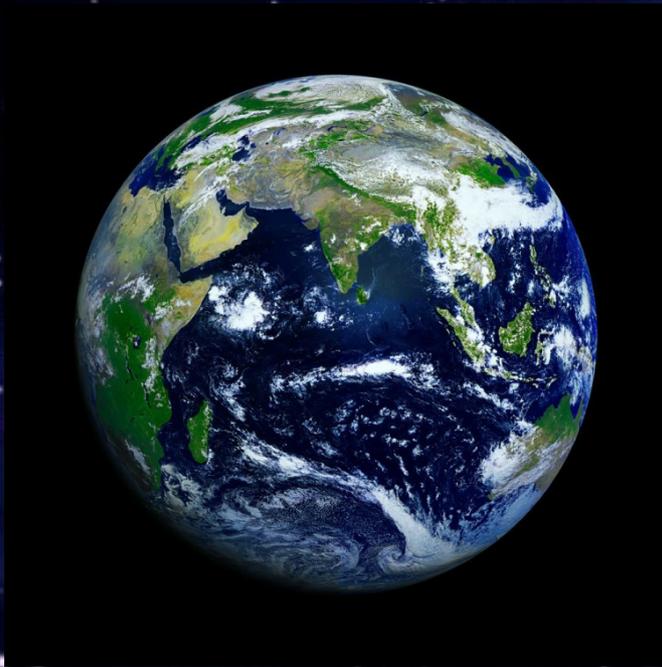


Introduction à la physique des particules

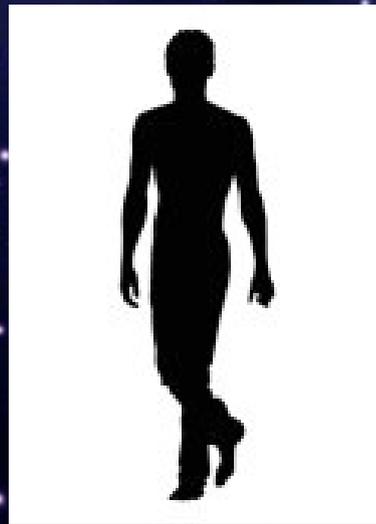
The background of the slide is a complex, abstract visualization of particle physics. It features a dark blue and black space filled with numerous small, glowing particles in shades of blue, green, and yellow. Several prominent, glowing blue and green spheres are scattered throughout, some appearing to be in motion or interacting. The overall effect is a sense of dynamic energy and scientific exploration.

MasterClasses 2019 - Colmar

L'univers est fait de particules



Les planètes



**Les êtres
vivants**



Les atomes

Les particules élémentaires

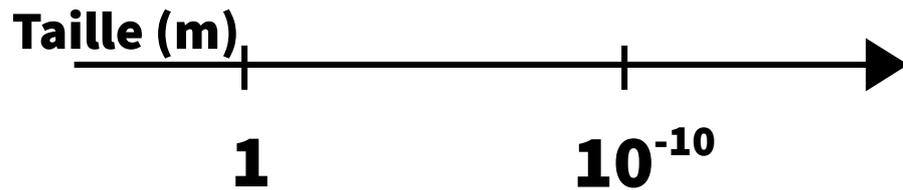
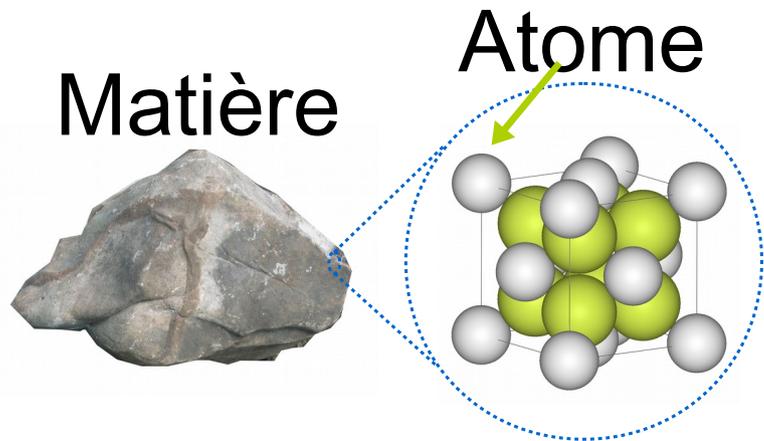
Matière



Taille (m) →
1

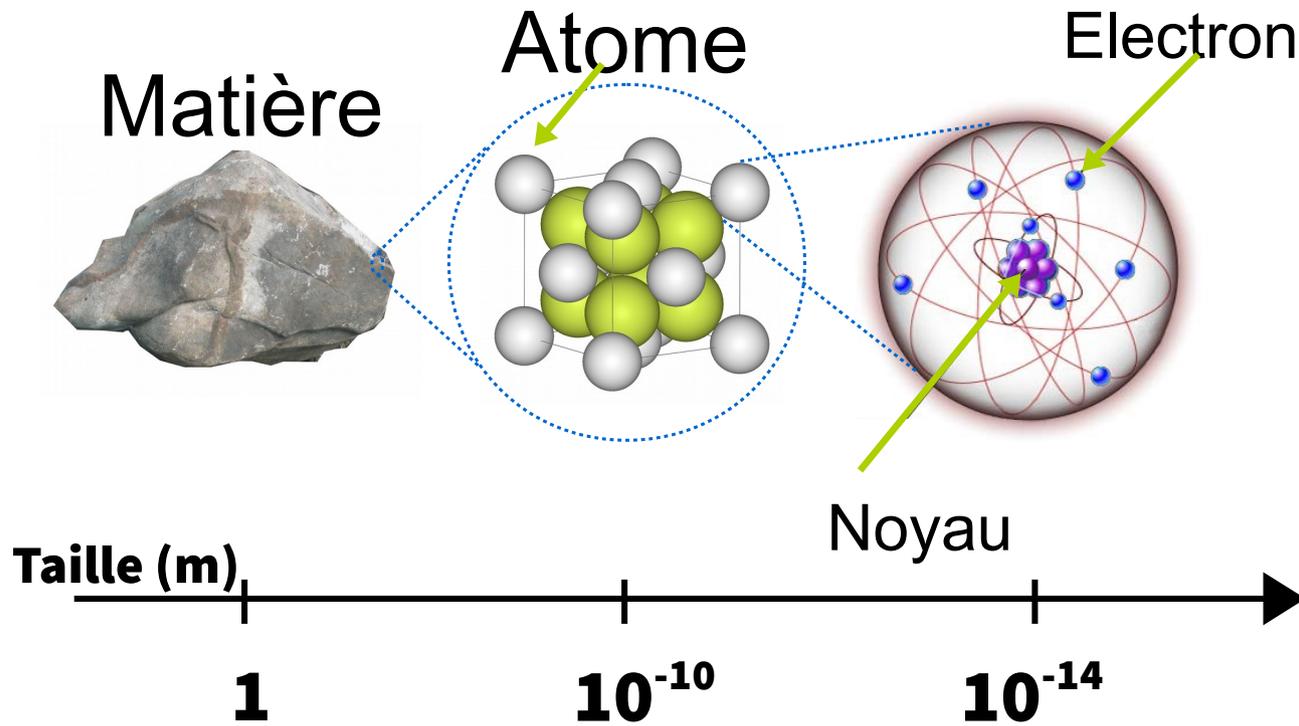
- Des particules **sans sous-structure** !
- Notion qui **varie avec l'époque** et les moyens expérimentaux

Les particules élémentaires



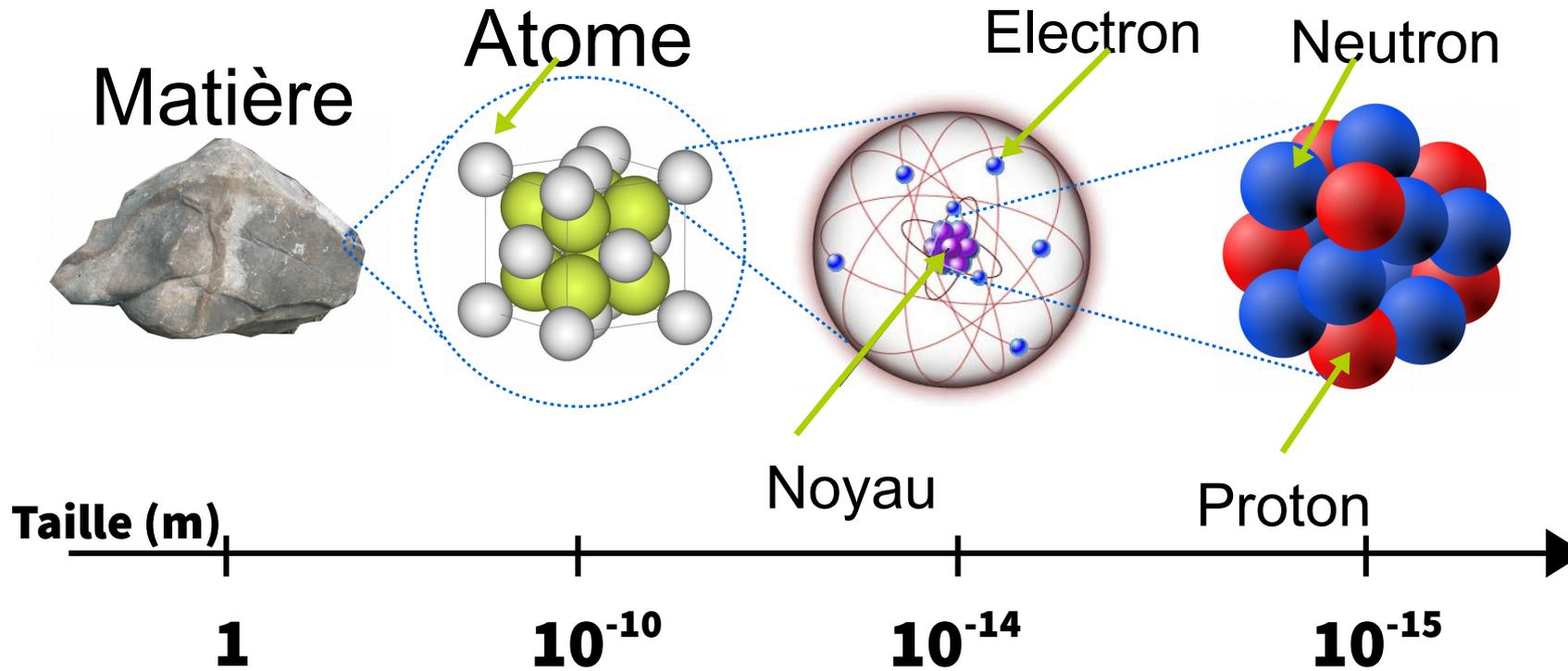
- **Atomes** : notion inventée dès l'antiquité. Composant indivisible de la matière.
- Atomes au sens moderne : XIXe siècle

Les particules élémentaires



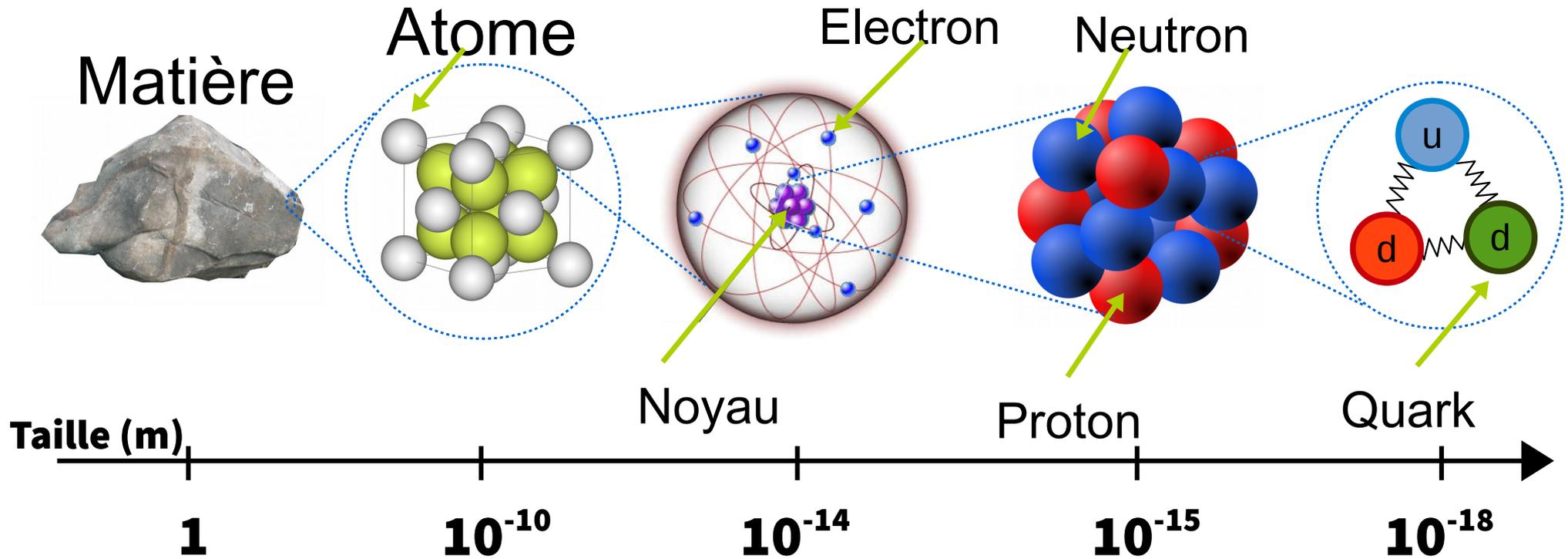
→ Découverte du **noyau et de l'électron** : fin XIXe, début XXe

Les particules élémentaires



→ Les noyaux sont fait de **protons et neutrons** (neutron découvert dans les années 1930)

Les particules élémentaires



→ Les **électrons** et **quarks** (années 1960) sont des particules élémentaires : **sans sous-structure**

→ Masse $\sim 10^{-30}$ kg, taille $< 10^{-18}$ m !

La boîte de base ...

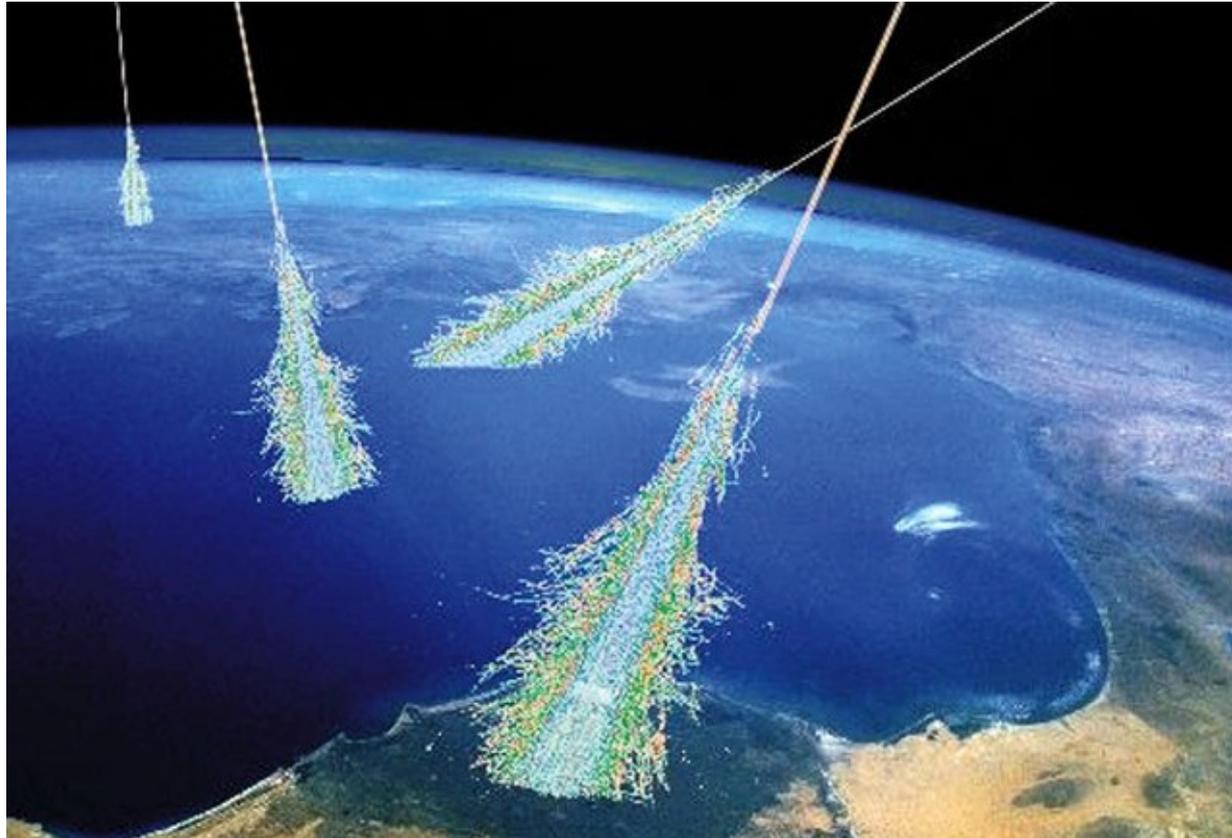


- Quark up (u)
- Quark down (d)
- Electron (e)



- 2 u 1 d = proton
- 1 u 2 d = neutron

Un peu d'exotisme...



Découvertes de nouvelles particules (pions, kaons, muons...)
Au total, des centaines... Pas toutes « élémentaires »
Impossible à décrire à partir de notre boîte de base

Hummm....



Si on rangeait un peu ?!

Les particules de matière



Matière ordinaire

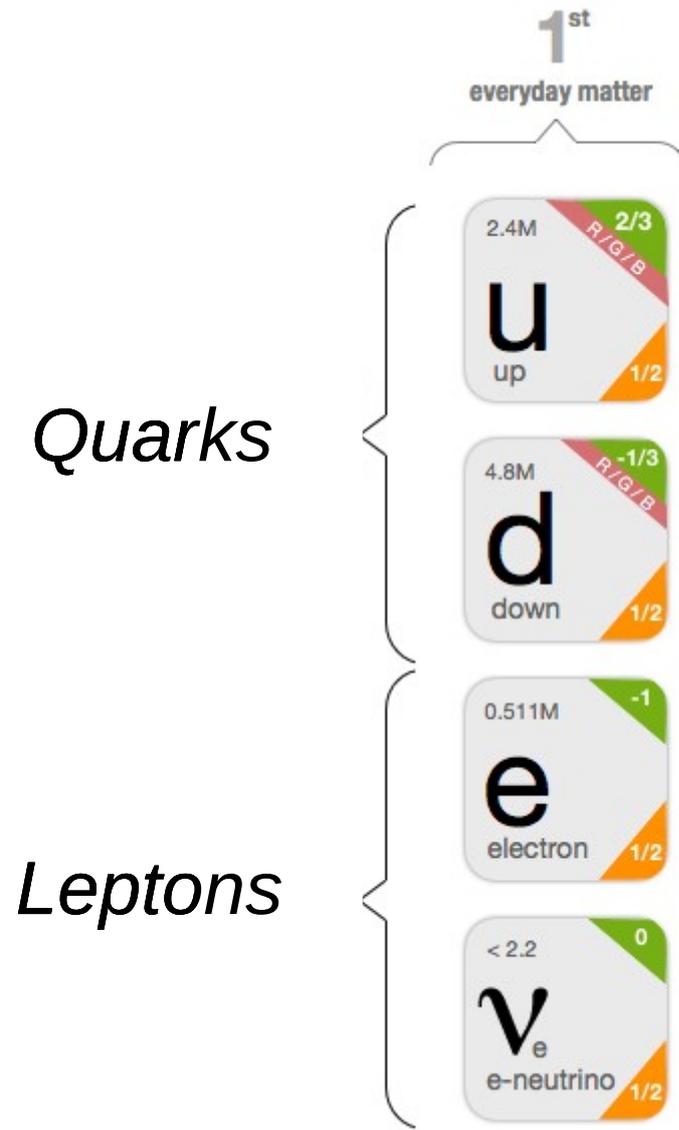
Les particules de matière



← Neutrino, particule neutre de masse très petite

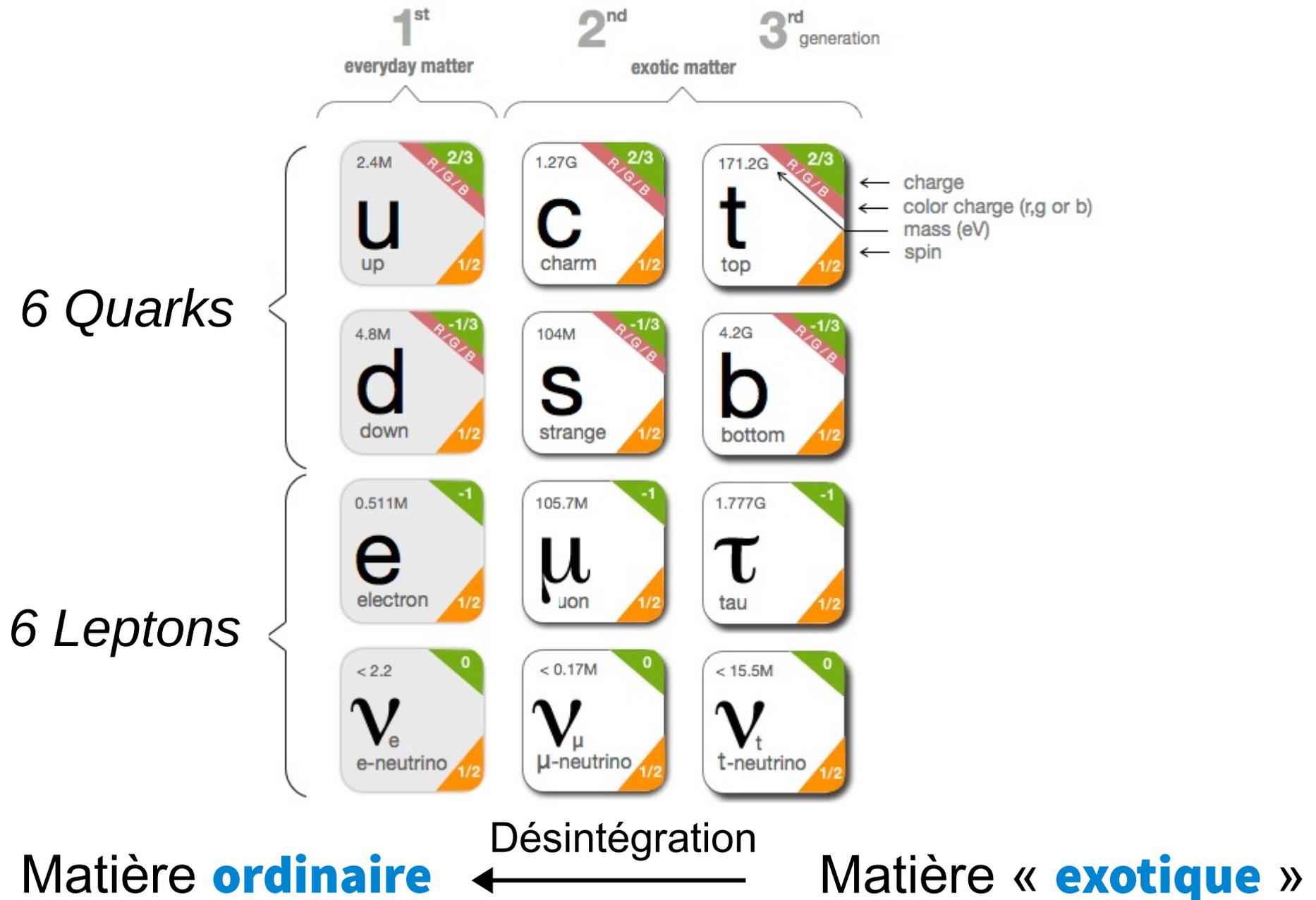
Matière ordinaire

Les particules de matière

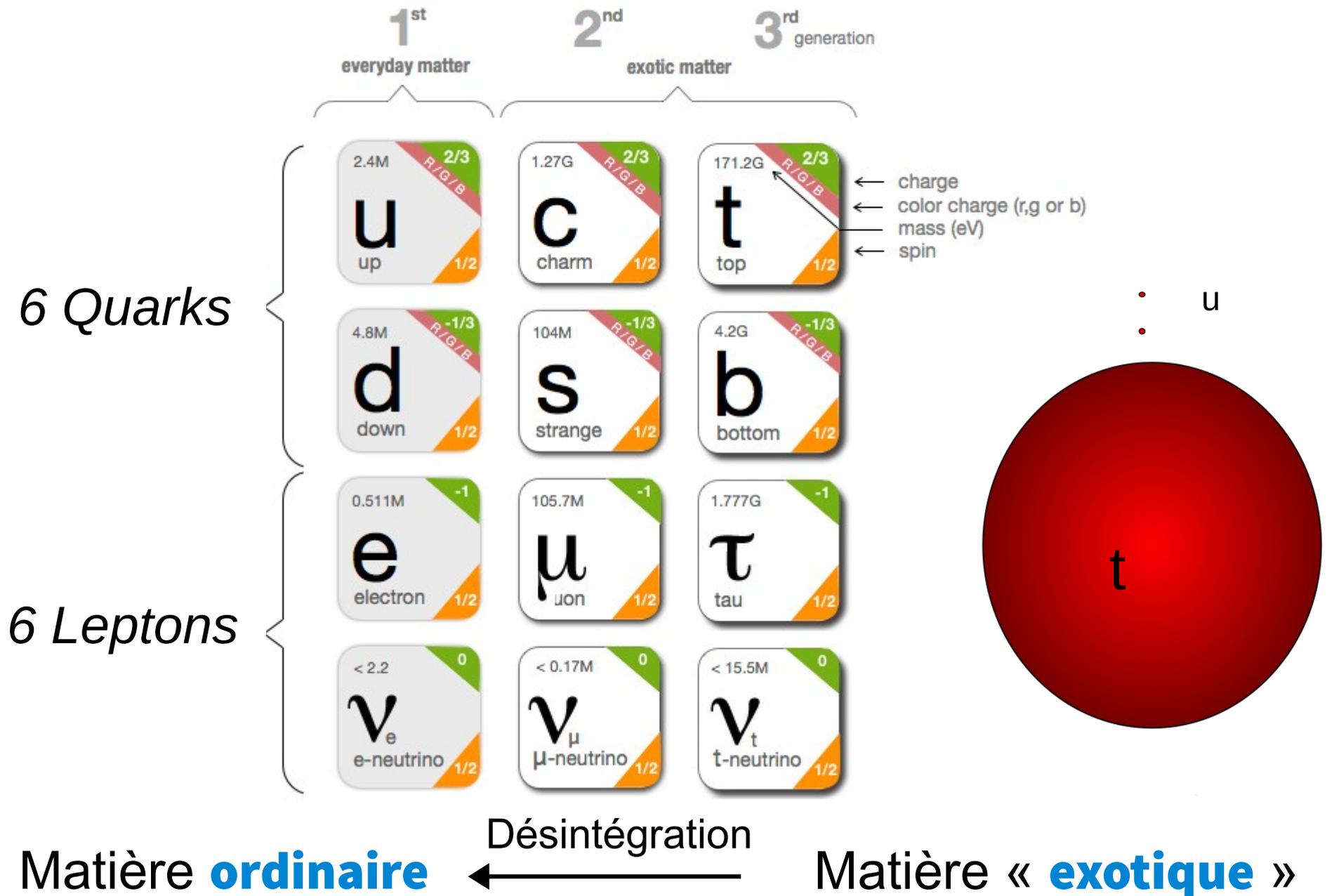


Matière ordinaire

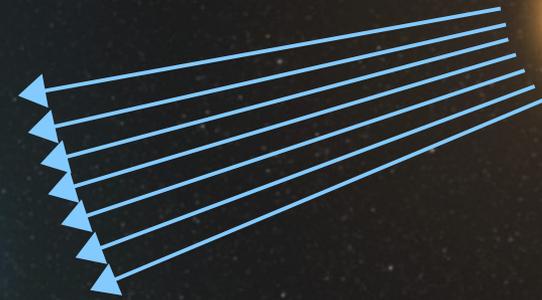
Les particules de matière



Les particules de matière



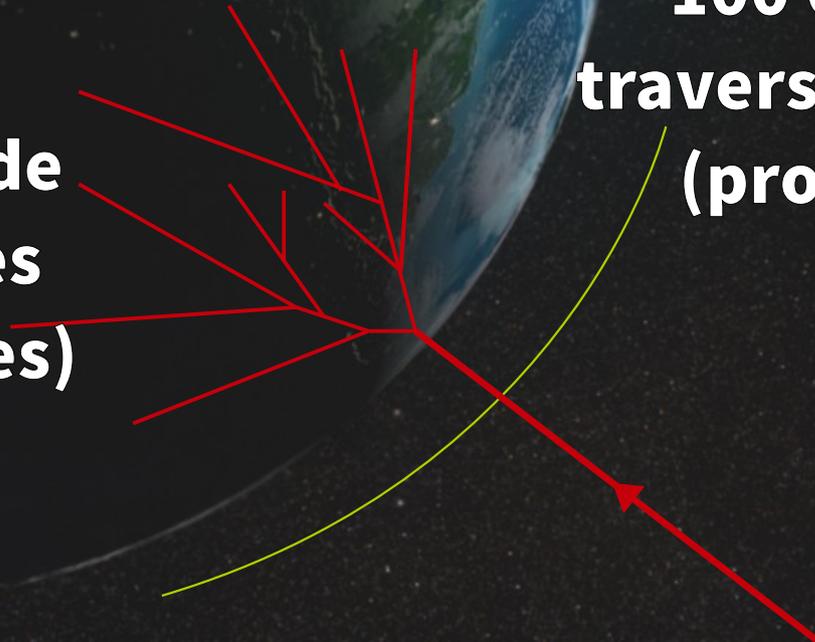
Des particules élémentaires vous traversent !



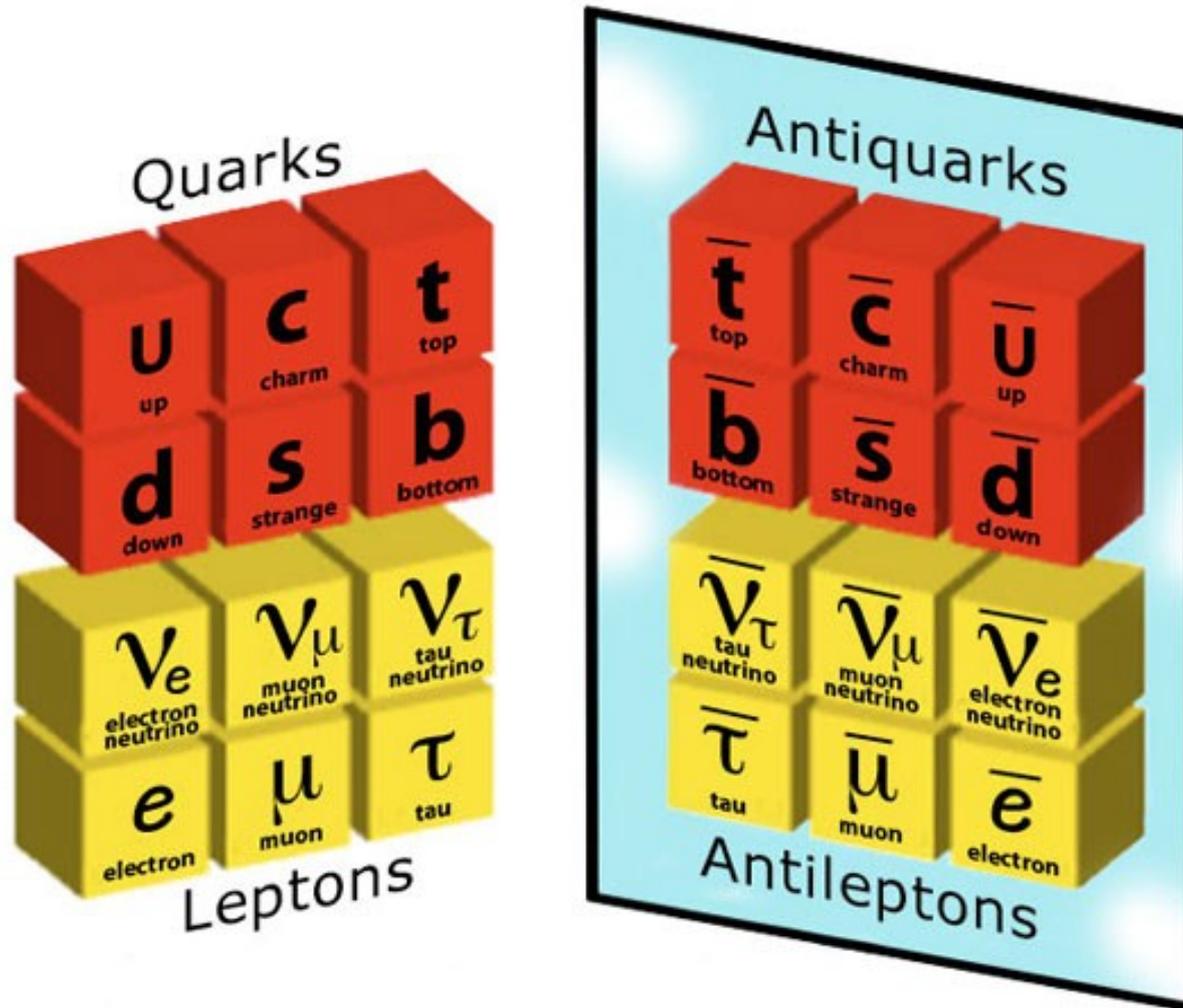
Neutrinos (ν)

100 000 milliards vous traversent chaque seconde (produits par le soleil)

Muons (μ)
~ 100 par seconde (produits par les rayons cosmiques)



et leurs antiparticules



Pour chaque **particule**, il existe une **anti-particule** associée, avec les mêmes propriétés et la même masse, mais une **charge électrique opposée**.

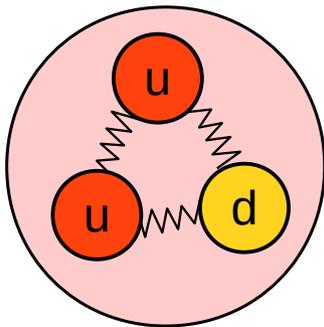
Les quarks forment des hadrons

Les **quarks** ne sont jamais isolés. Ils se regroupent en objets de charge électriques entière : les **hadrons**.

Matière ordinaire

Proton

(charge +1)

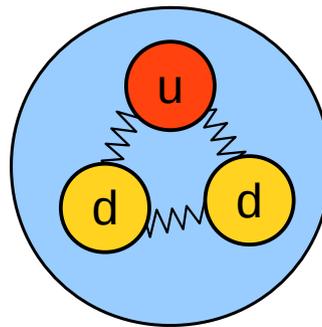


$$\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = 1$$

u u d

Neutron

(charge 0)



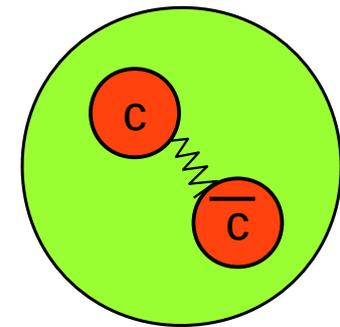
$$\frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0$$

u d d

Et exotique (exemple)

J/ Psi

(charge 0)



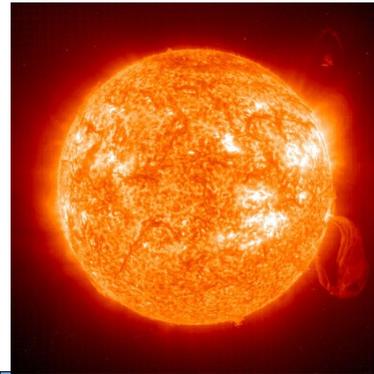
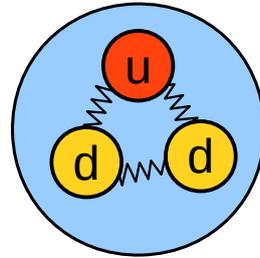
$$\frac{2}{3} - \frac{2}{3} = 0$$

c \bar{c}

La cohésion des quarks provient
d'une **force** (ou **interaction**)

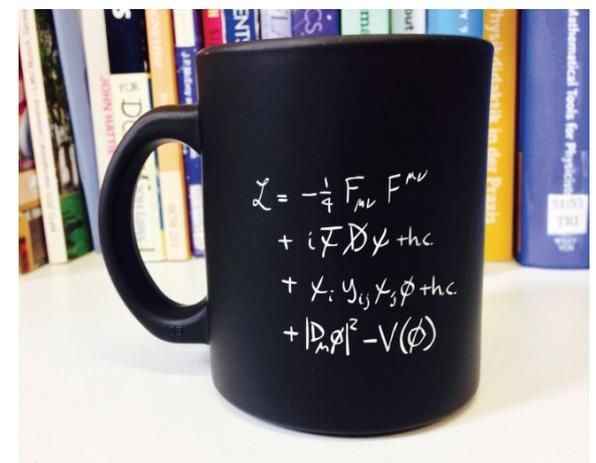
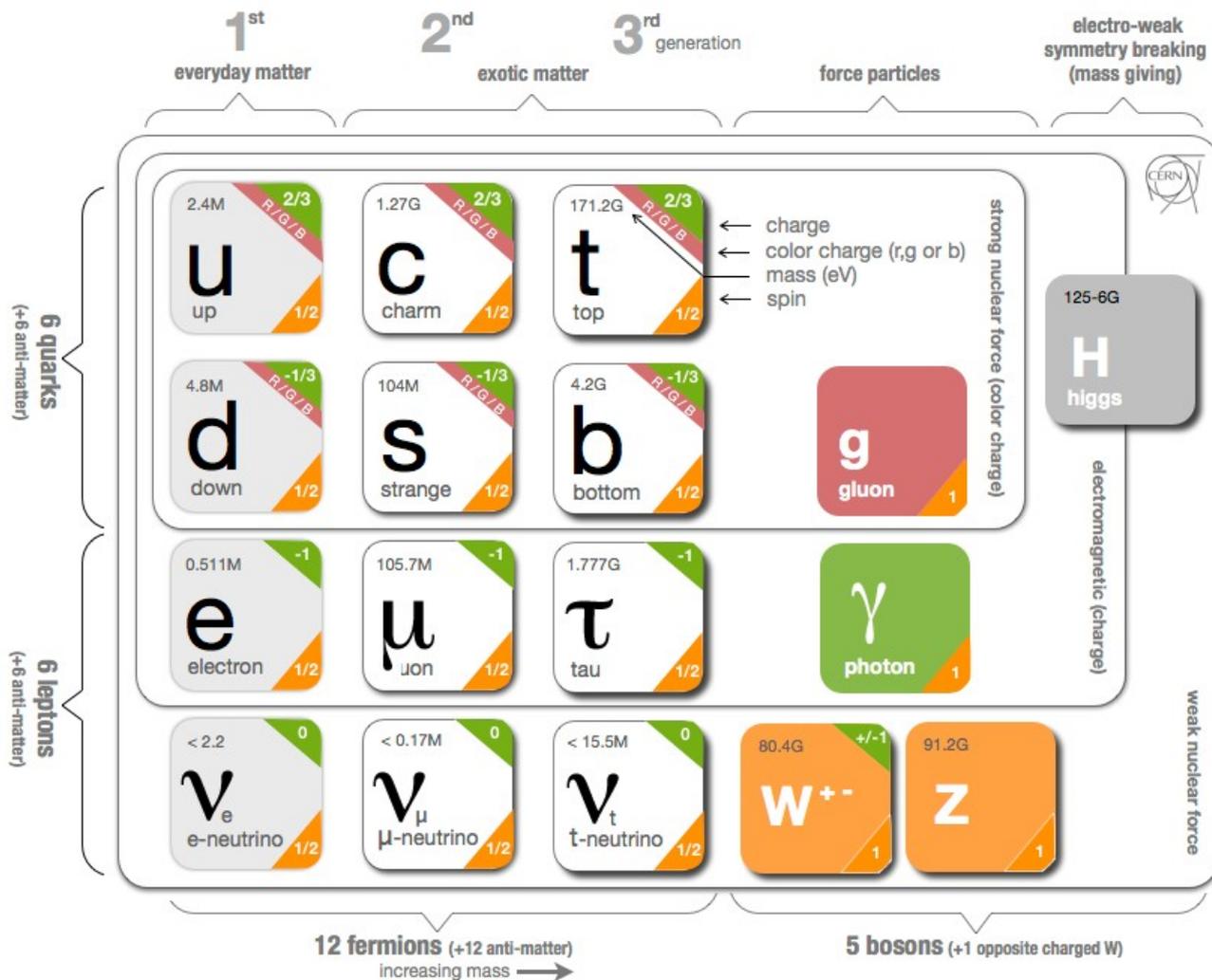
Les interactions

Nous décrivons la nature par **4 interactions fondamentales**, qui résultent de l'échange de **particules médiatrices**



Interaction	Electro magnétique	Forte	Faible	Gravita- tionelle
Mediateur	Photon γ	Gluon g	3 bosons W^+ , W^- , Z	(graviton ?)
Intensité relative	1	100	10^{-12}	10^{-38}

Le Modèle Standard

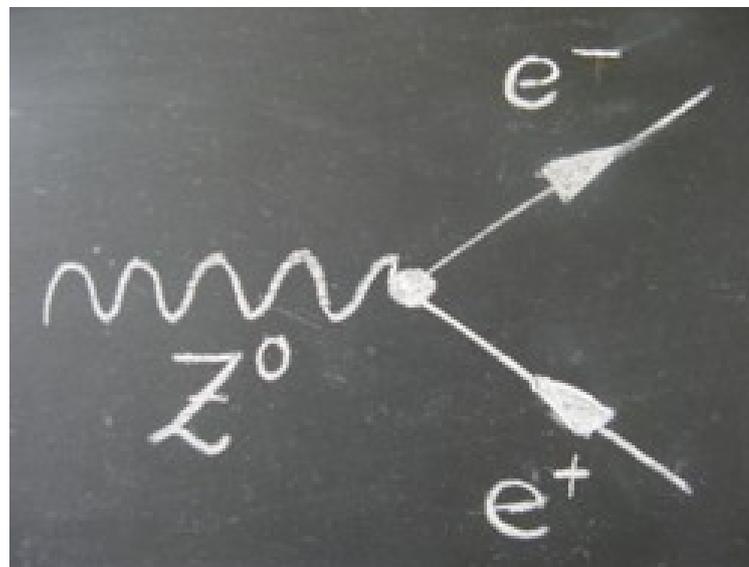
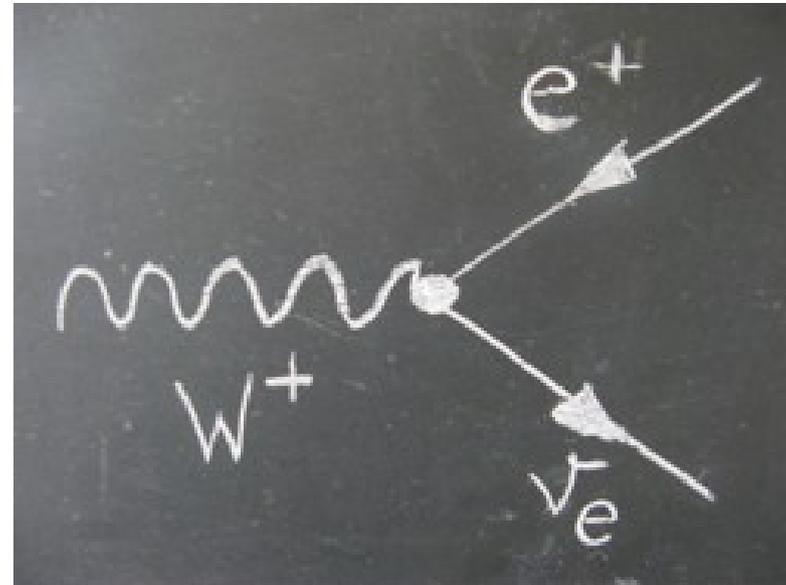
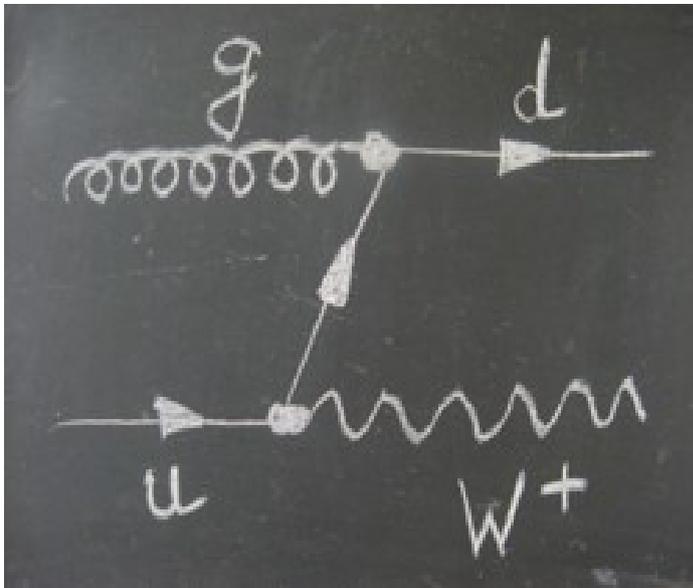


Le **Modèle Standard** est la théorie qui décrit les particules connues et leurs interactions.

Toutes ces particules avaient été observées avant le LHC, sauf une : le **boson de Higgs**, responsable de la masse des particules

Diagramme de Feynman

La dynamique des particules



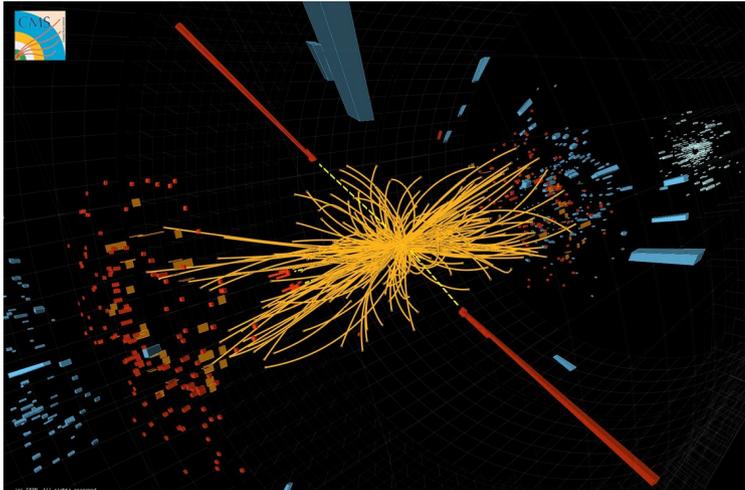
De la particule au champ 1/2



De la particule au champ 2/2



Le boson de Higgs

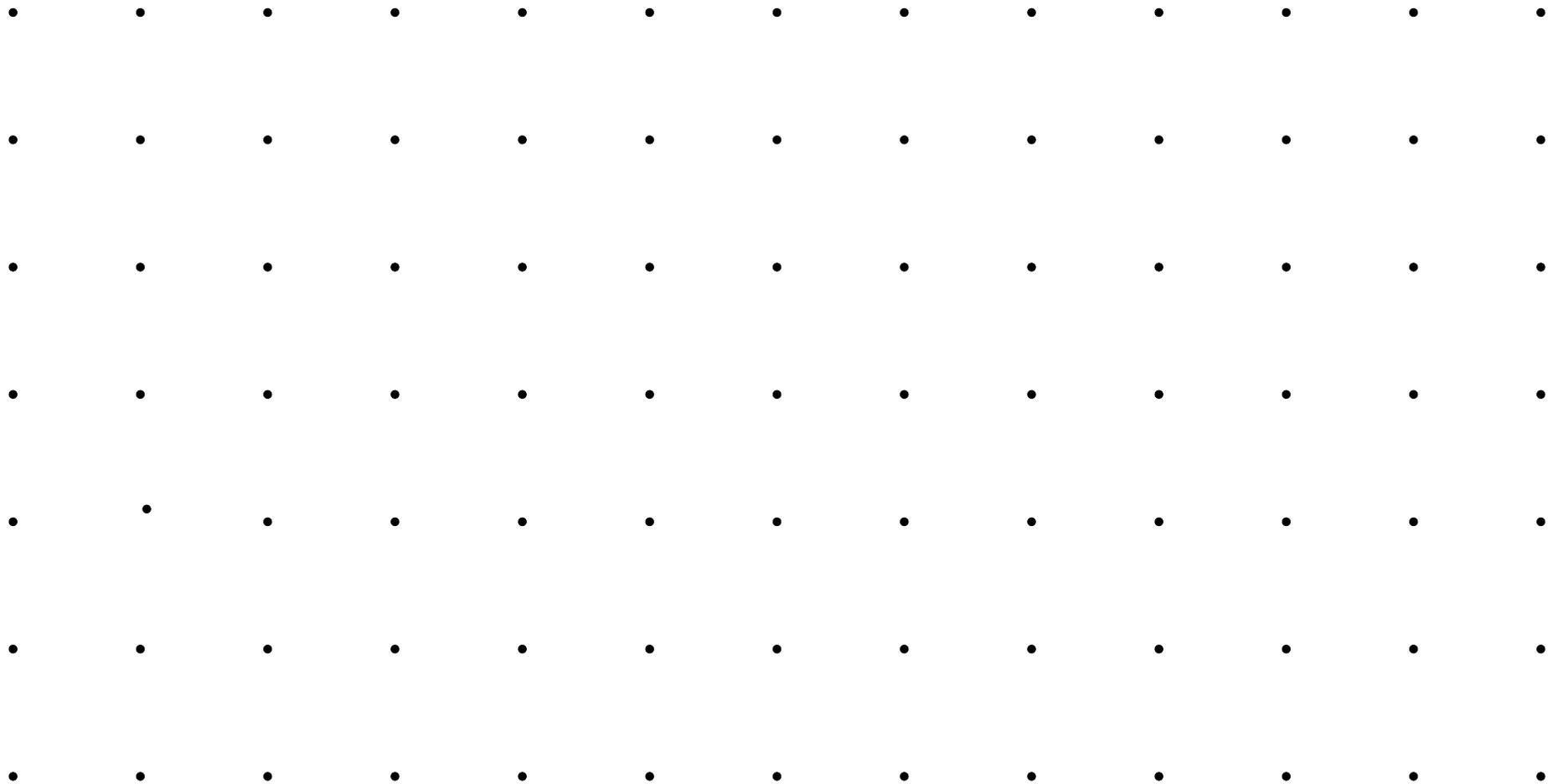


Observé en 2012,
48 ans après sa
prédiction !



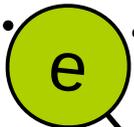
Le mécanisme de Higgs

Ou comment la masse des particules est la manifestation de leur interaction avec le **champ de Higgs**



Le mécanisme de Higgs

Ou comment la masse des particules est la manifestation de leur interaction avec le **champ de Higgs**



L'**électron interagit peu** avec le champ de Higgs .



L'énergie d'interaction est petite

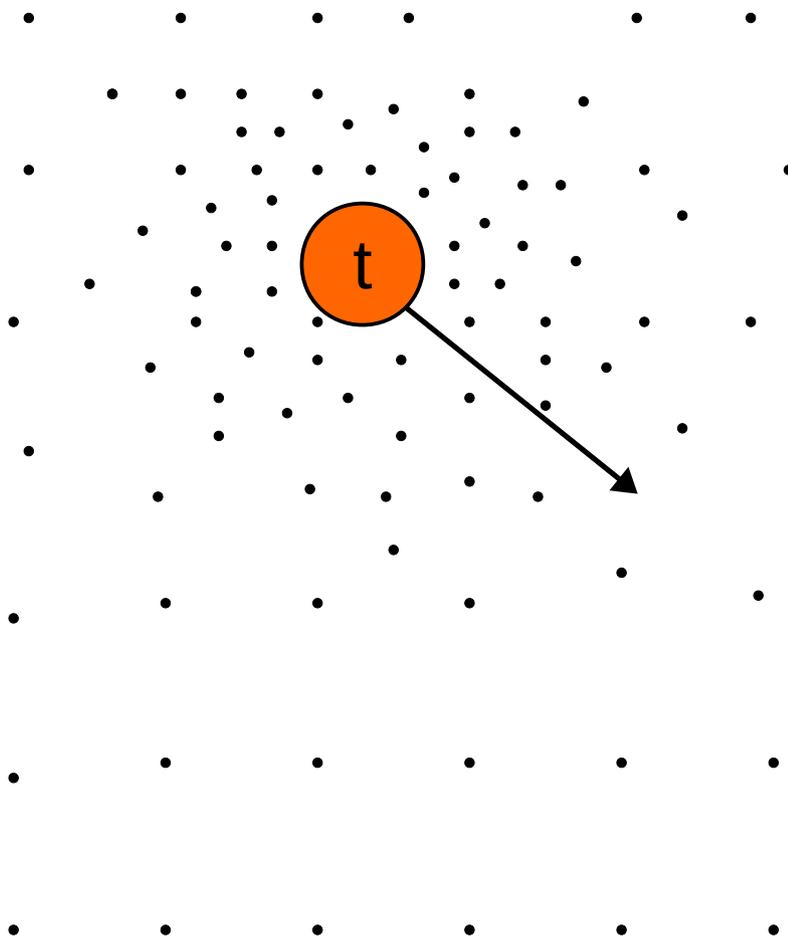
$$E = mc^2$$



la masse est petite

Le mécanisme de Higgs

Ou comment la masse des particules est la manifestation de leur interaction avec le **champ de Higgs**



Le **quark top interagit fort** avec le champ de Higgs .



L'énergie d'interaction est grande

$$E = mc^2$$



la masse est grande

Immense succès du modèle standard

Cependant, encore beaucoup de questions sans réponses...

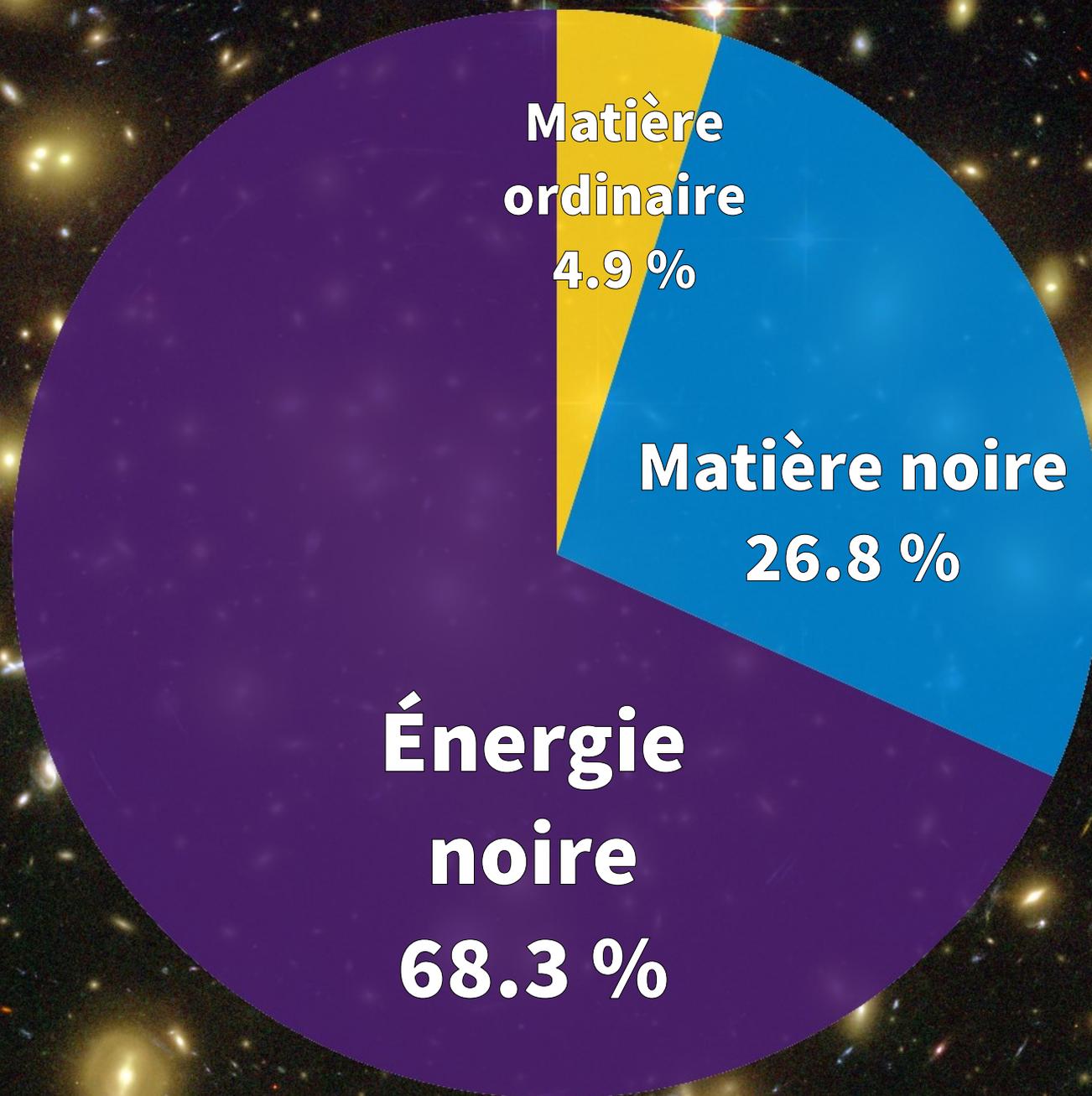
- Pourquoi y a-t-il **trois familles** de constituants ?
- Pourquoi le **quark top** est-il si lourd ?
- Où est passé l'**anti-matière** ? A l'origine, il y devait y avoir autant de matière que d'anti-matière.
- Qu'est-ce que la **matière noire** et l'**énergie noire** ?
- Comment inclure la description de la **gravitation** ?
- Existe-t-il d'**autres particules**, proposées par des théories qui résoudreiraient ces problèmes ?



**Si les étoiles tournent
réellement à la vitesse
que l'on mesure ...**



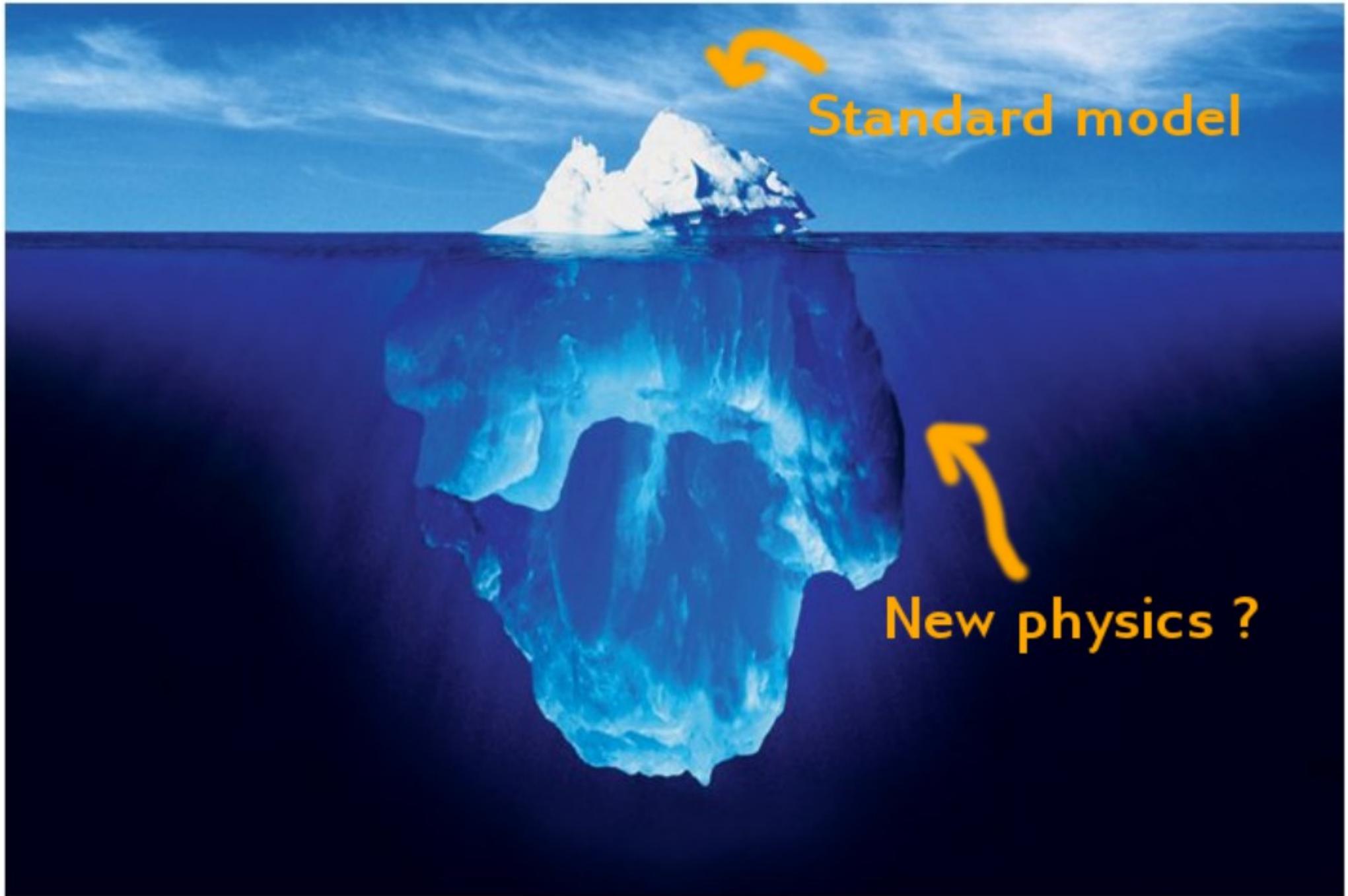
**... il doit y avoir
de la masse en plus, mais
qu'on ne voit pas !
De la « matière noire »**



**Matière
ordinaire**
4.9 %

Matière noire
26.8 %

**Énergie
noire**
68.3 %



Standard model



New physics ?