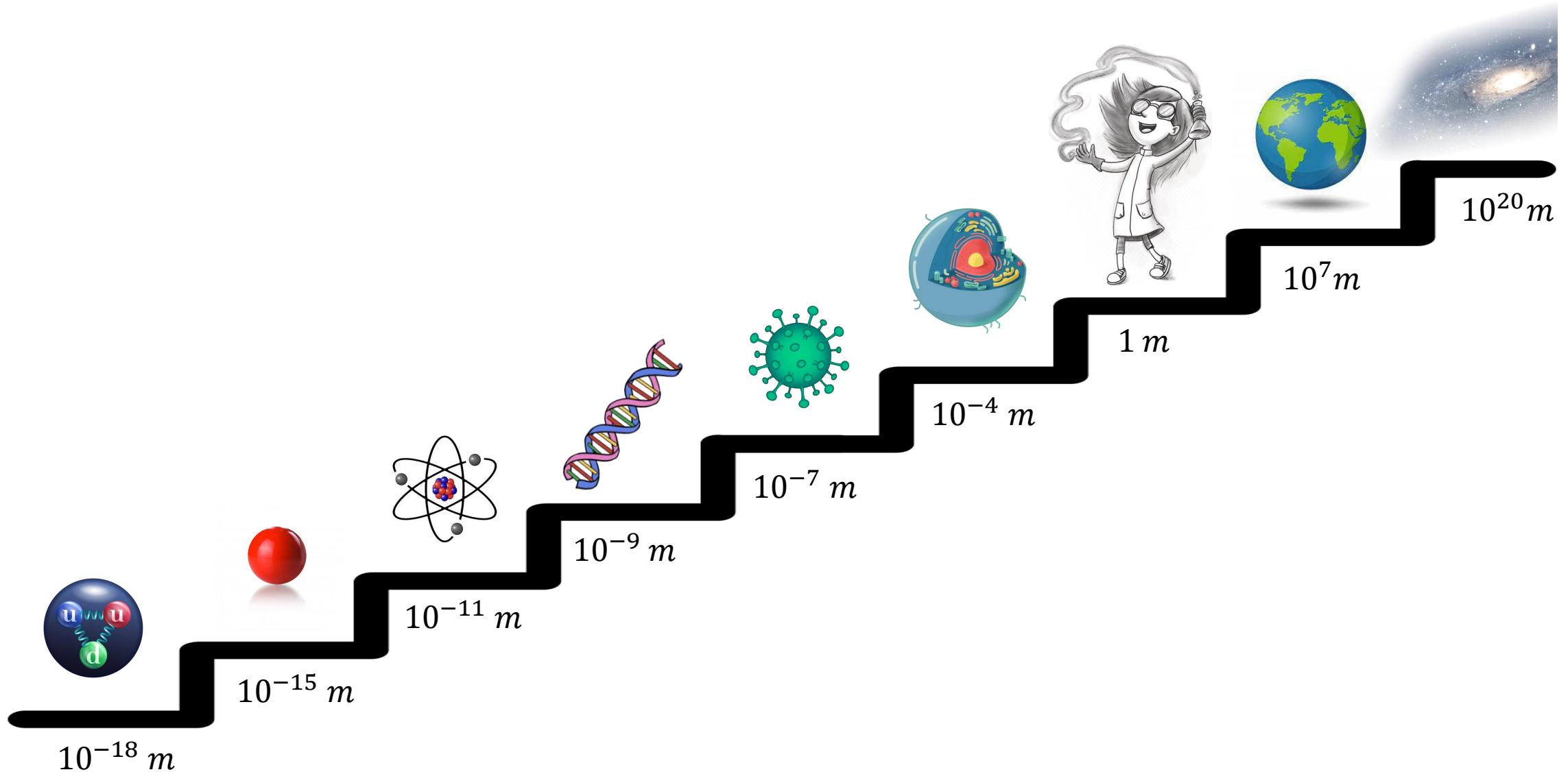
¿De qué está compuesto el átomo?



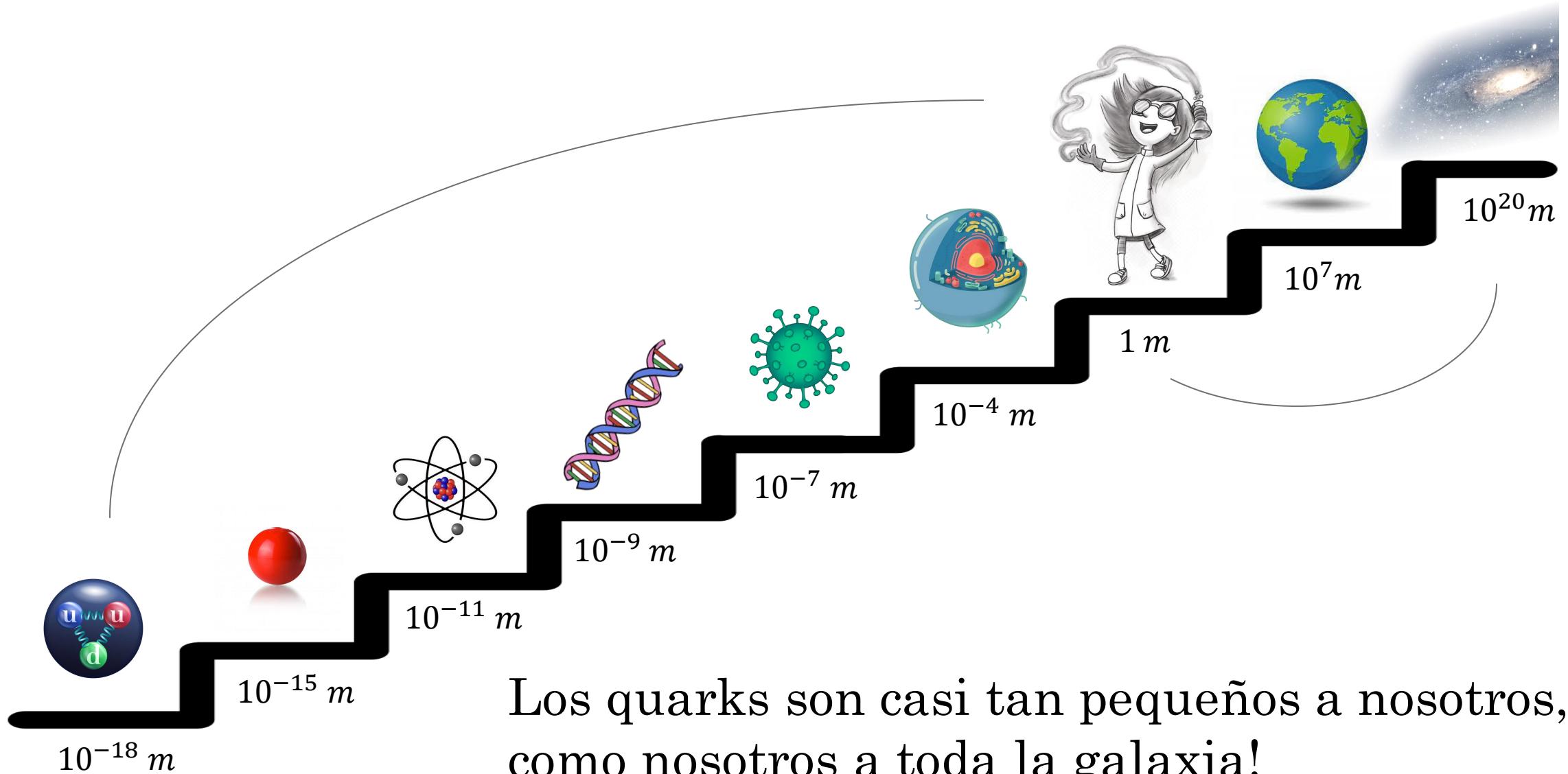
Y los quarks? Se pueden dividir en partes más pequeñas?



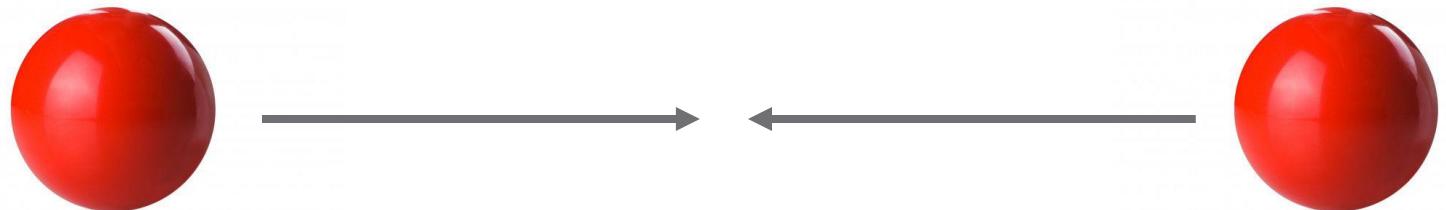
Las escalas de la naturaleza



Las escalas de la naturaleza



¿Pero y estas partículas... cómo interaccionan?



¡No nos vale sólo con descubrir cuales son las piezas fundamentales,
También buscamos como estas interaccionan entre ellas!

Una interacción es una acción ejercida recíprocamente entre dos
objetos

Al igual que con las partículas, queremos buscar las **interacciones
fundamentales**, es decir, las que no se pueden reducir a otras más
básicas

¿Pero y estas partículas... cómo interaccionan?

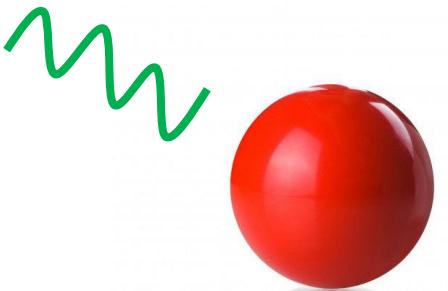
En la naturaleza, existen **CUATRO** interacciones fundamentales:



¿Pero y estas partículas... cómo interaccionan?

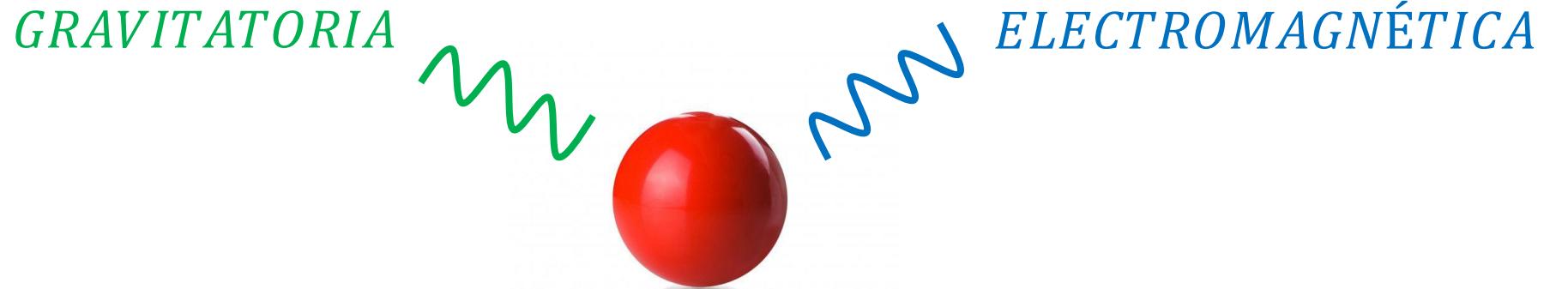
En la naturaleza, existen **CUATRO** interacciones fundamentales:

GRAVITATORIA



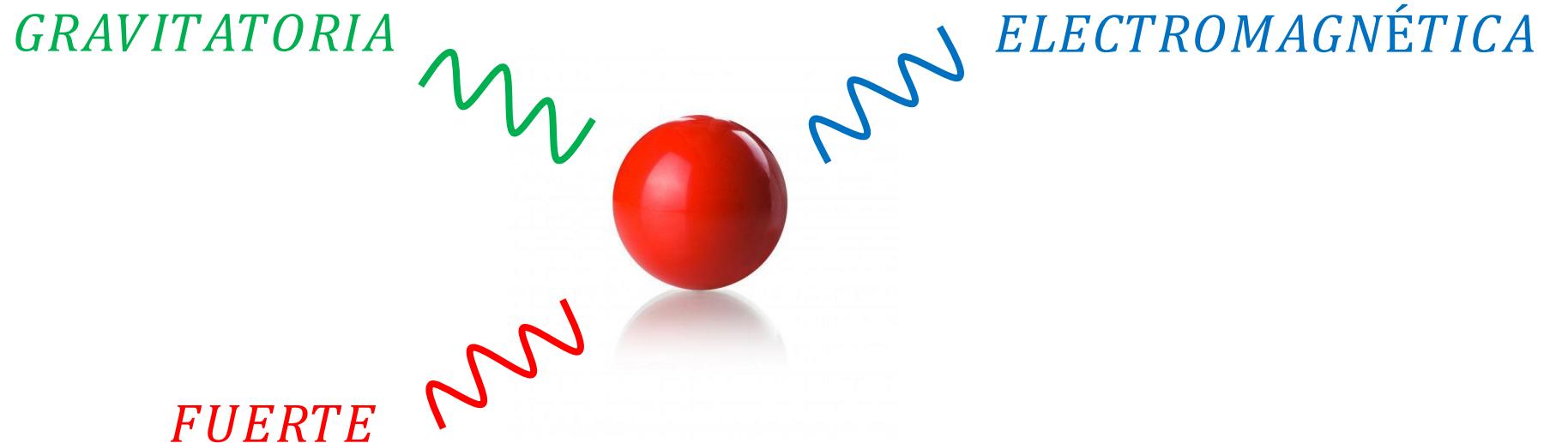
¿Pero y estas partículas... cómo interaccionan?

En la naturaleza, existen **CUATRO** interacciones fundamentales:



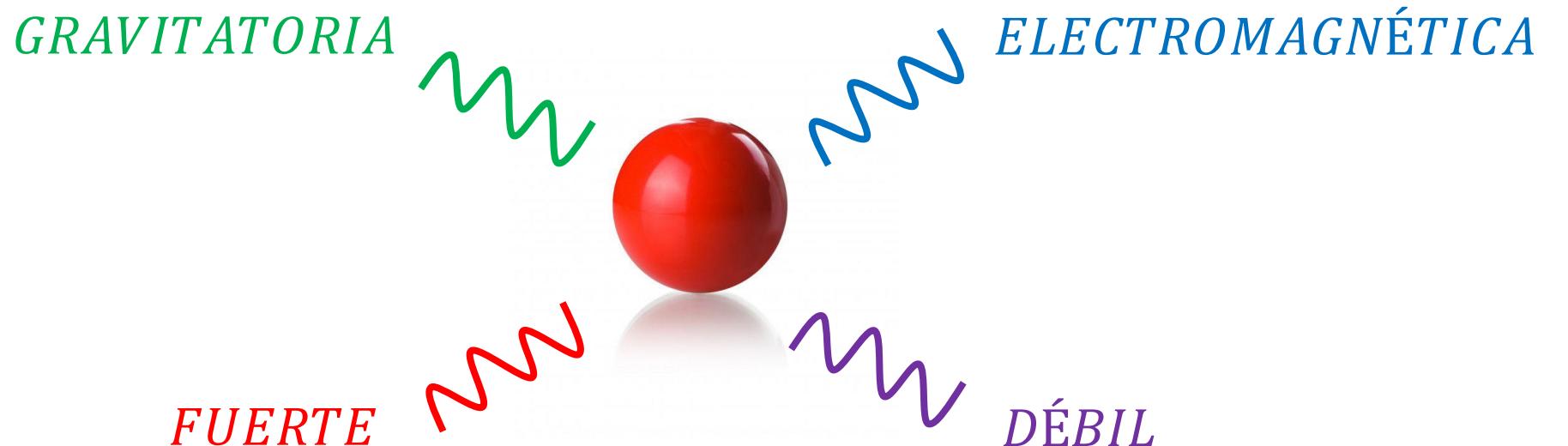
¿Pero y estas partículas... cómo interaccionan?

En la naturaleza, existen **CUATRO** interacciones fundamentales:



¿Pero y estas partículas... cómo interaccionan?

En la naturaleza, existen **CUATRO** interacciones fundamentales:



La Interacción Gravitatoria

- Es la que hace girar los planetas alrededor del sol
- Y la que hace que las cosas caigan al suelo
- Depende de la masa de cada objeto, así que para las partículas fundamentales es prácticamente insignificante



$$\text{Force (F)} = F_1 = F_2 = G \frac{m_1 \cdot m_2}{d^2}$$

La Interacción Electromagnética

Es la misma interacción que genera la corriente eléctrica y el magnetismo!

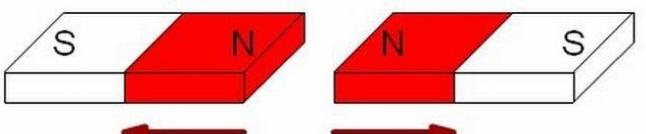
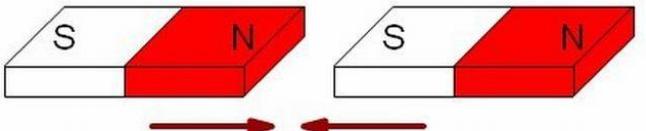


$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

Electric force *Magnetic force*



En este caso, depende de la carga electromagnética de cada objeto, atrayendo objetos de carga opuesta y repeliendo objetos de la misma carga



La Interacción Electromagnética

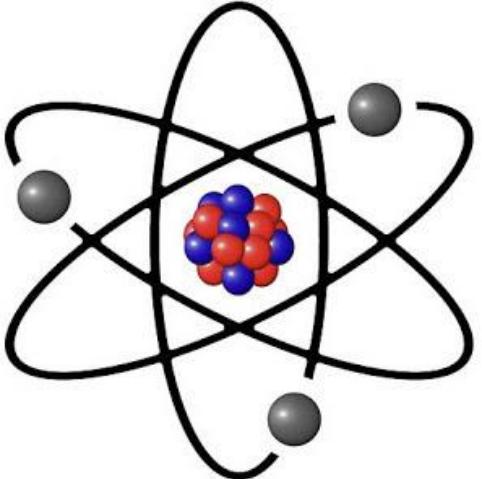
Del mismo modo que la gravedad hace girar a los planetas alrededor del sol, la fuerza electromagnética mantiene los electrones girando alrededor del núcleo

FUERZA GRAVITATORIA



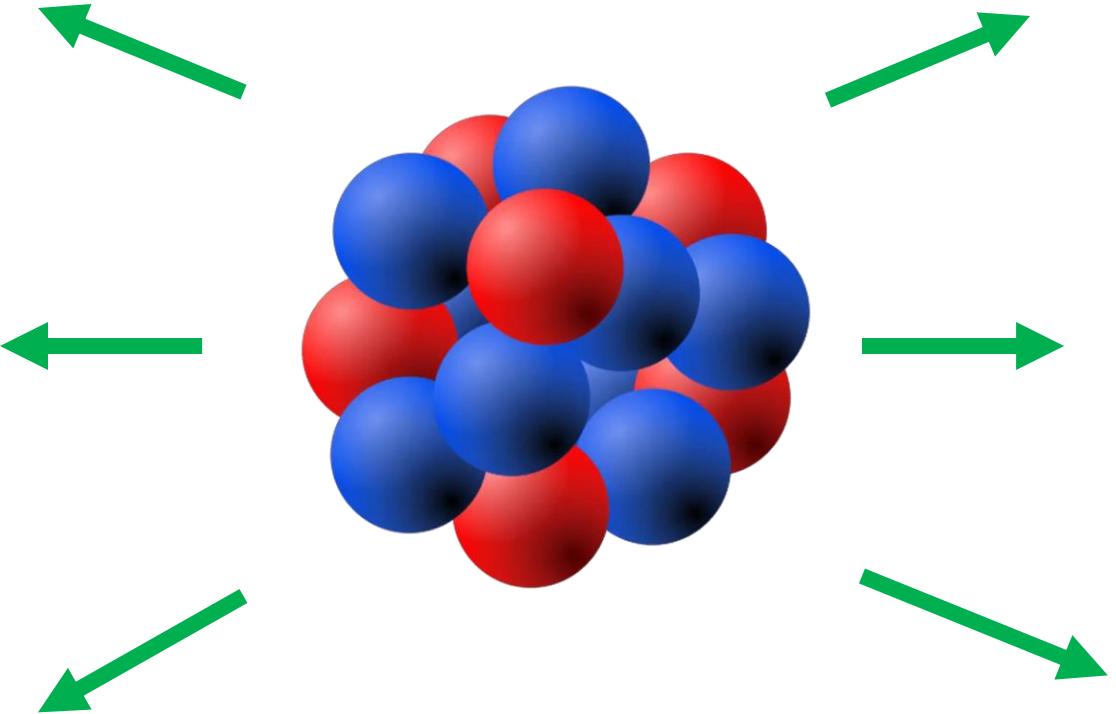
\approx

*FUERZA
ELECTROMAGNÉTICA*



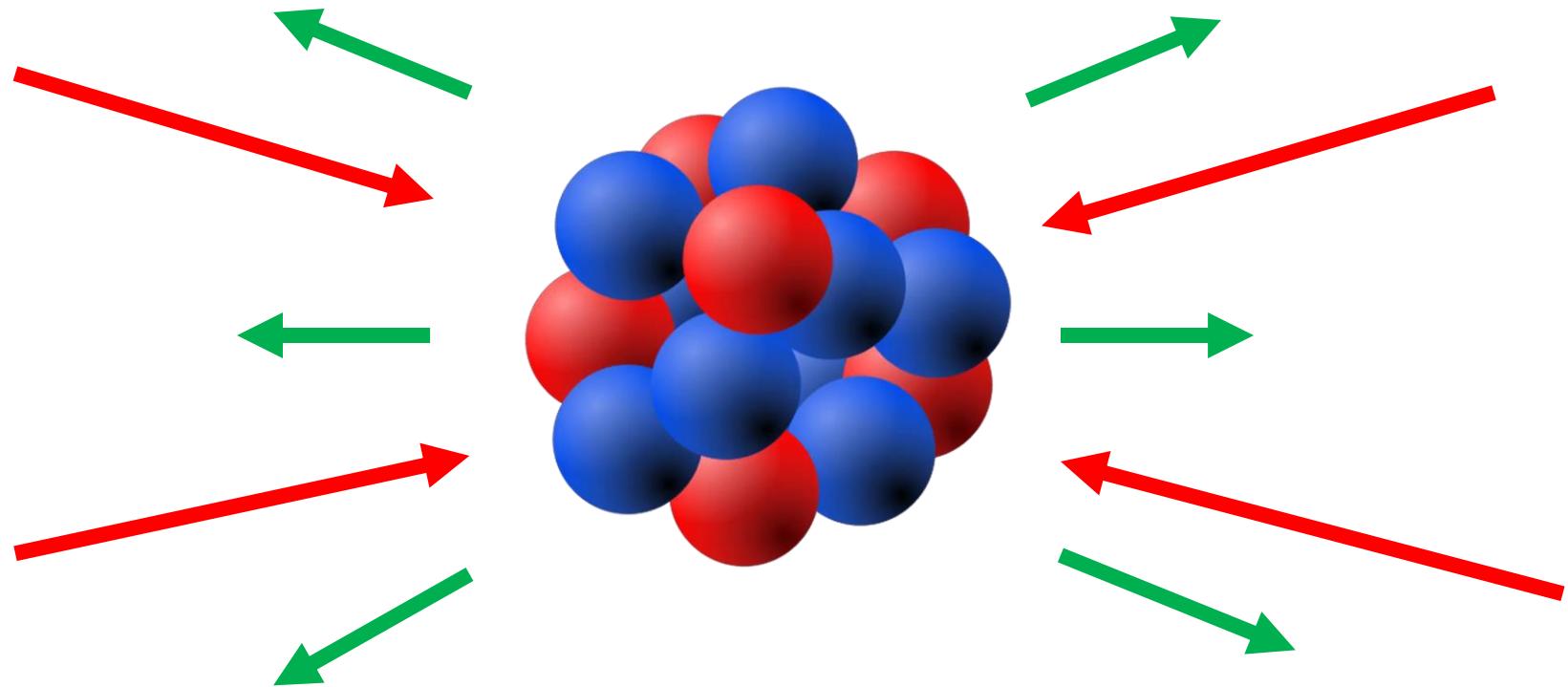
La Interacción Electromagnética

Pero... el núcleo está formado por protones con carga positiva, no tendrían que repelerse?



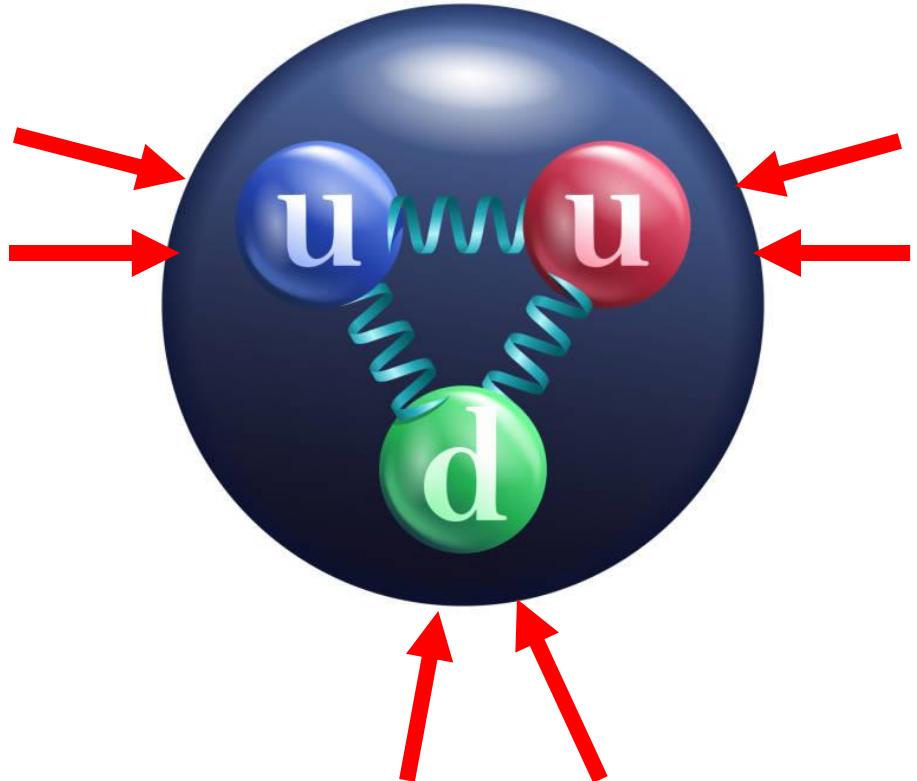
La Interacción Fuerte

La interacción fuerte compensa la electromagnética, manteniendo los protones unidos



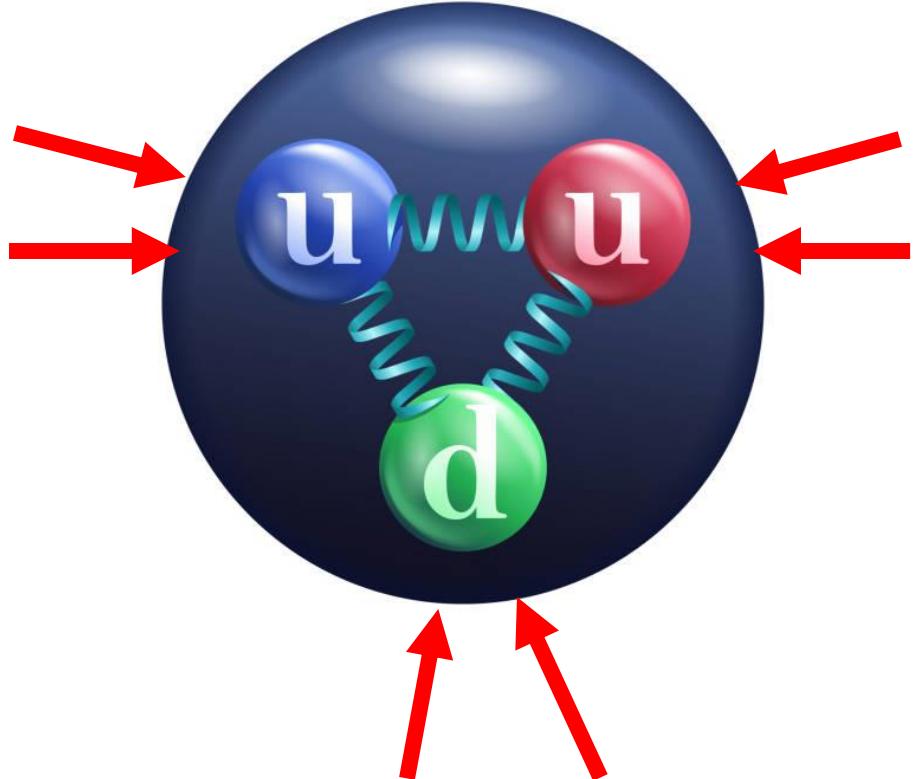
La Interacción Fuerte

La interacción fuerte afecta directamente a los quarks, haciendo que estos se mantengan unidos para formar los protones y neutrones



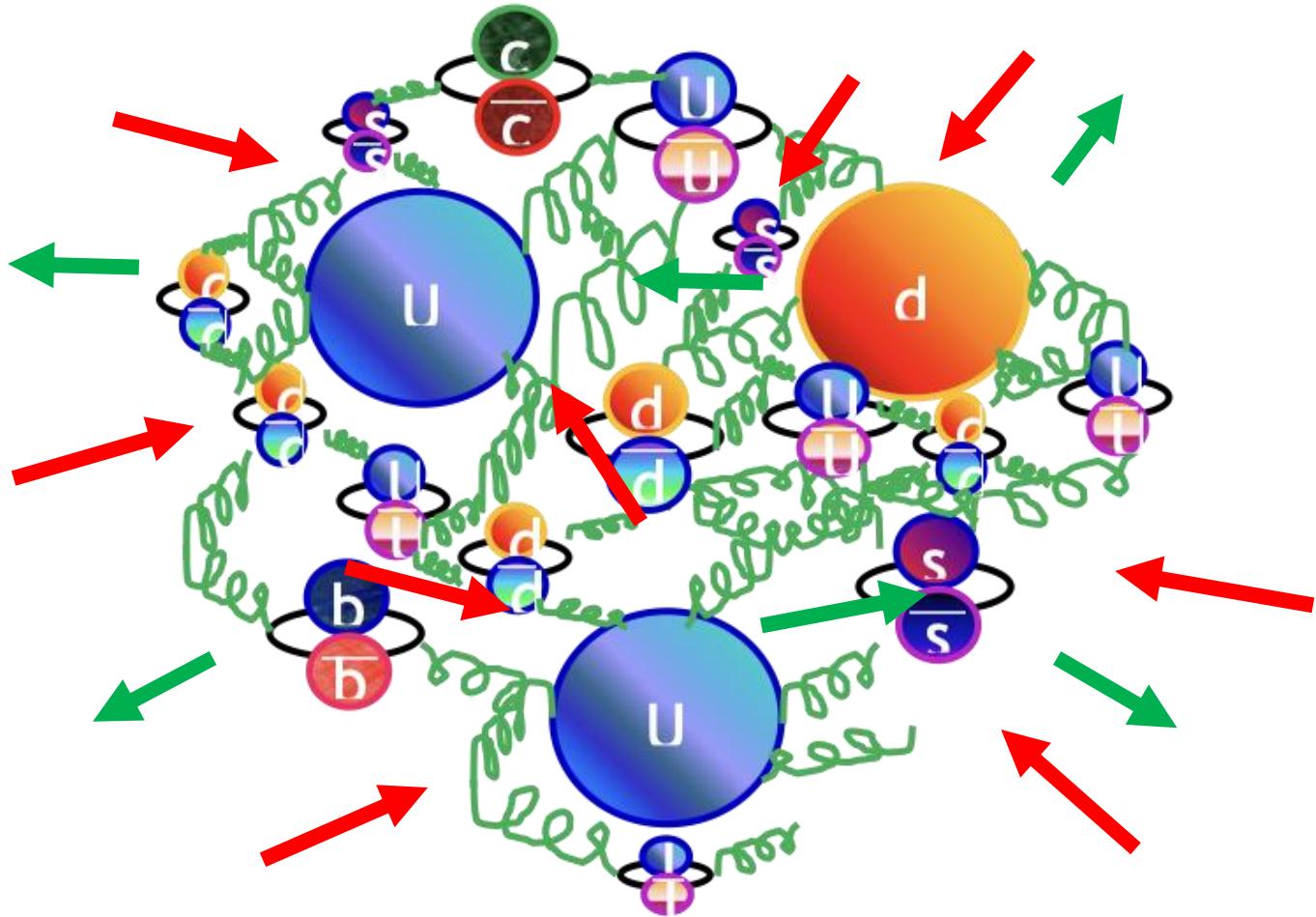
La Interacción Fuerte

El problema, es que medir la fuerza fuerte no es tan simple... en realidad el protón tiene más bien esta pinta...



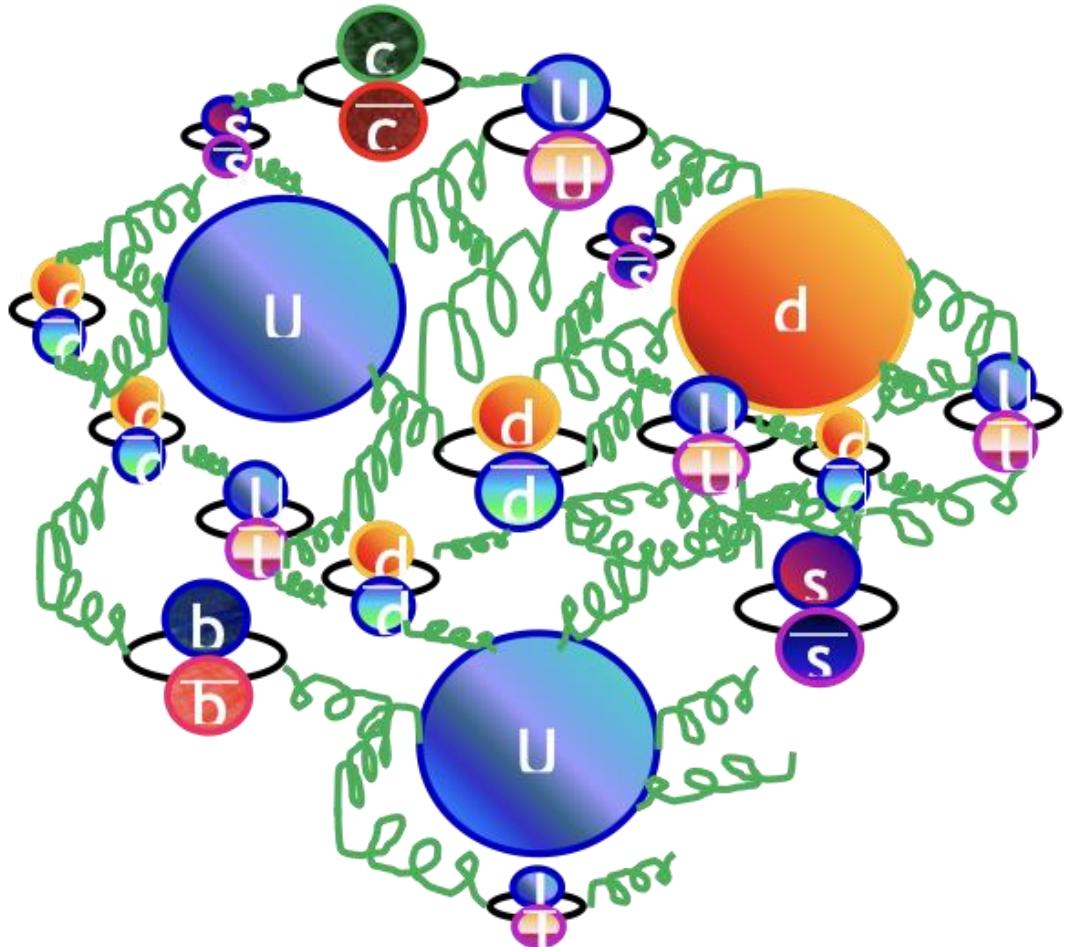
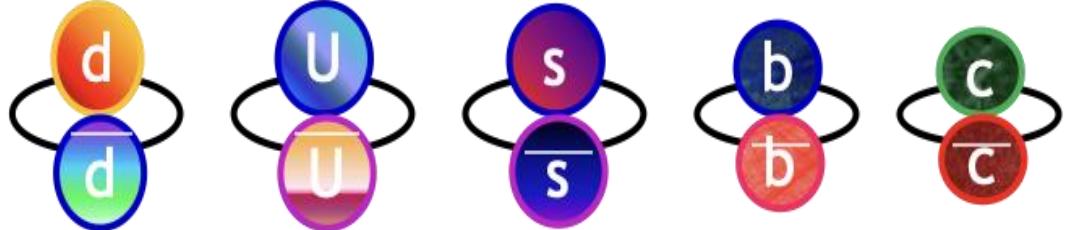
La Interacción Fuerte

El problema, es que medir la fuerza fuerte no es tan simple... en realidad el protón tiene más bien esta pinta...



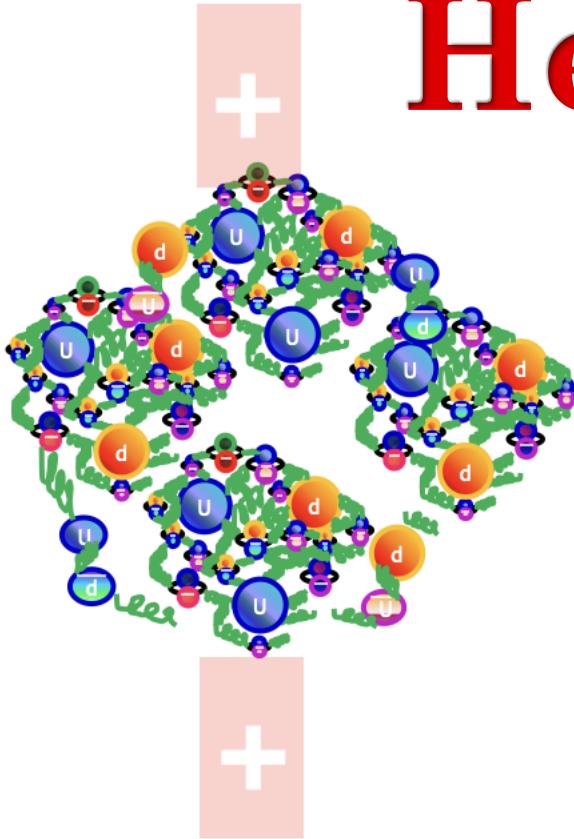
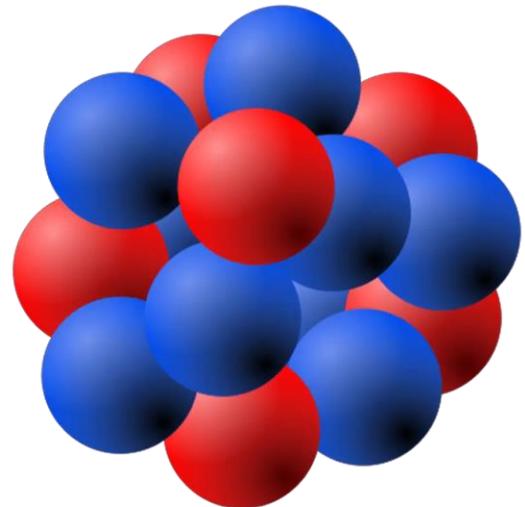
La Interacción Fuerte

A parte de los tres quarks “principales” tenemos muchas otras parejas de quark/anti-quark constantemente creándose y aniquilándose



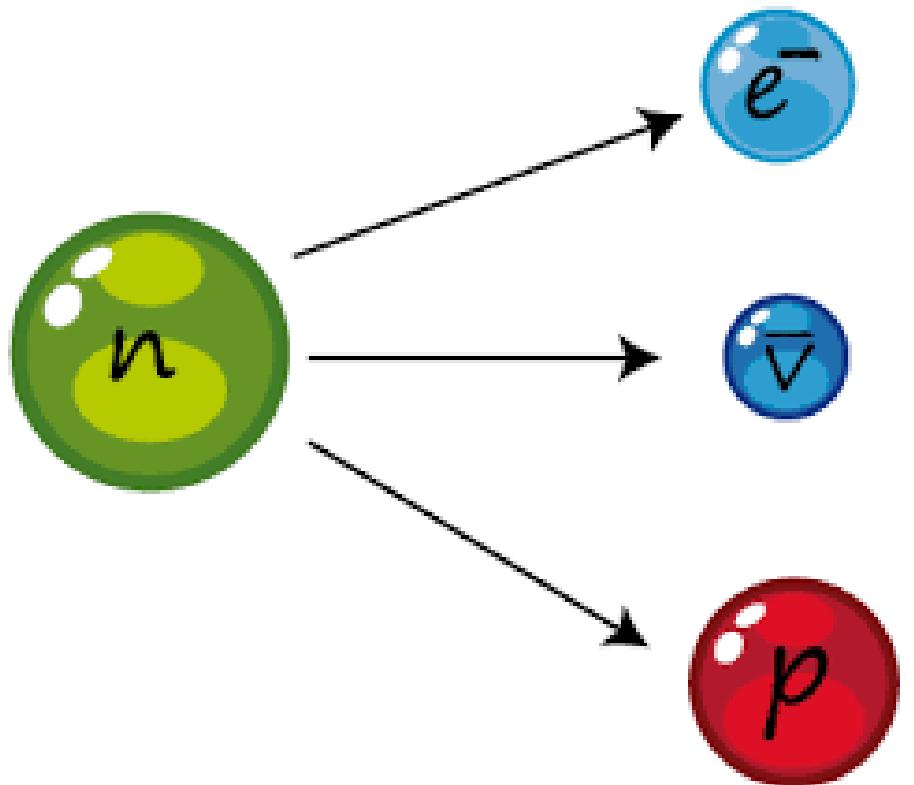
La Interacción Fuerte

Con lo que el núcleo atómico tiene mas bien esta pinta...



La Interacción Débil

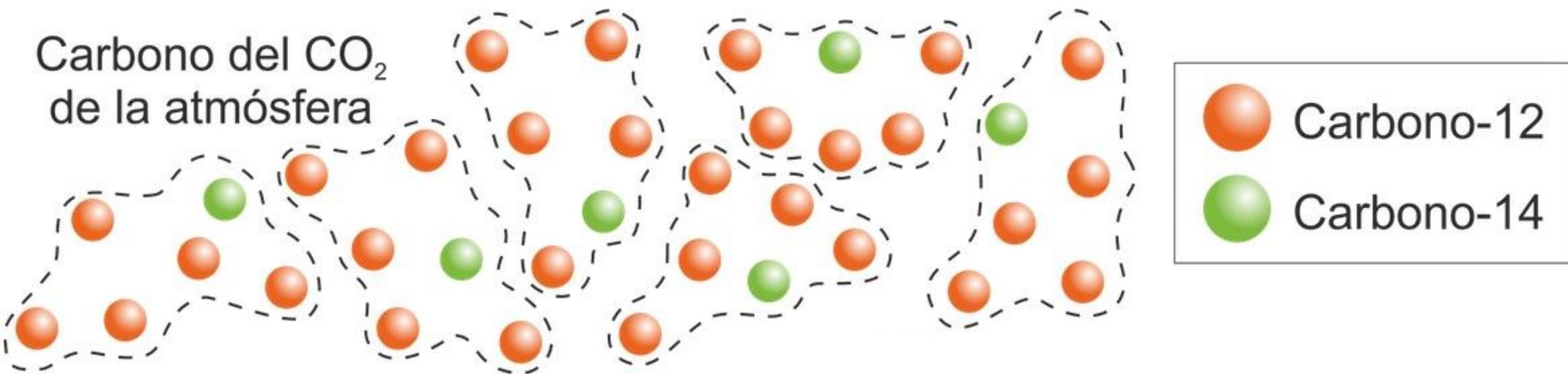
Finalmente, la fuerza débil es la que se encarga de las desintegraciones nucleares:



La Interacción Débil

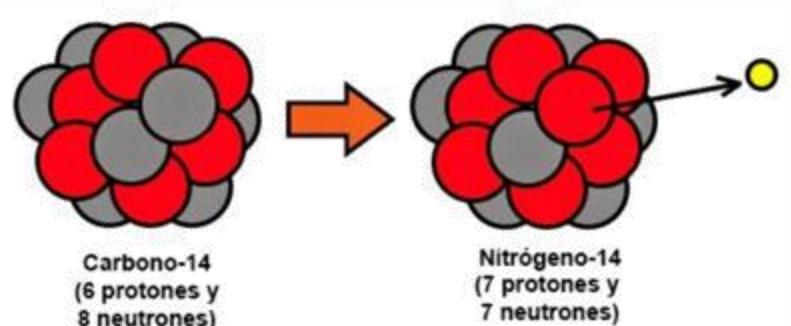
Gracias a ella podemos hacer la prueba del carbono 14!

Cuando respiramos, absorbemos una proporción constante entre carbono 12 ($6p+6n$ el normal!) y carbono 14 ($6p+8n$)



La Interacción Débil

Pero al dejar de respirar, el carbono 14 se desintegra para dejar lugar al Nitrógeno 14 ($7p+7n$)



De este modo, midiendo la proporción entre Carbono 12 y Carbono 14, podemos medir cuánto tiempo un organismo lleva muerto

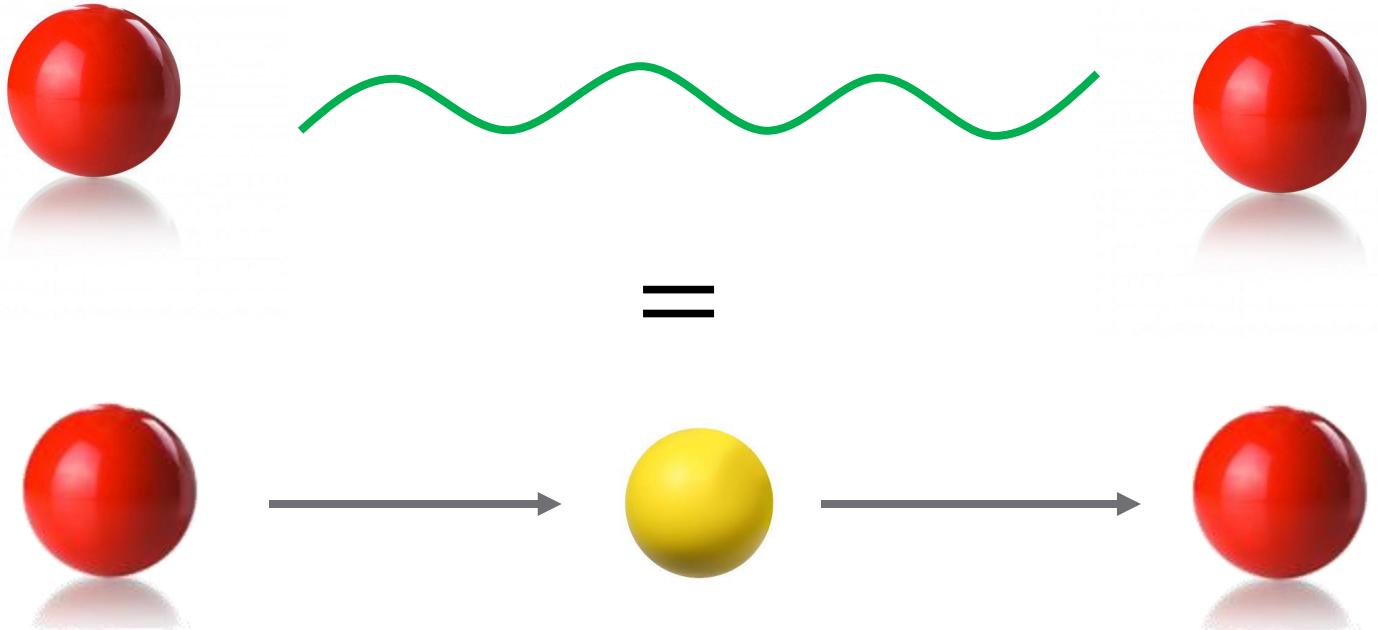




Las interacciones como partículas

Pero si todas las fuerzas son distintas, como podemos compararlas?

En física de partículas, describimos a las interacciones, como otras partículas que se intercambian. Cómo si fuese una partida de billar

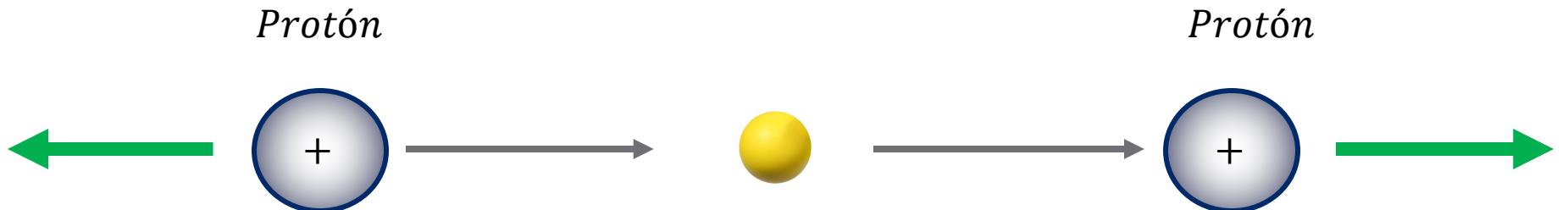


A las partículas encargadas de describir interacciones fundamentales, las llamamos **BOSONES**

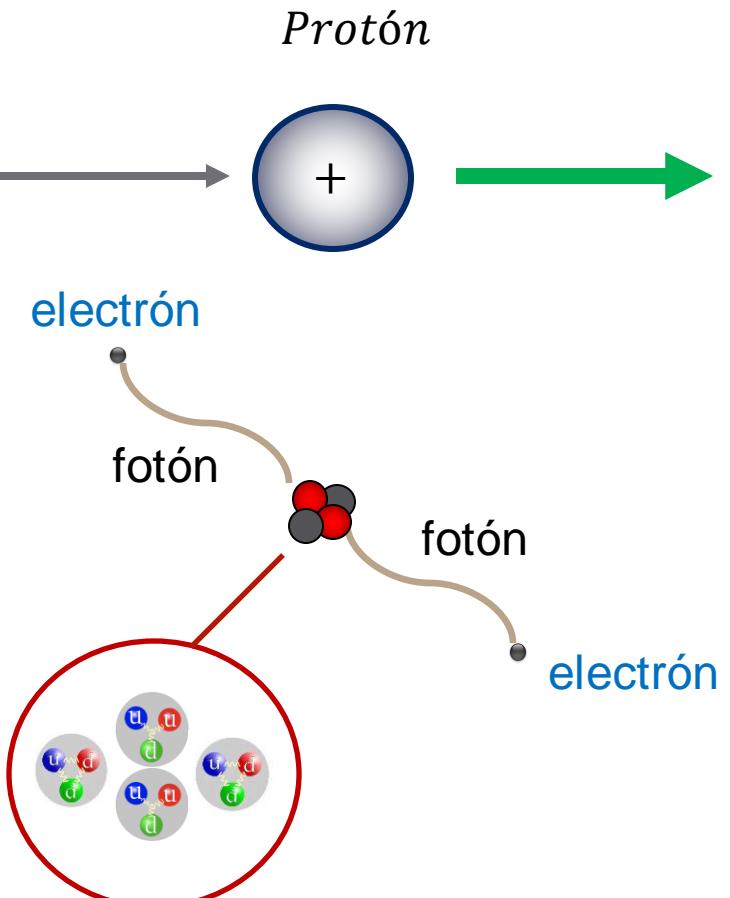


La Interacción Electromagnética (ahora como partícula!)

¡En el caso de la fuerza electromagnética, la partícula de intercambio es el fotón!

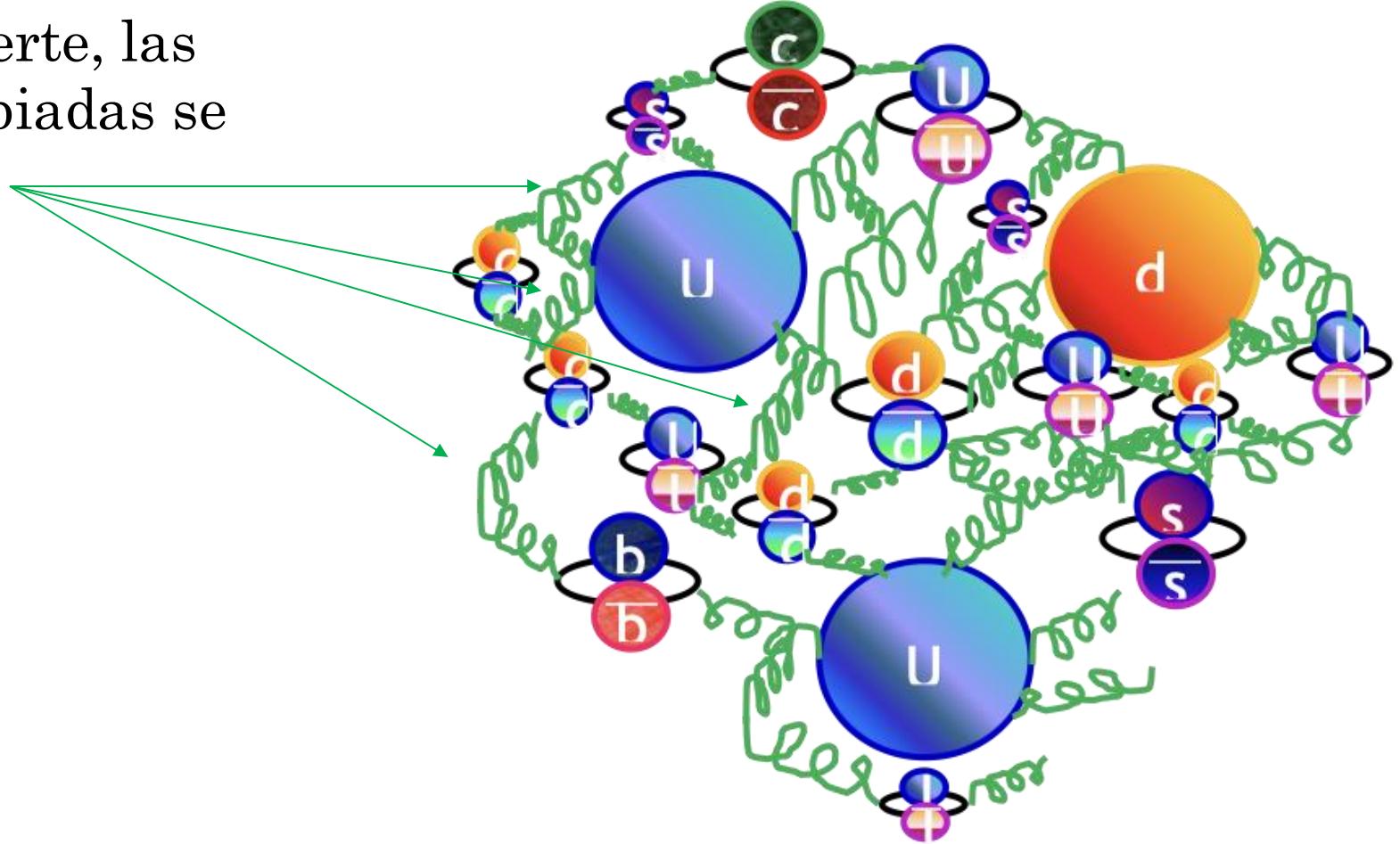


Del mismo modo, en el átomo, los electrones están continuamente intercambiando fotones con el núcleo



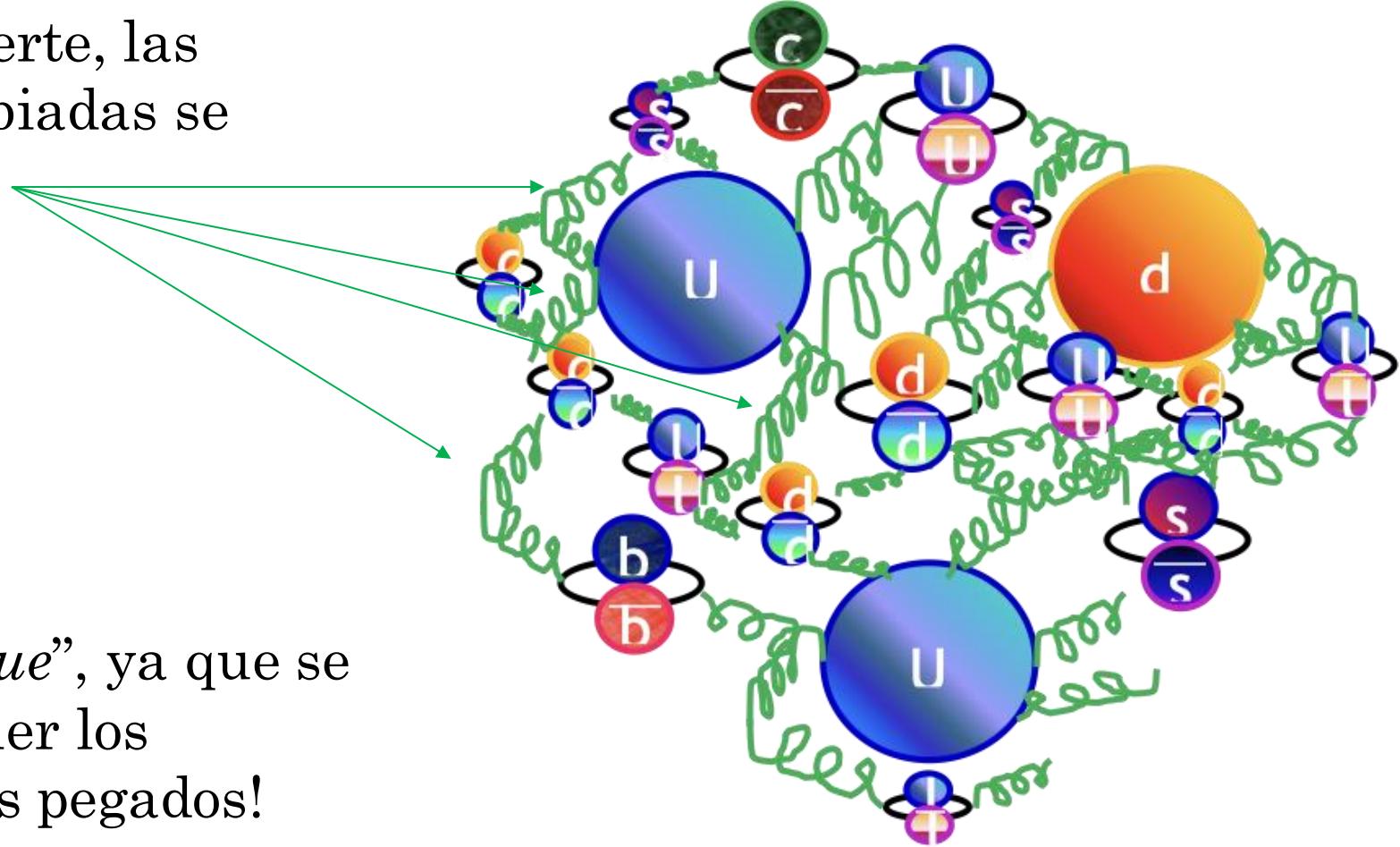
La Interacción Fuerte (ahora como partícula)

En la interacción fuerte, las partículas intercambiadas se llaman **GLUONES**



La Interacción Fuerte (ahora como partícula)

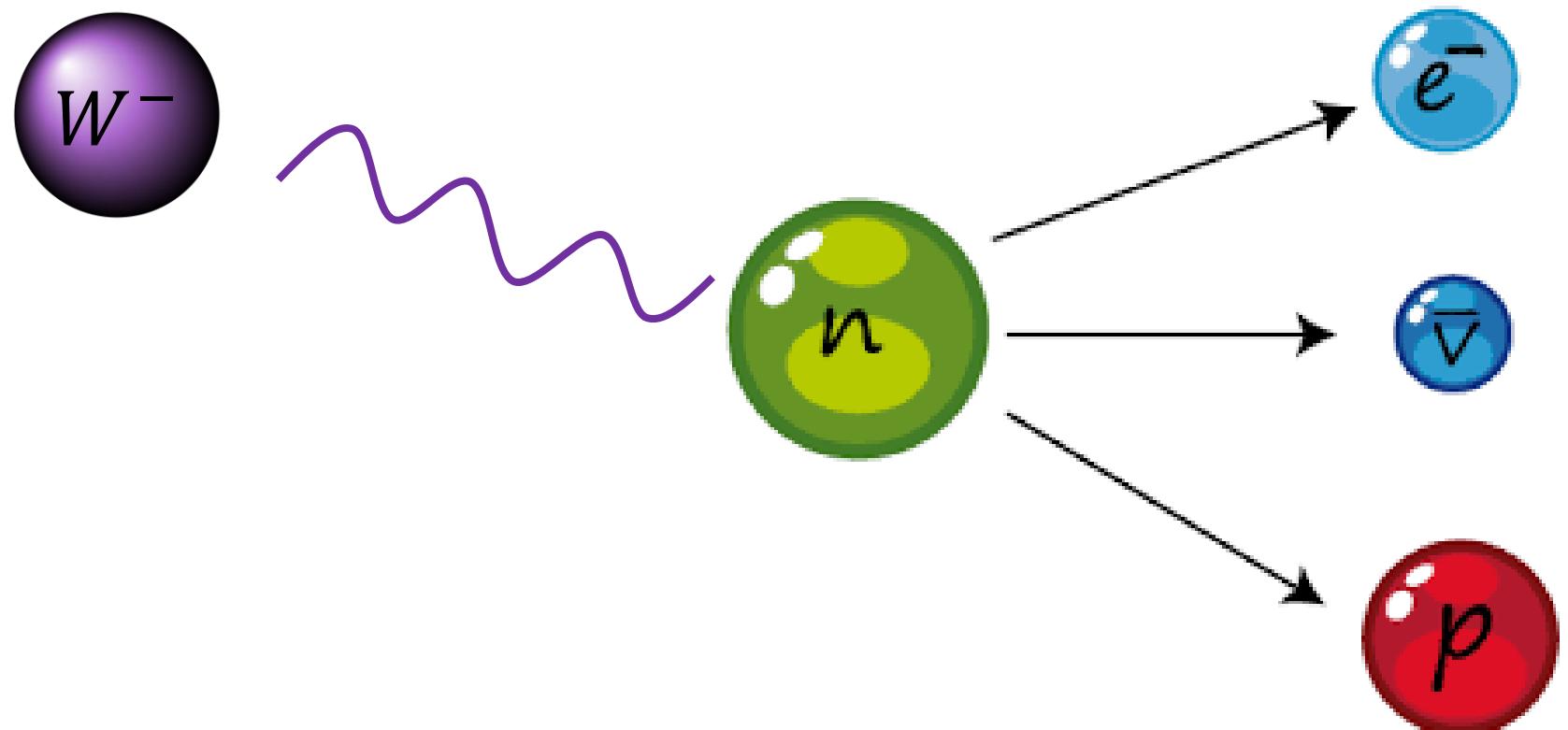
En la interacción fuerte, las partículas intercambiadas se llaman **GLUONES**



Si! gluones como “glue”, ya que se encargan de mantener los protones y neutrones pegados!

La interacción Débil (ahora como partícula!)

Del mismo modo que en las fuerzas anteriores, en la interacción débil las partículas intercambiadas son los bosones **W** y **Z**



Pero cuantas partículas hay!?

Hasta ahora vimos las siguientes partículas:

Quarks

u

d

e

Leptones

Bosones

g

γ

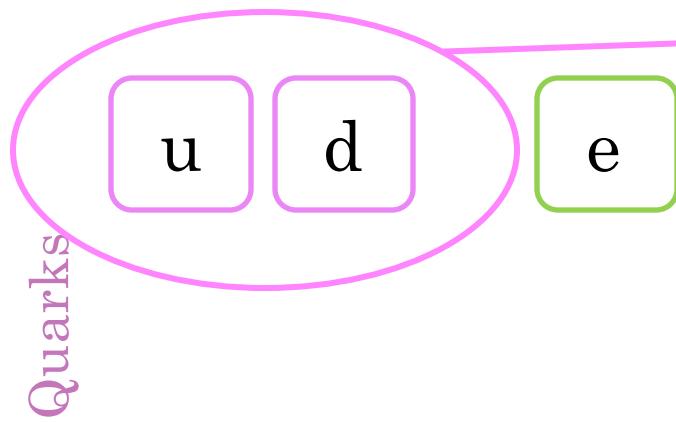
Z

W^\pm

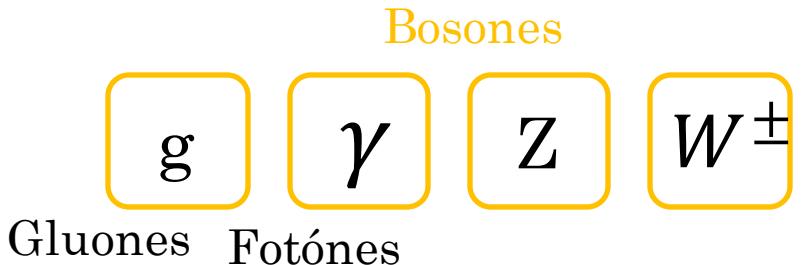


Pero cuantas partículas hay!?

Hasta ahora vimos las siguientes partículas:



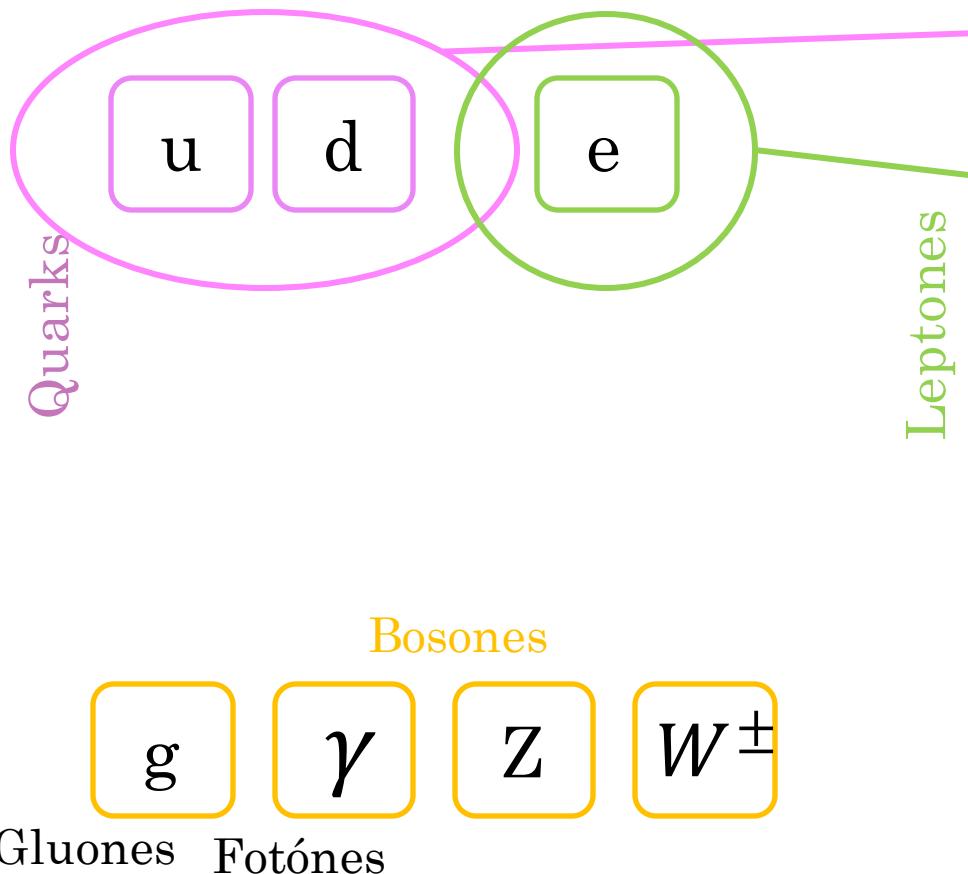
Leptones



Los quarks forman los neutrones y protones en el núcleo del átomo

Pero cuantas partículas hay!?

Hasta ahora vimos las siguientes partículas:

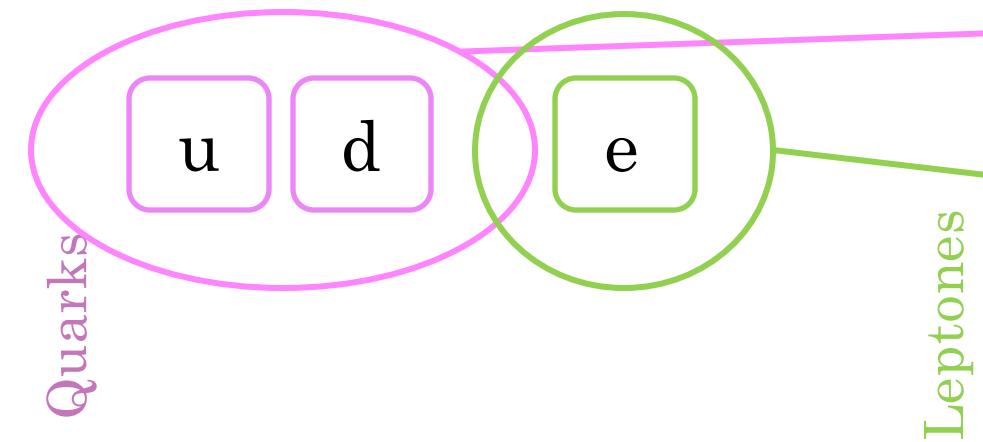


Los quarks forman los neutrones y protones en el núcleo del átomo

Los leptones como el electrón, que giran alrededor del núcleo

Pero cuantas partículas hay!?

Hasta ahora vimos las siguientes partículas:



Los quarks forman los neutrones y protones en el núcleo del átomo

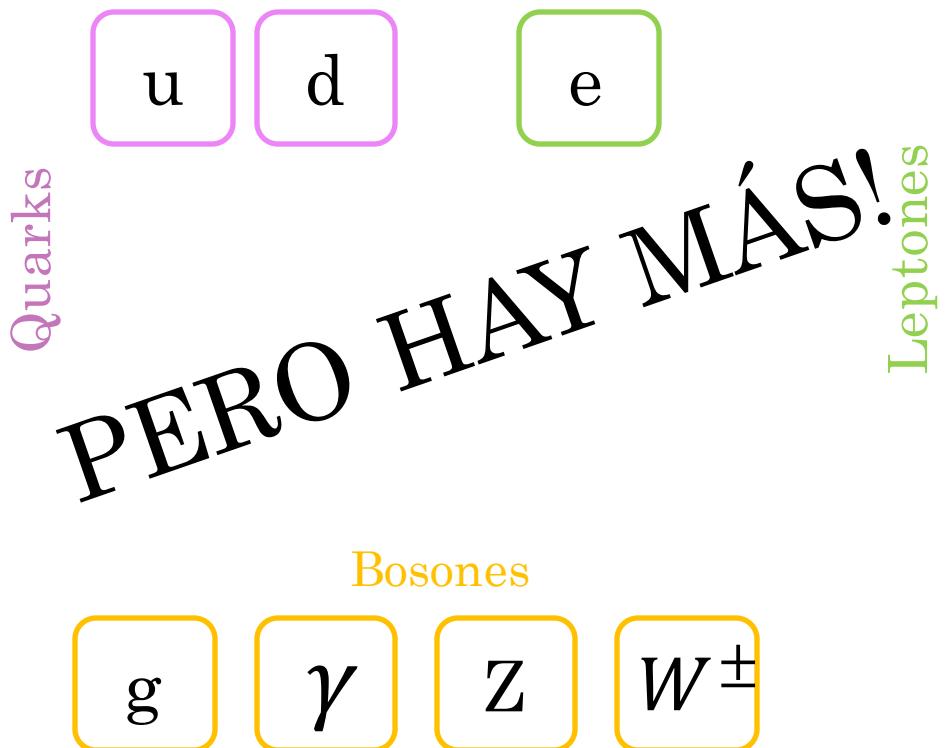
Los leptones como el electrón, que giran alrededor del núcleo

Los Bosones, las partículas de intercambio que describen las interacciones fundamentales



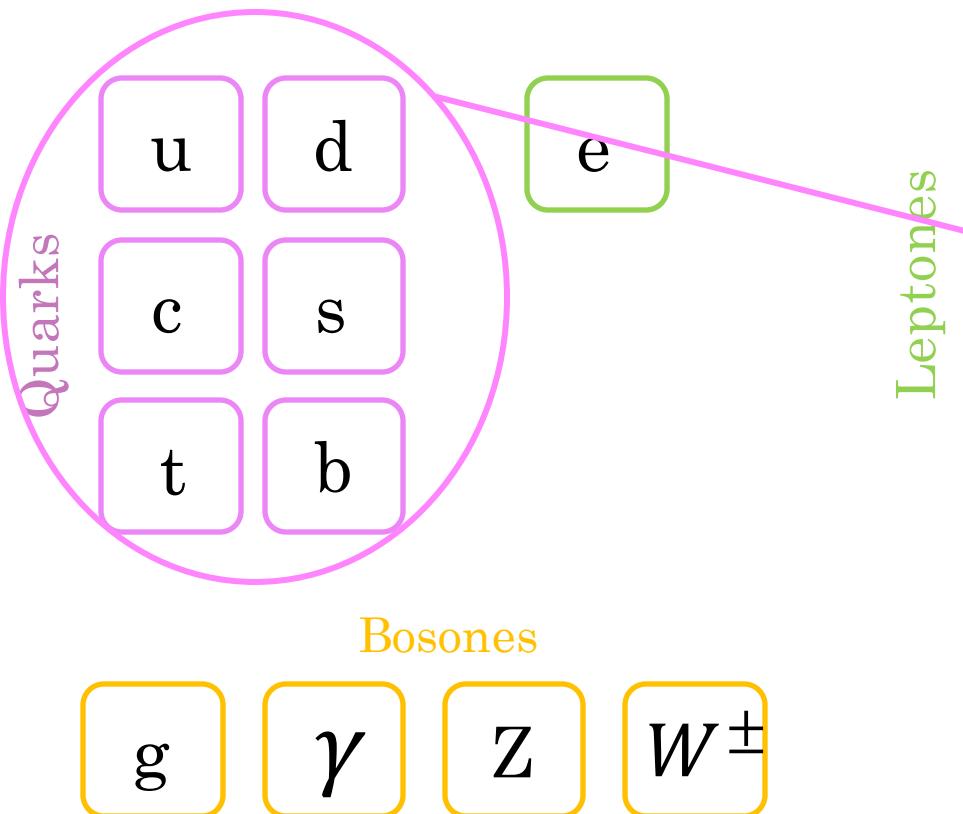
Pero cuantas partículas hay!?

Hasta ahora vimos las siguientes partículas:



Pero cuantas partículas hay!?

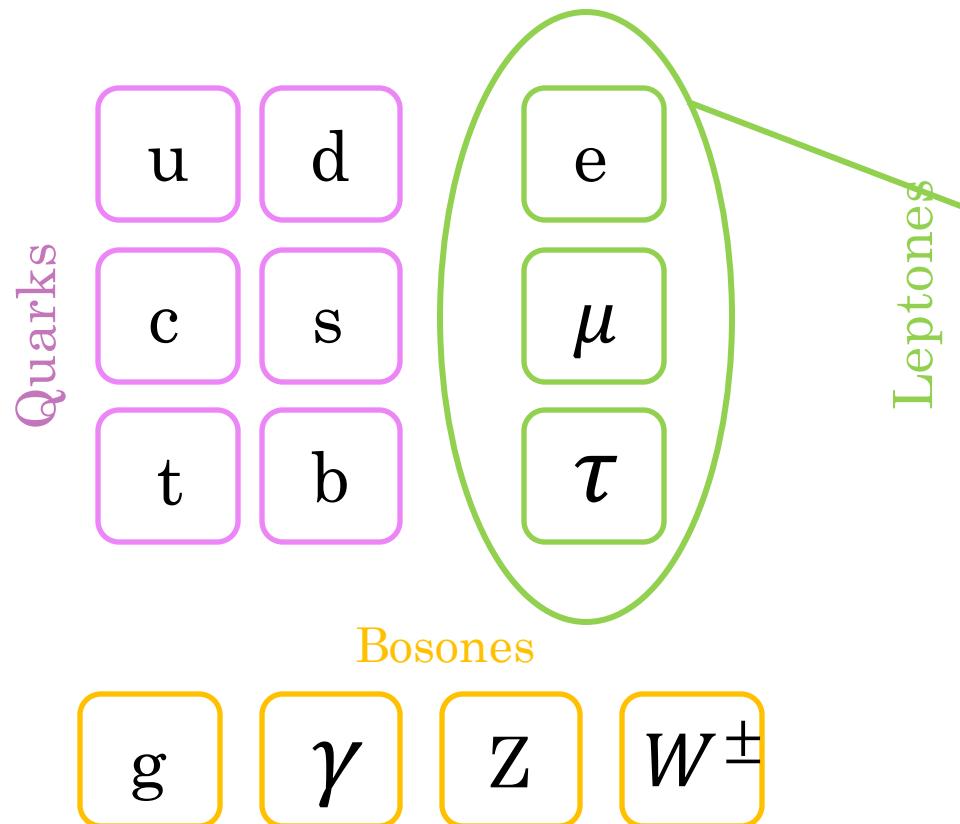
Completando el modelo estándar:



Además de los quarks **u** y **d** (*up* y *down*),
También existen 2 “familias” más de
quarks, los quarks **c** (*charm*) y **s** (*strange*), y
los quarks **t** (*top/truth*)
y **b** (*bottom/beauty*)

Pero cuantas partículas hay!?

Completando el modelo estándar:

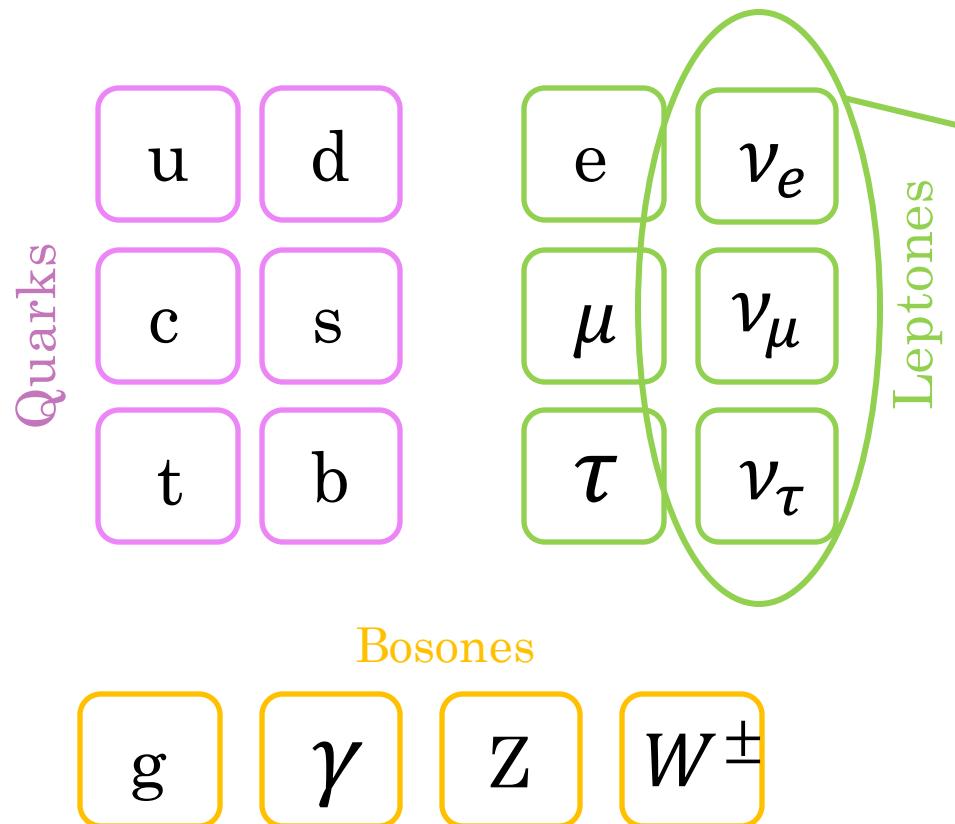


Al igual que con los quarks, también existen dos "familias" más de leptones, los muones (μ) y los tauones (τ).

La única diferencia que existe entre familias es su masa!

Pero cuantas partículas hay!?

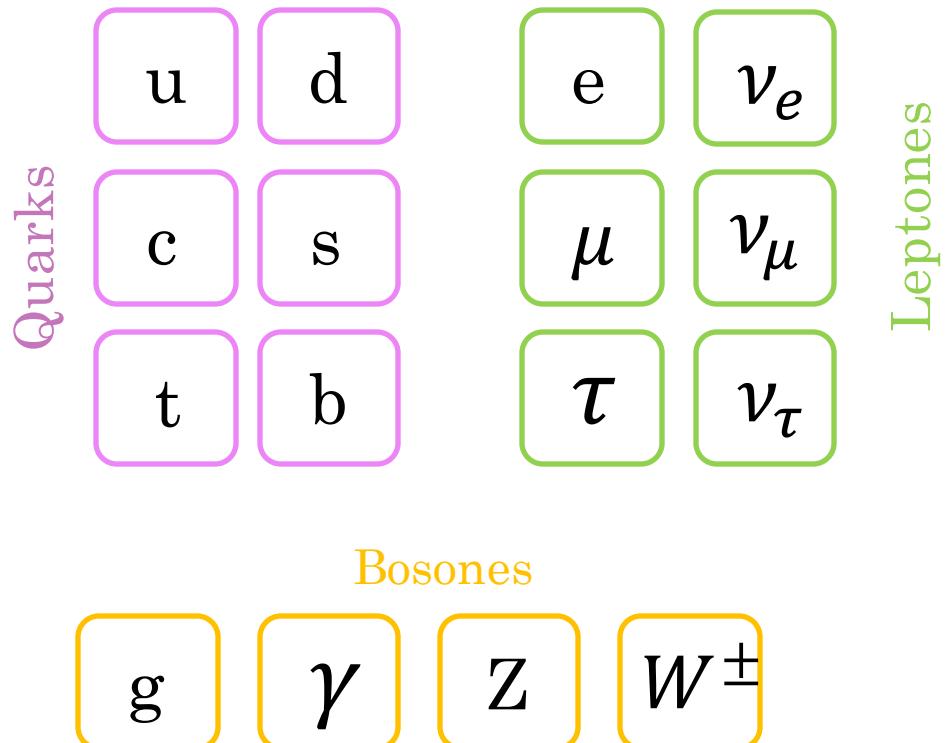
Completando el modelo estándar:



Finalmente los neutrinos, leptones que casi no interactúan con nada, ya que no tienen carga y su masa es increíblemente pequeña!

Pero cuantas partículas hay!?

Completando el modelo estándar:



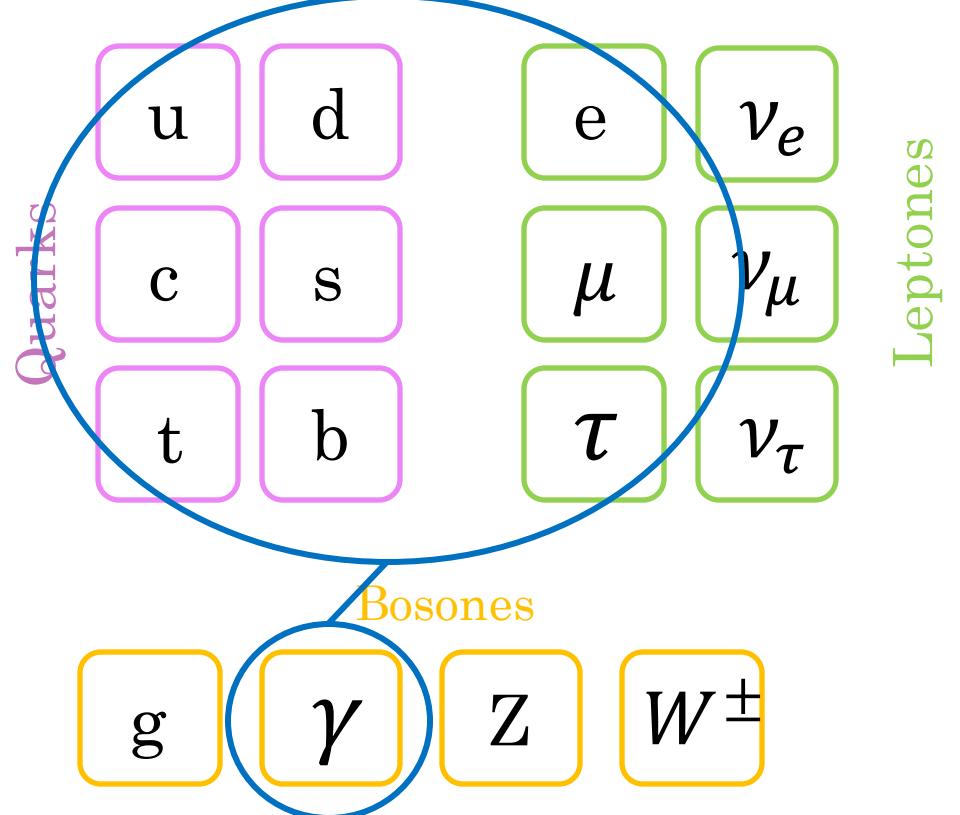
Y todas estas partículas, interactúan entre todas?

Como ya hemos visto antes, cada una de las fuerzas depende de una “propiedad” de la partícula, como por ejemplo la fuerza electromagnética depende de la carga



Pero cuantas partículas hay!?

Completando el modelo estándar:

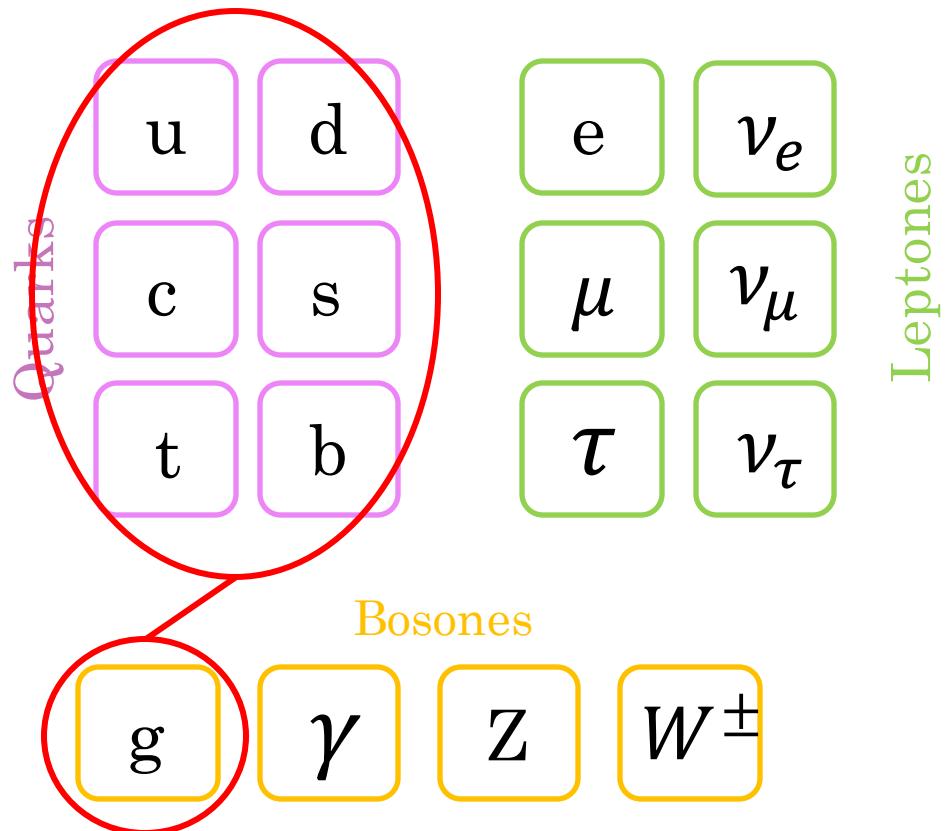


De este modo, el fotón, el encargado de la fuerza electromagnética, solo afecta a las partículas con carga, pero no a los neutrinos!



Pero cuantas partículas hay!?

Completando el modelo estándar:

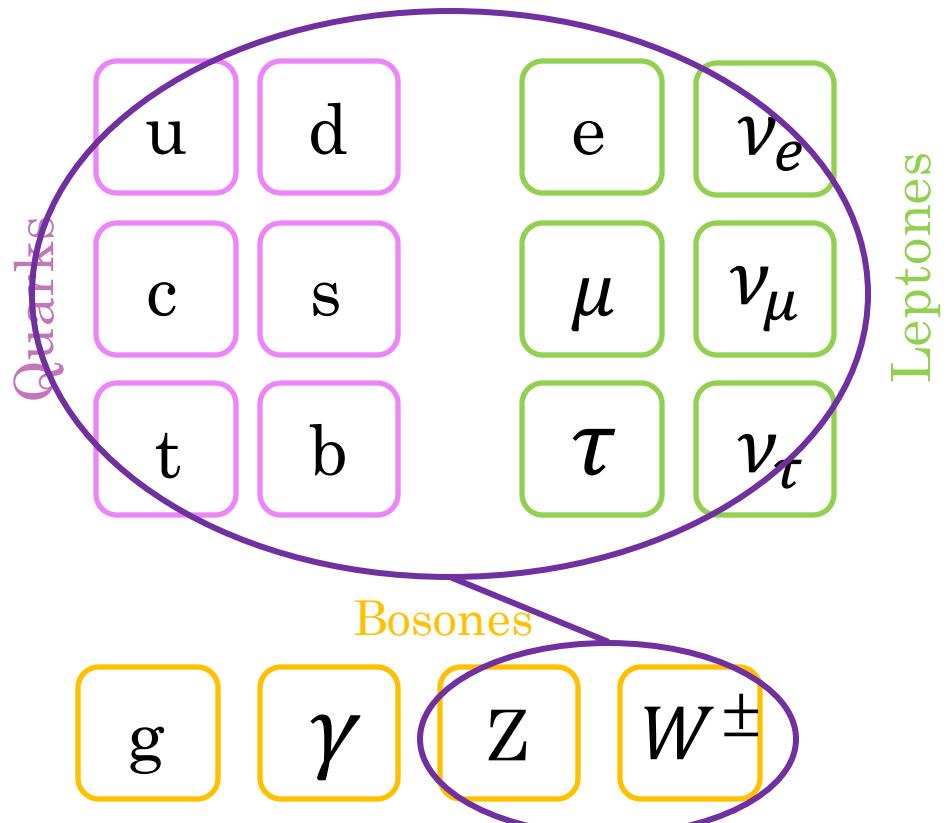


La fuerza fuerte tan solo se encarga de mantener el núcleo unido, con lo que solo afecta a los quarks



Pero cuantas partículas hay!?

Completando el modelo estándar:

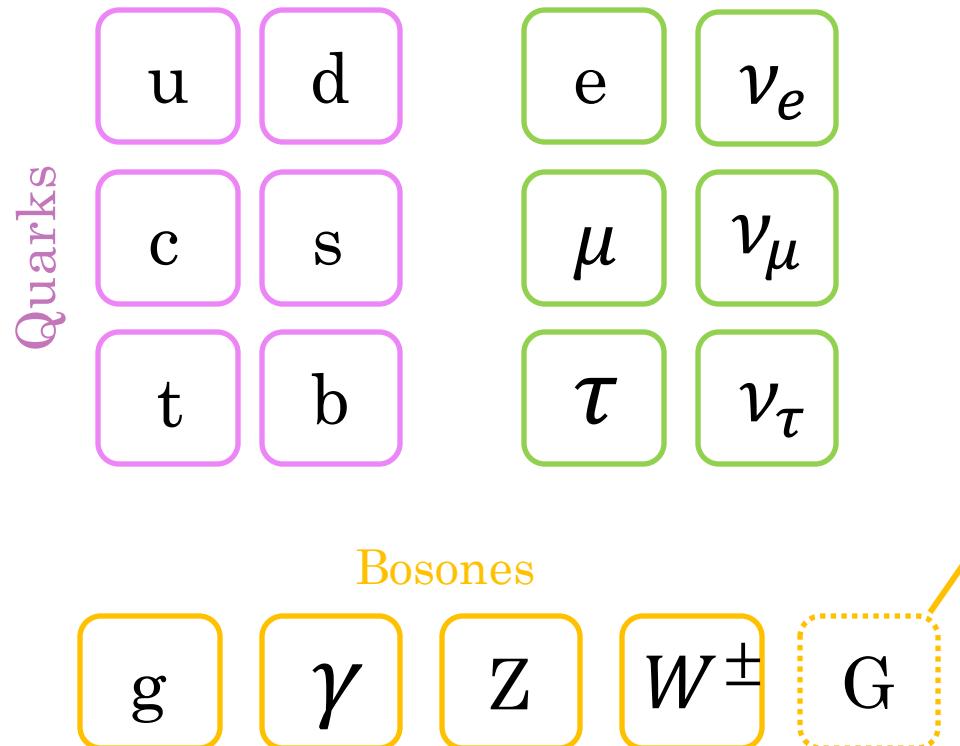


En cambio, la fuerza débil,
afecta a todas las
partículas!



Pero cuantas partículas hay!?

Completando el modelo estándar:

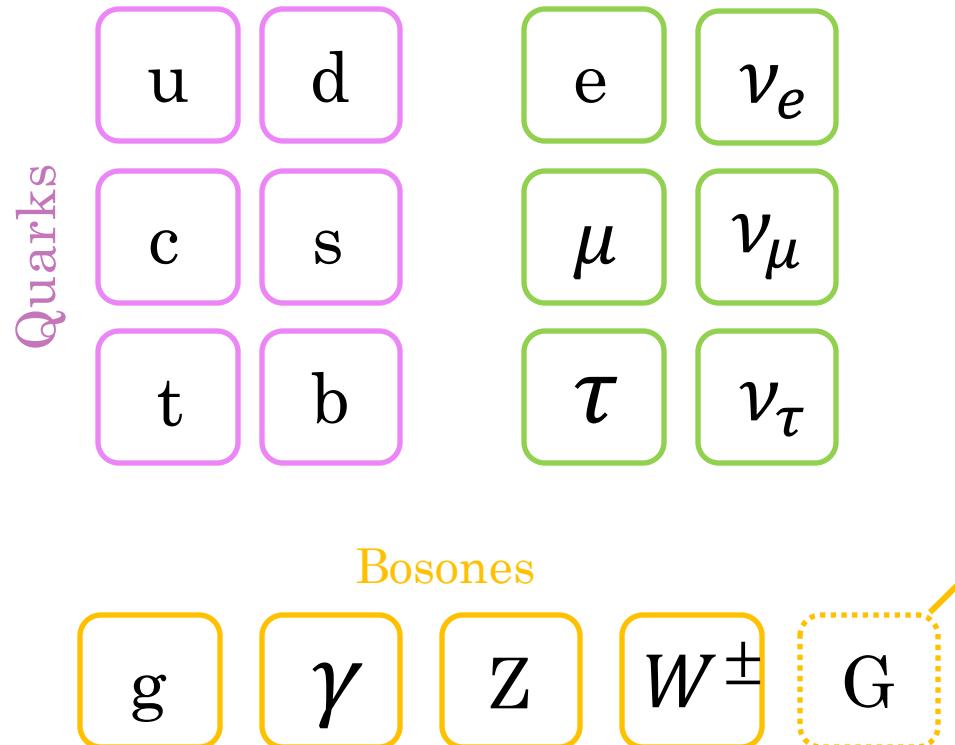


Espera... ¿Y que pasa con la gravedad? ¿No tendría que tener su propio bosón?



Pero cuantas partículas hay!?

Completando el modelo estándar:

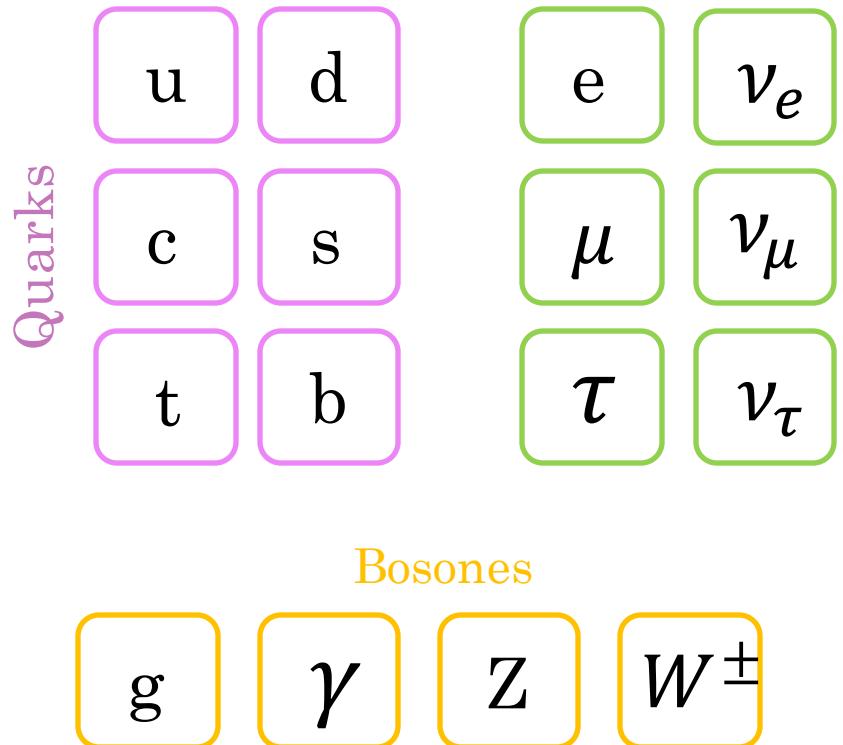


El problema es que las partículas elementales casi no interactúan con la gravedad, ya que tienen una masa minúscula, ¡así que el gravitón aun esta por encontrar!



Pero cuantas partículas hay!?

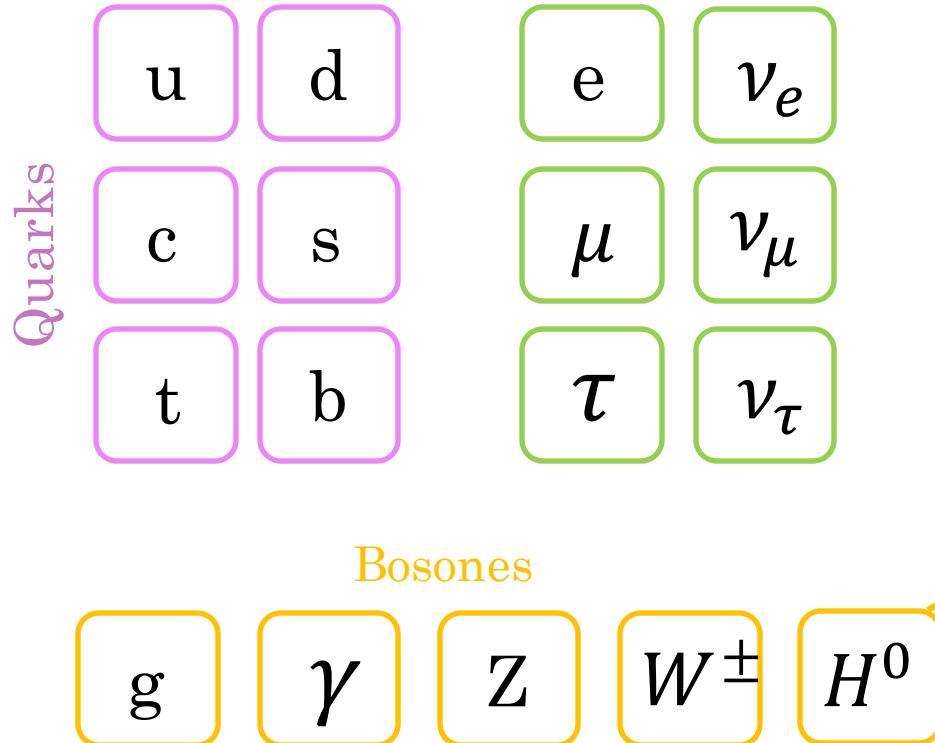
Completando el modelo estándar:



Entonces... ya están todas?

Pero cuantas partículas hay!?

Completando el modelo estándar:



No! Falta una! El
boson de Higgs!

El Bosón de Higgs

Pero si no hay mas fuerzas... que es el bosón de Higgs?

Para entenderlo, tenemos que ver a las partículas desde el punto de vista de la física cuántica...

En física cuántica describimos a las partículas y sus interacciones como campos

Campo



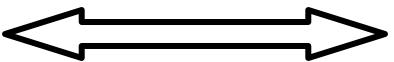
Partícula



El Bosón de Higgs

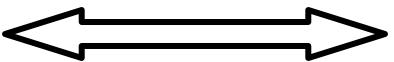
Por ejemplo en el caso de la interacción electromagnética, Podemos describir la interacción en un electron como una collision con un fotón o como la interacción con un campo electrico

Campo



Partícula

Campo electromagnético

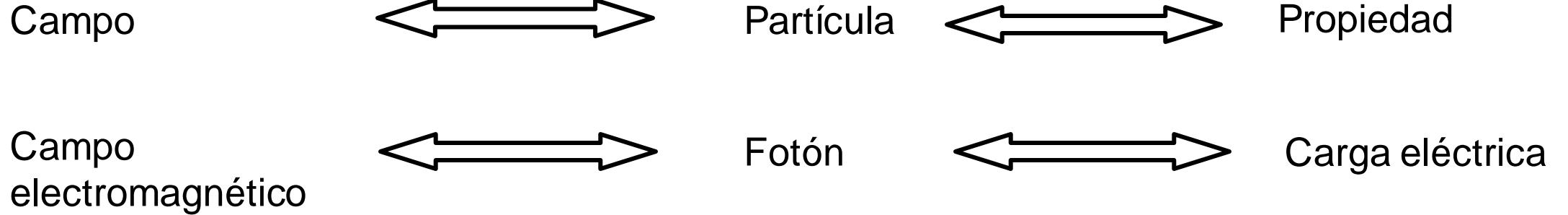


Fotón



El Bosón de Higgs

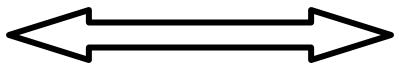
A su vez, cada interacción, esta asociada a una propiedad de la partícula, en el caso de la interacción electromagnética, la carga



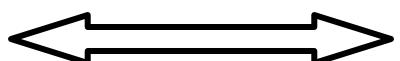
El Bosón de Higgs

En el caso del Higgs, la propiedad asociada a su campo es LA **MASA!** Es decir como mas grande sea la interacción con el campo de Higgs, mas grande será su masa!

Campo



Partícula



Propiedad

Campo
electromagnético

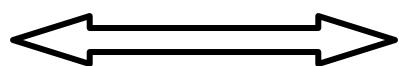


Fotón

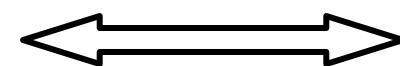


Carga eléctrica

Campo
de Higgs



Bosón de
Higgs

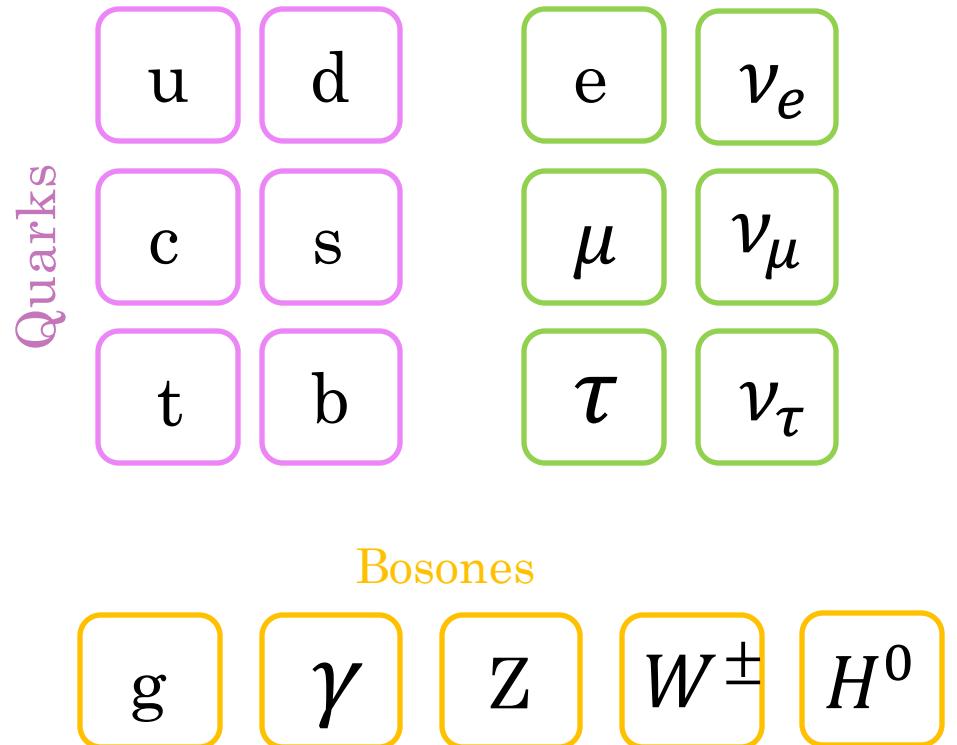


Masa



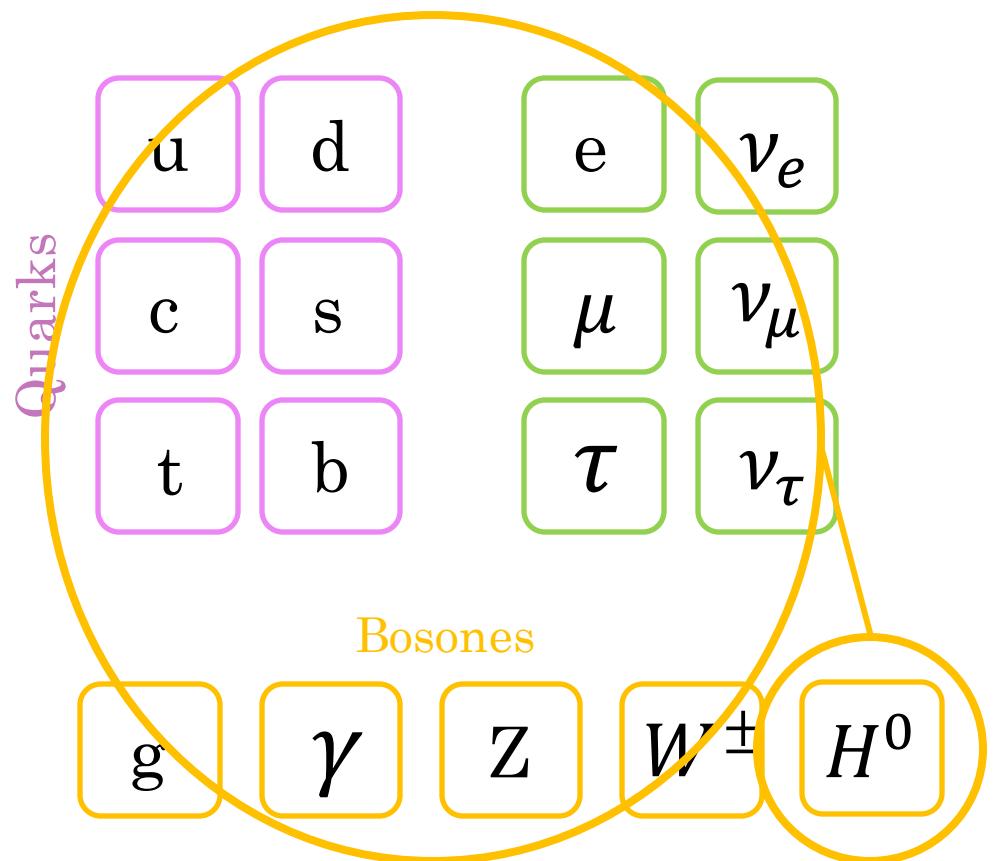
EL MODELO ESTÁNDAR

Completando el modelo estándar:



EL MODELO ESTÁNDAR

Completando el modelo estándar:

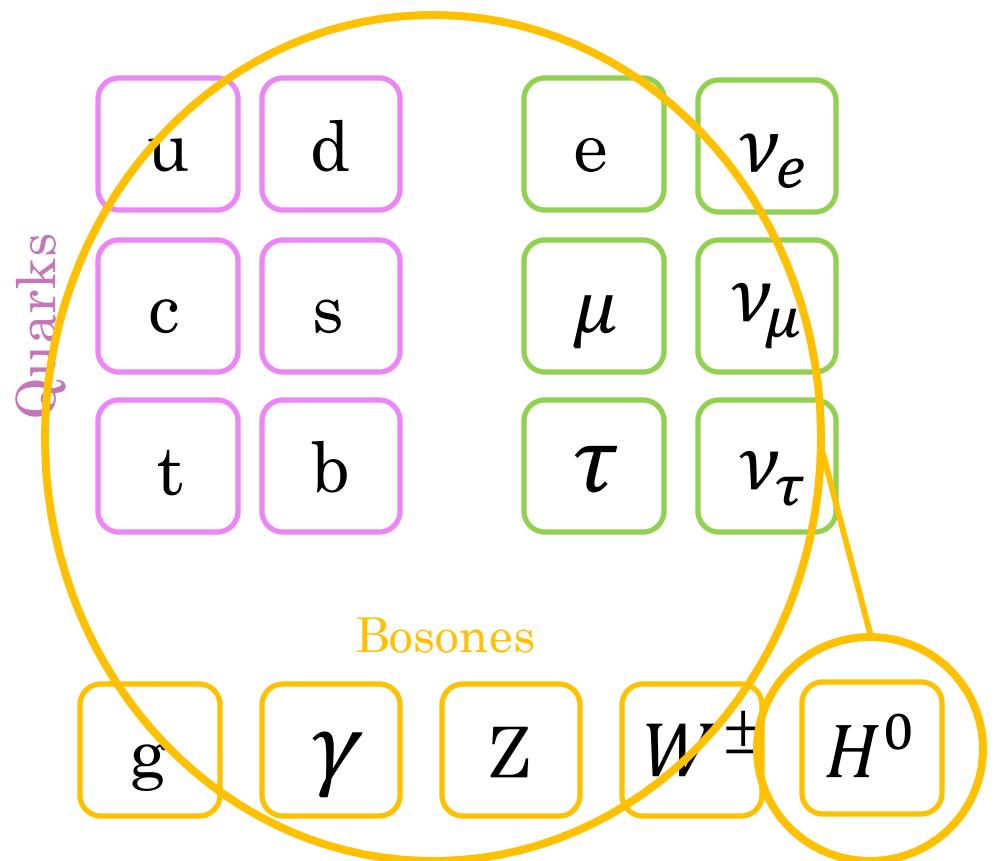


Pero el bosón de Higgs, no interactúa solo con las partículas que constituyen la materia, sino también con otros bosones, que significa eso!?

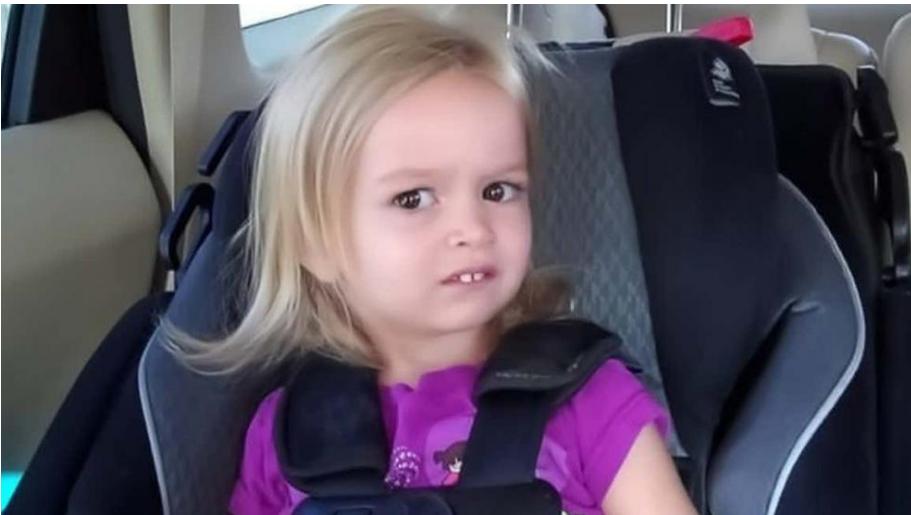


EL MODELO ESTÁNDAR

Completando el modelo estándar:

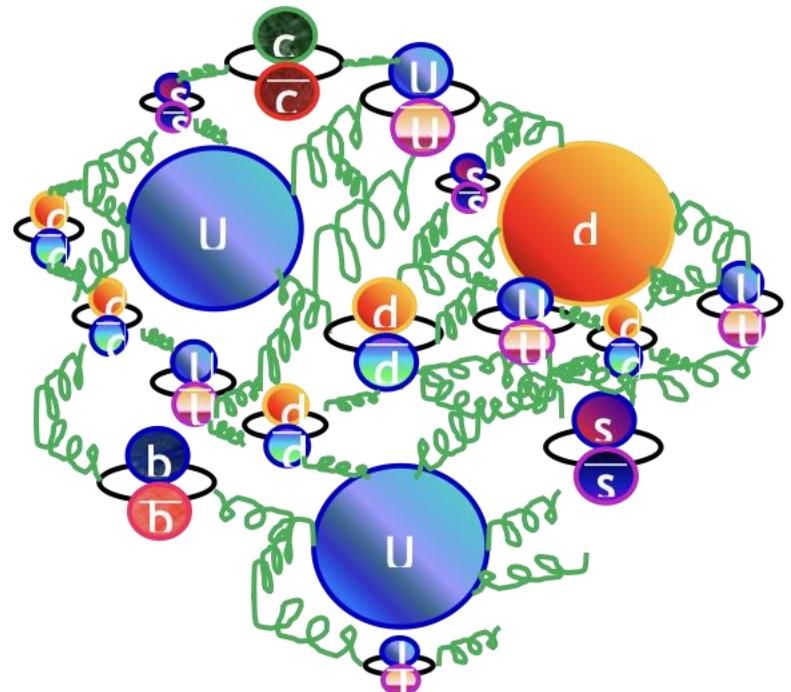


Pues si los otros bosones
describen interacciones... que
la fuerzas también tienen
masa!



EL MODELO ESTÁNDAR

Completando el modelo estándar:

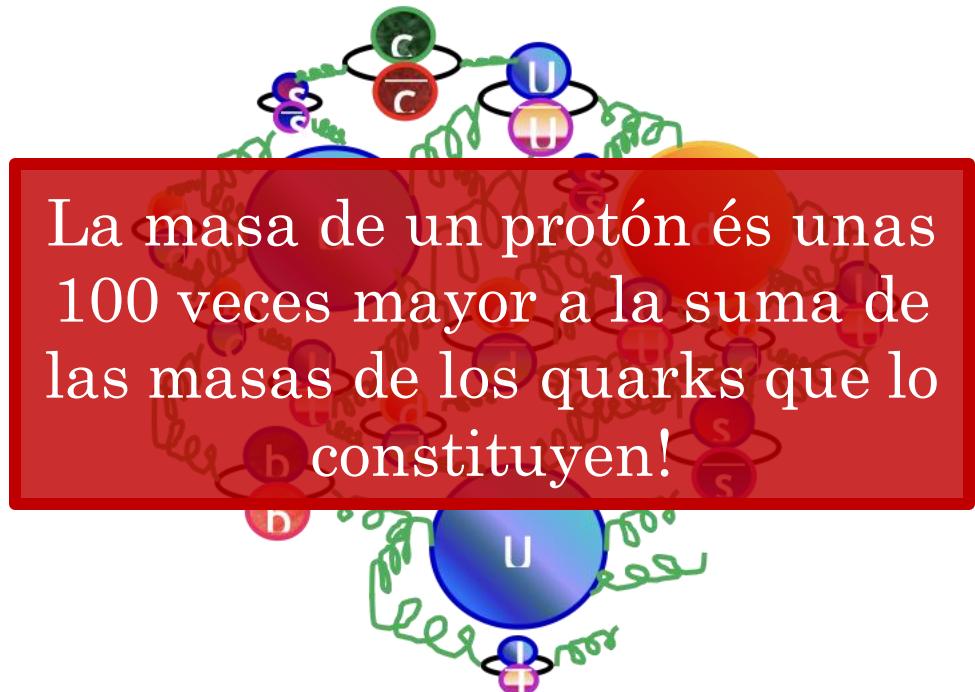


Es decir que la mas de un protón, no esta dada solo por las masa de los quarks que lo forman, pero también por sus interacciones.



EL MODELO ESTÁNDAR

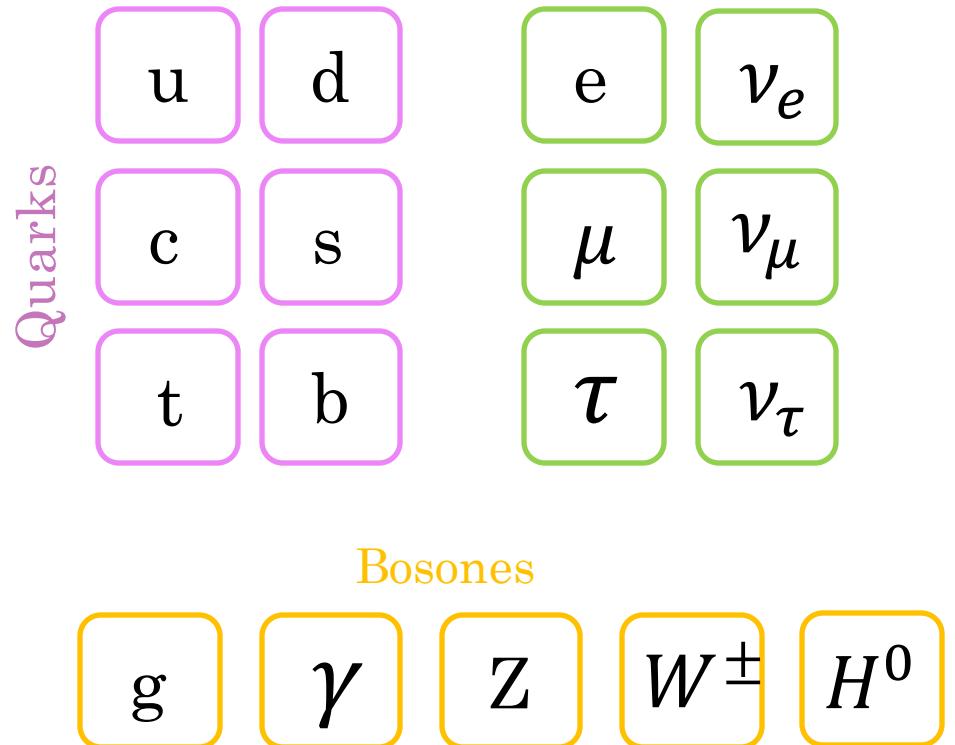
Completando el modelo estándar:



Es decir que la mas de un protón, no está dada solo por la masa de los quarks que lo forman, pero también por sus interacciones.

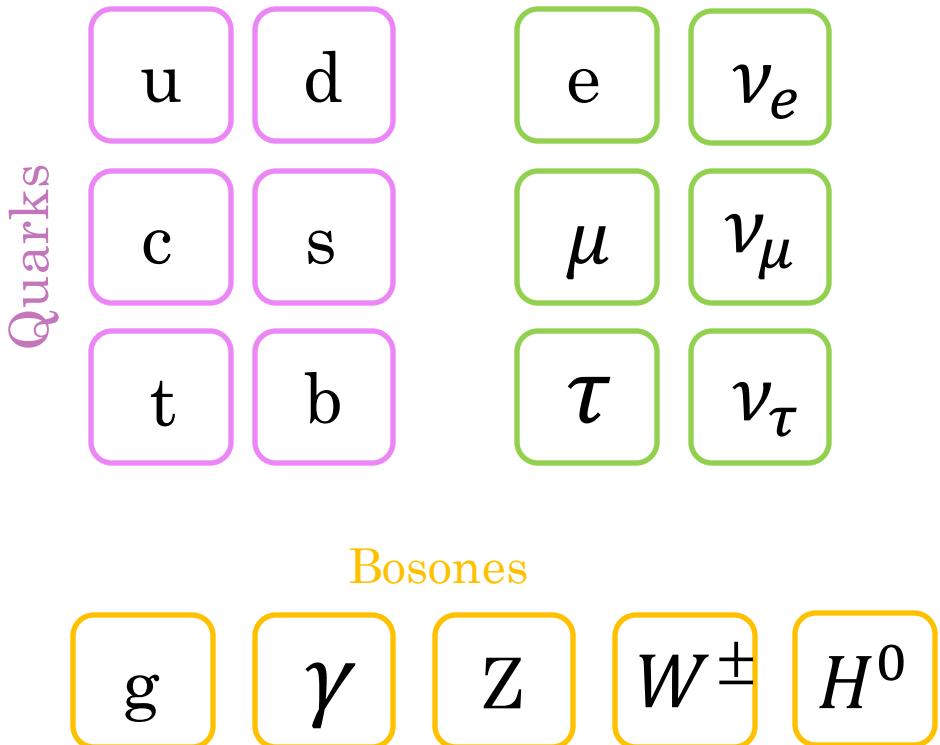
EL MODELO ESTÁNDAR

Ahora si que lo temenos todo!



EL MODELO ESTÁNDAR

Ahora si que lo tenemos todo, aunque en la realidad... no es tan sencillo...



$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{SM} = & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\mu^a g_\mu^b g_\mu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\nu^d g_\nu^e - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - ig c_w (\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+) - \\
 & i g s_w (\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)) - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- + \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^+ W_\mu^- W_\nu^- + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - \\
 & Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\nu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\nu W_\nu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w c_w (A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - 2 A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-) - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - 2M^2 \alpha_h H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \\
 & \beta_h \left(\frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right) + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - \\
 & g \alpha_h M (H^3 + H \phi^0 \phi^0 + 2H \phi^+ \phi^-) - \\
 & \frac{1}{8}g^2 \alpha_h (H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2) - \\
 & g M W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2}g \frac{M}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H - \\
 & \frac{1}{2}ig (W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)) + \\
 & \frac{1}{2}g (W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) + W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu H)) + \frac{1}{2}g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) + \\
 & M (\frac{1}{c_w} Z_\mu^0 \partial_\mu \phi^0 + W_\mu^+ \partial_\mu \phi^- + W_\mu^- \partial_\mu \phi^+) - ig \frac{s_w^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + i g s_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - \\
 & W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + i g s_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \\
 & \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- (H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-) - \frac{1}{8}g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 Z_\mu^0 (H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-) - \\
 & \frac{1}{2}g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - \\
 & g^2 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- + \frac{1}{2}ig s_w \lambda_{ij}^a (\bar{q}_j^\sigma \gamma^\mu q_j^\sigma) g_a^\alpha - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + m_\lambda^\alpha) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda (\gamma \partial + m_\nu^\lambda) \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma \partial + \\
 & m_u^\lambda) u_j^\lambda - \bar{d}_j^\lambda (\gamma \partial + m_d^\lambda) d_j^\lambda + ig s_w A_\mu ((-\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{1}{3}(\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda)) + \\
 & \frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 ((\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5) d_j^\lambda) + \\
 & (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 + \gamma^5) u_j^\lambda)) + \frac{ig}{\sqrt{2}} W_\mu^+ ((\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) U^{lep}{}_{\lambda\kappa} e^\kappa) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d_j^\kappa)) + \\
 & \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- \left((\bar{e}^\kappa U^{lep}{}_{\kappa\lambda} \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda C_{\kappa\lambda}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda) \right) + \\
 & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-m_e^\kappa (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) e^\kappa) + m_\nu^\lambda (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) e^\kappa) + \\
 & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- (m_e^\kappa (\bar{e}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) \nu^\kappa) - m_\nu^\lambda (\bar{e}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) \nu^\kappa)) - \frac{g m_\lambda^\lambda}{2M} H (\bar{\nu}^\lambda \nu^\lambda) - \\
 & \frac{g m_\lambda^\lambda}{2M} H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + \frac{ig m_\lambda^\lambda}{2M} \phi^0 (\bar{\nu}^\lambda \gamma^5 \nu^\lambda) - \frac{ig m_\lambda^\lambda}{2M} \phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda) - \frac{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M_{\lambda\kappa}^R (1 - \gamma_5) \bar{\nu}_\kappa - \\
 & \frac{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M_{\lambda\kappa}^R (1 - \gamma_5) \bar{\nu}_\kappa + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-m_d^\kappa \bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) d_j^\kappa) + m_u^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d_j^\kappa) + \\
 & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- (m_d^\kappa (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\kappa) - m_u^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \gamma^5) u_j^\kappa)) - \frac{g m_\lambda^\lambda}{2M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \\
 & \frac{g m_\lambda^\lambda}{2M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig m_\lambda^\lambda}{2M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \frac{ig m_\lambda^\lambda}{2M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G^b g_\mu^c + \\
 & \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + ig c_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig s_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + ig c_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + ig s_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \partial_\mu \bar{Y} X^+) + ig c_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + ig s_w A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2}g M \left(\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w^2} \bar{X}^0 X^0 H \right) + \frac{1-2c_w^2}{2c_w} ig M (\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-) + \\
 & \frac{1}{2c_w} ig M (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + ig M s_w (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + \\
 & \frac{1}{2}ig M (\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0) .
 \end{aligned}$$



Y ahora que...?

¿Si el Higgs es la última pieza del puzzle y se encontró en 2012... que es lo que falta por investigar??

¡Aún quedan muchas preguntas por responder!



Here, at last!

François Englert and Peter W. Higgs are jointly awarded the Nobel Prize in Physics 2013 for the theory of how particles acquire mass. In 1964, they proposed the theory independently of each other [Englert together with his now deceased colleague Robert Brout]. In 2012, their ideas were confirmed by the discovery of a so called Higgs particle at the CERN laboratory outside Geneva in Switzerland.

The awarded mechanism is a central part of the Standard Model of particle physics that describes how the world is constructed. According to the Standard Model, everything, from flowers and people to stars and planets, consists of just a few building blocks: *matter particles*. These particles are governed by forces mediated by *force particles* that make sure everything works as it should.



The entire Standard Model also rests on the existence of a special kind of particle: the Higgs particle. It is connected to an invisible field that fills up all space. Even when our universe seems empty, this field is there. Had it not been there, electrons and quarks would be massless just like photons, the light particles. And like photons they would, just as Einstein's theory predicts, rush through space at the speed of light, without any possibility to get caught in atoms or molecules. Nothing of what we know, nor even we, would exist.

The Higgs particle, H, completes the Standard Model of particle physics that describes building blocks of the universe.

Both François Englert and Peter Higgs were young scientists when they, in 1964, independently of each other put forward a theory that rescued the Standard Model from collapse. Almost half a century later, on Wednesday 4 July 2012, they were both in the audience at the European Laboratory for Particle Physics, CERN, outside Geneva, when the discovery of a Higgs particle that finally confirmed the theory was announced to the world.



The model that created order

The idea that the world can be explained in terms of just a few building blocks is old. Already in 400 BC, the philosopher Democritus postulated that everything consists of atoms — atomos is Greek for indivisible. Today we know that atoms are not indivisible. They consist of electrons that orbit an atomic nucleus made up of neutrons and protons. And neutrons and protons, in turn, consist of smaller particles called quarks. Actually, only electrons and quarks are indivisible according to the Standard Model.

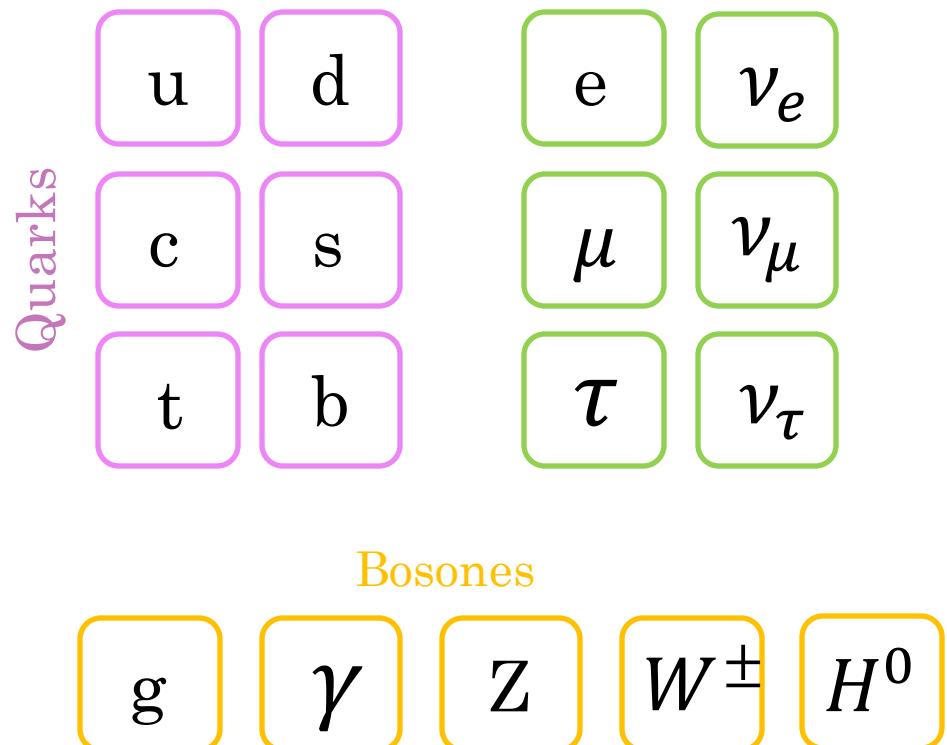
The atomic nucleus consists of two kinds of quarks, up quarks and down quarks. So in fact, three elementary particles are needed for all matter to exist: electrons, up quarks and down quarks. But during the 1950s and 1960s, new particles were unexpectedly observed in both cosmic radiation and at newly constructed accelerators, so the Standard Model had to include these new siblings of electrons and quarks.

Nobel Prize® is a registered trademark of the Nobel Foundation.



EL MODELO ESTÁNDAR

Completando el modelo estándar:



- El Gravitón! Aún no lo hemos encontrado... pero sabemos bien que la gravedad existe!
- Los neutrinos no interactúan con el Higgs, pero tenemos evidencias experimentales de que tienen masa, que pasa con eso?
- Y muchas otras: **Que es la materia oscura, que es la energía oscura, como explicamos la asimetría entre la materia y la anti-materia...**



Gracias por vuestra atención!

Y gracias a Clara Landesa Gómez y Diego Martínez Santos por todo el material para las diapositivas!



Pero y todo esto... como se mide?

