

Introduction à la physique des particules

The background 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. A network of thin, glowing lines and curves, representing particle paths or interactions, weaves across the scene. The overall effect is a dynamic and futuristic representation of the subatomic world.

MasterClasses 2019 - Colmar

Les particules élémentaires

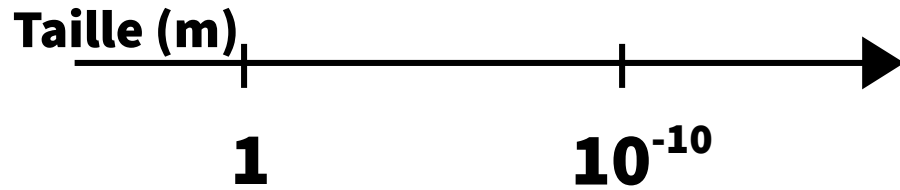
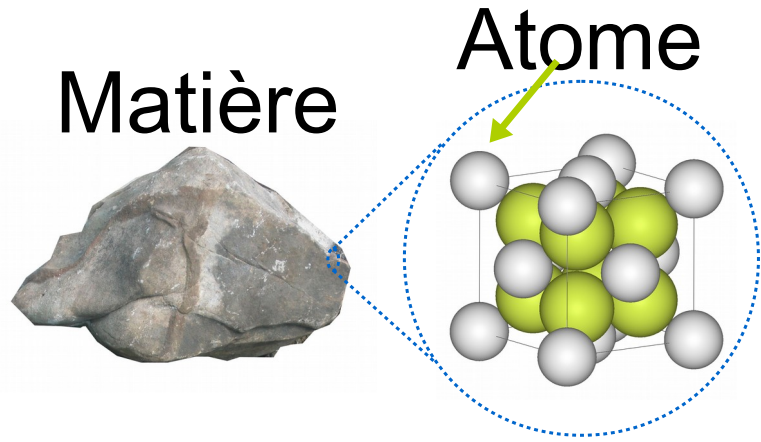
Matière



Taille (m) →
1

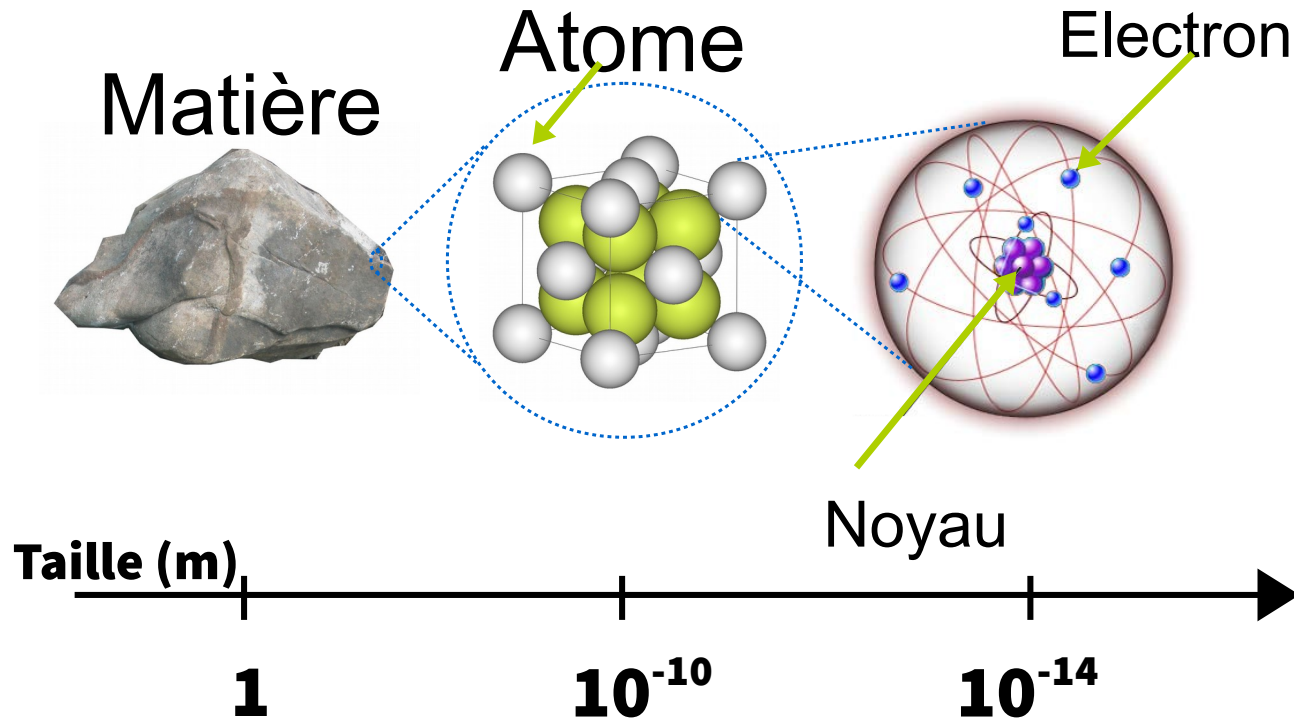
- Des particules **sans sous-structure** !
- Notion qui **varie avec l'époque** et les moyens expérimentaux

Les particules élémentaires



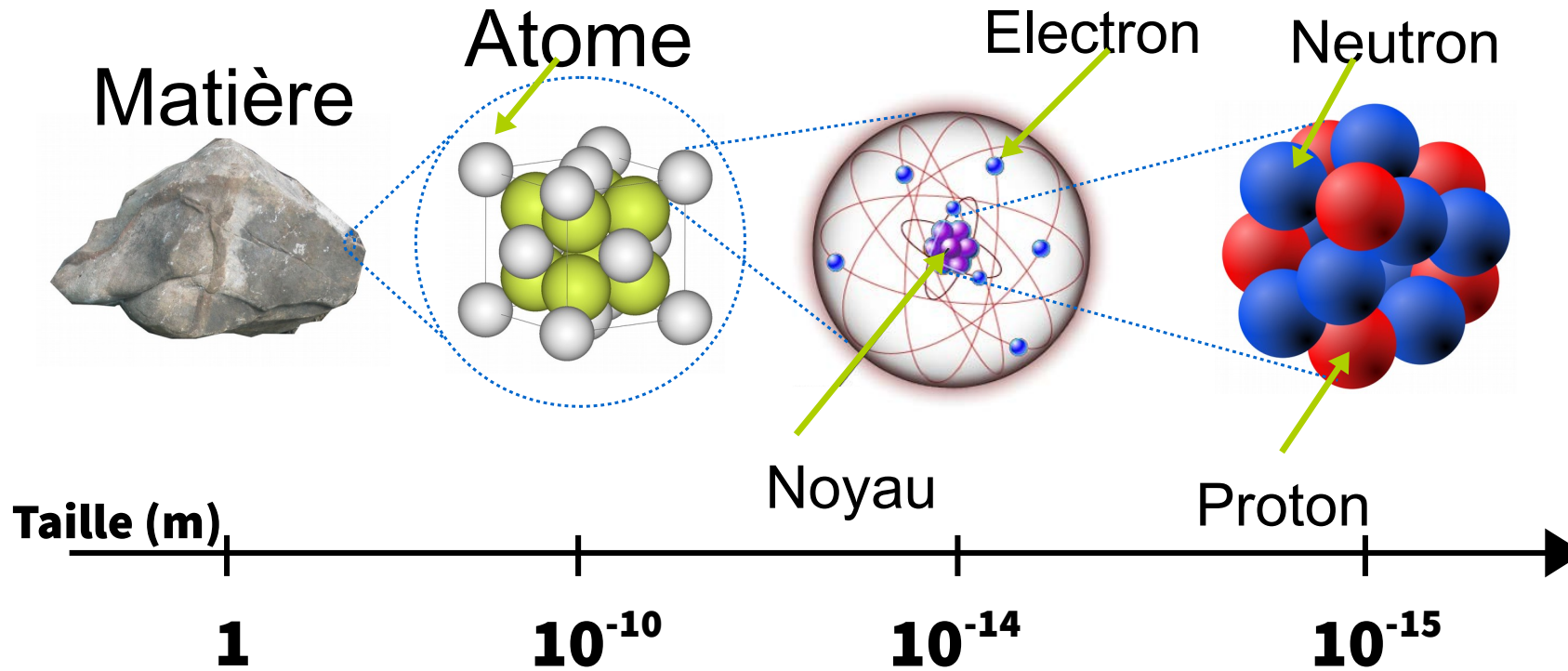
- **Atomes** : notion inventée dès l'antiquité. Composant indivisible de la matière.
- Atomes au sens moderne : XIXe siècle

Les particules élémentaires



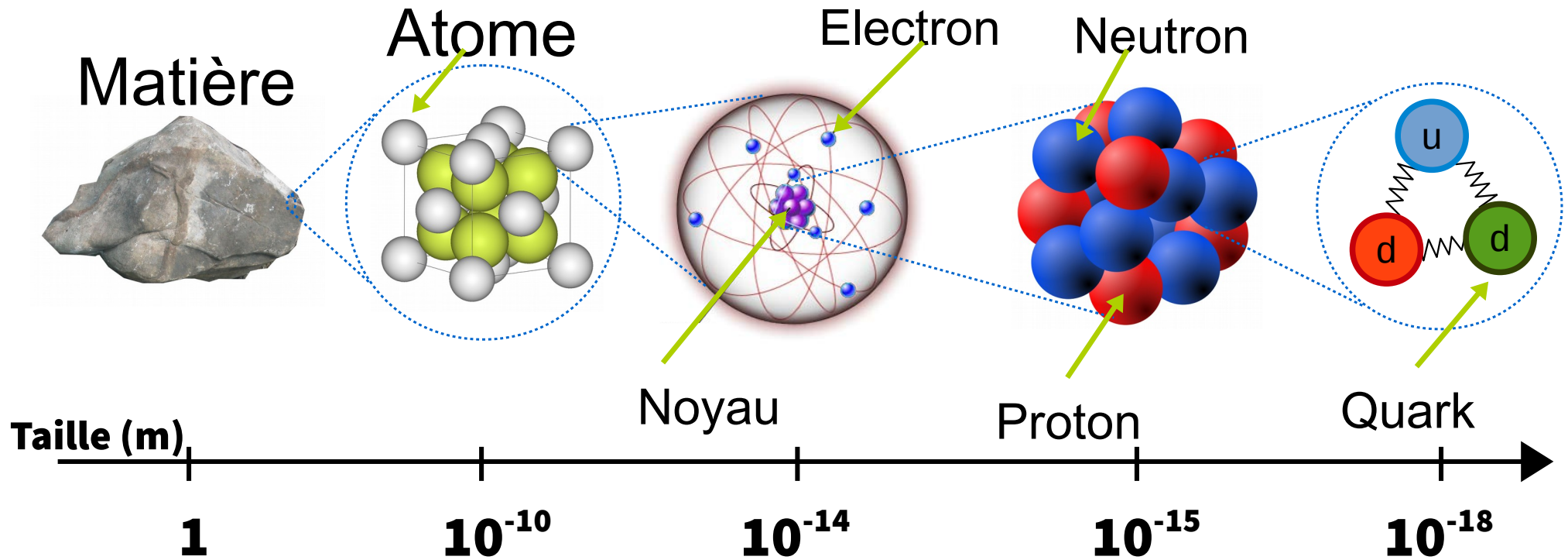
→ Découverte du **noyau et de l'électron** : fin XIXe, début XXe

Les particules élémentaires



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

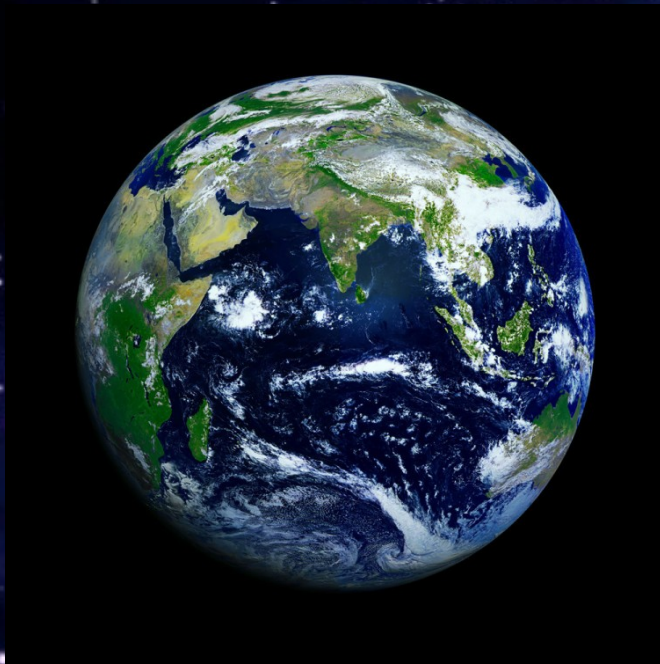
Les particules élémentaires



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

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

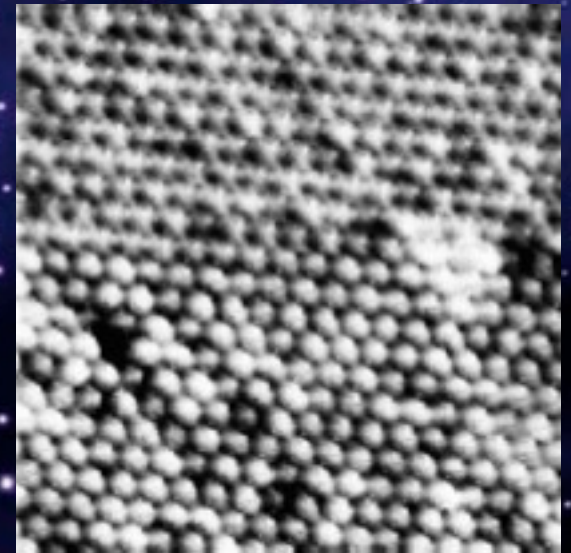
L'univers est fait de particules



Les planètes



**Les êtres
vivants**



Les atomes

La boîte de base ...

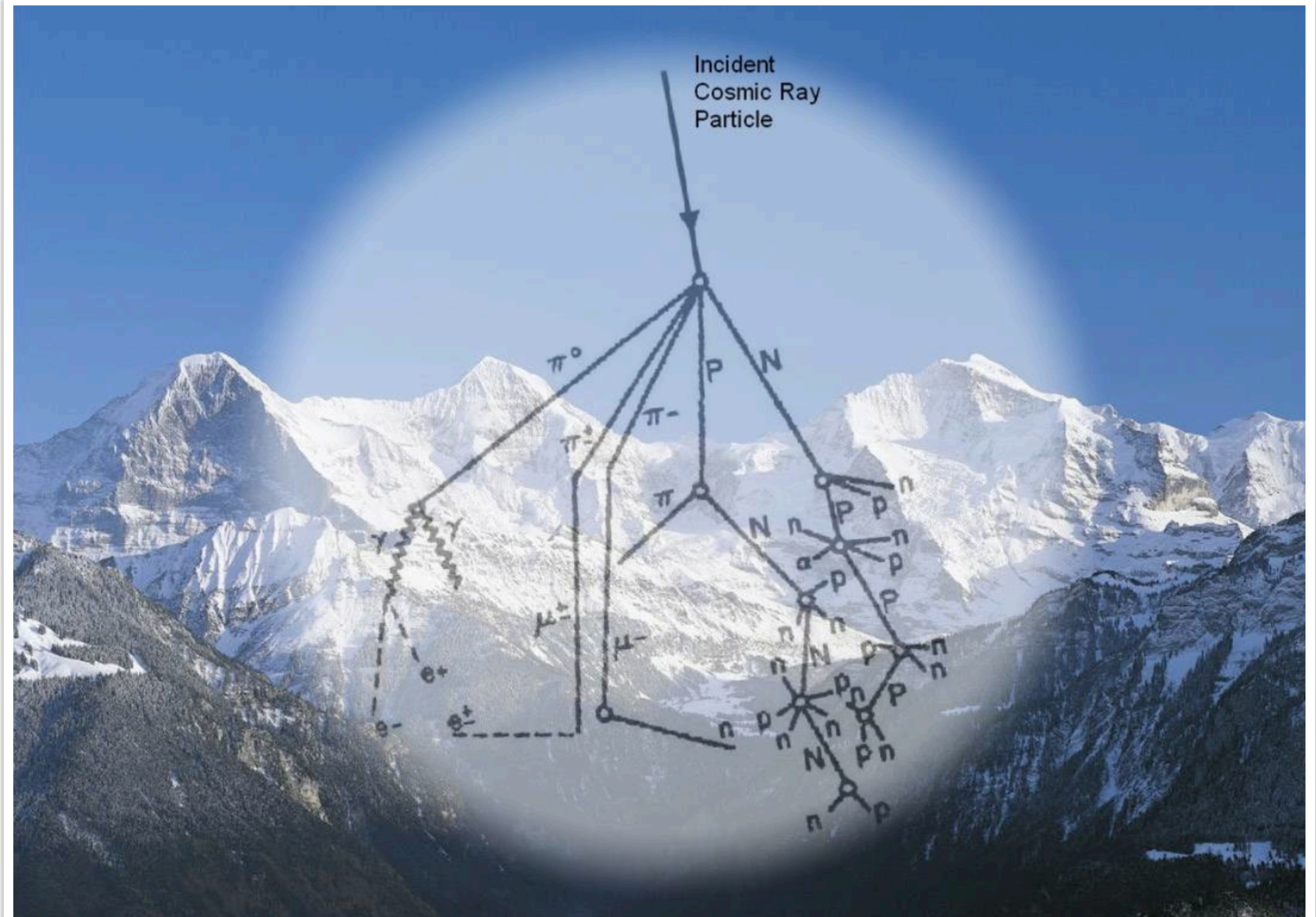


- Quark up (u)
- Quark down (d)
- Electron (e)



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

1912, découverte des rayons cosmiques par Victor Hesse



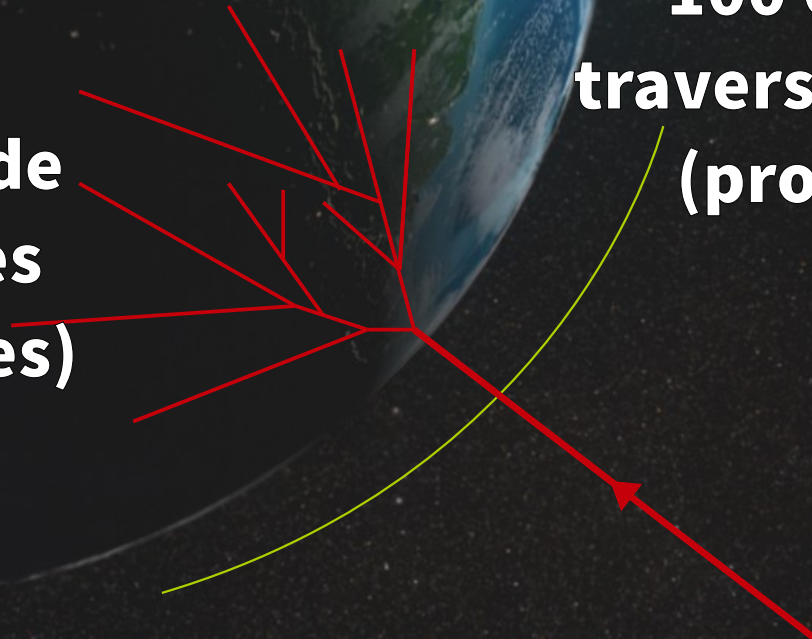
Des particules élémentaires vous traversent !



Neutrinos (ν)

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

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



Hummm....



Si on rangeait un peu ?!

Les particules de matière



Matière ordinaire

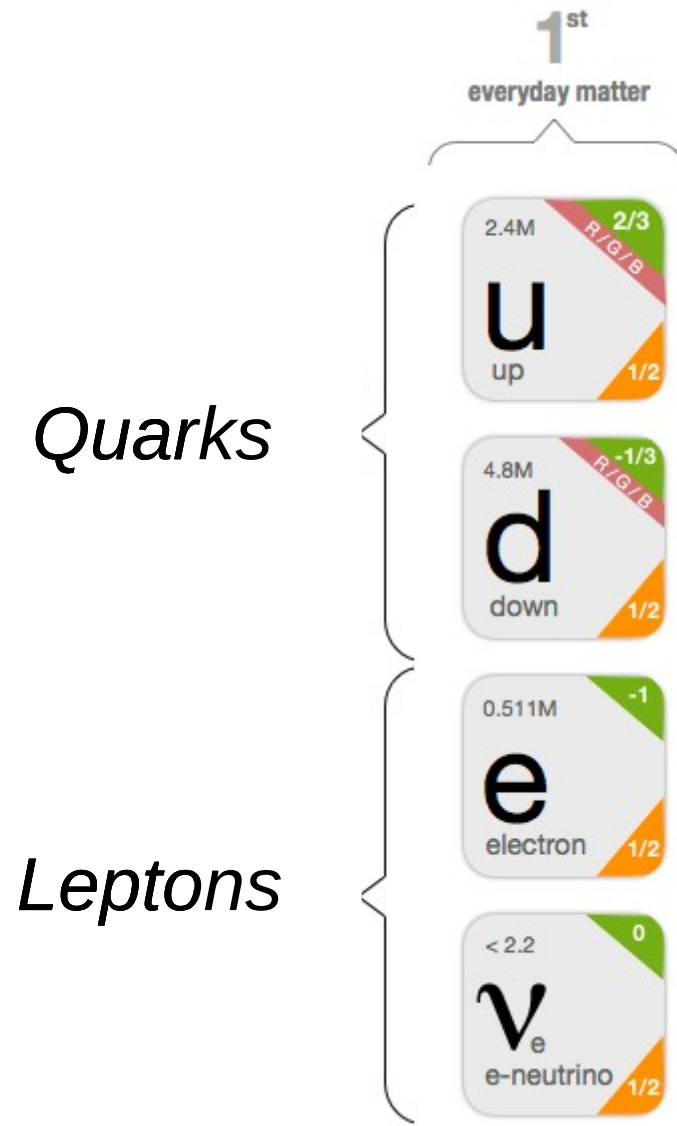
Les particules de matière



← Neutrino, particule neutre de masse très petite

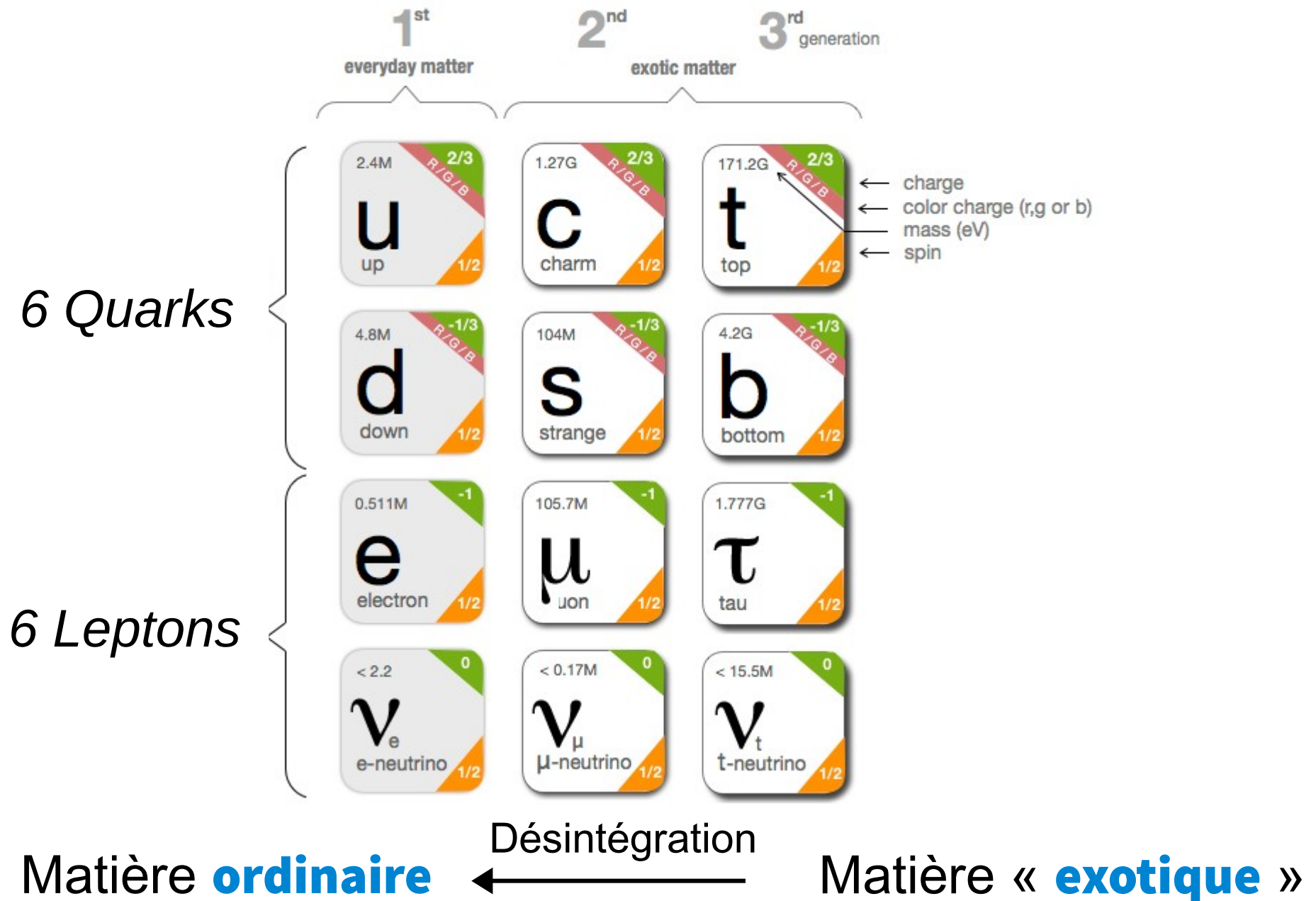
Matière ordinaire

Les particules de matière

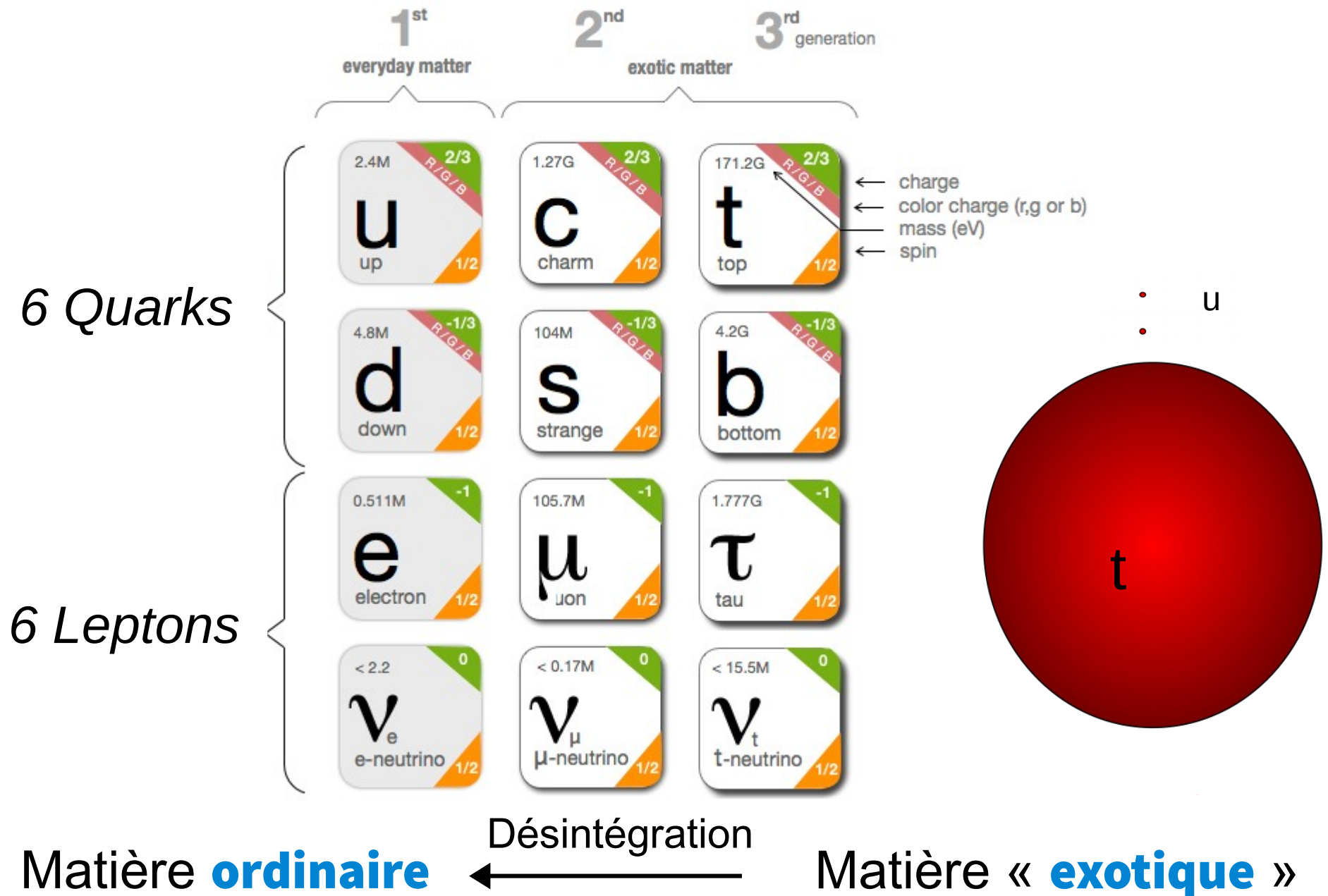


Matière ordinaire

Les particules de matière

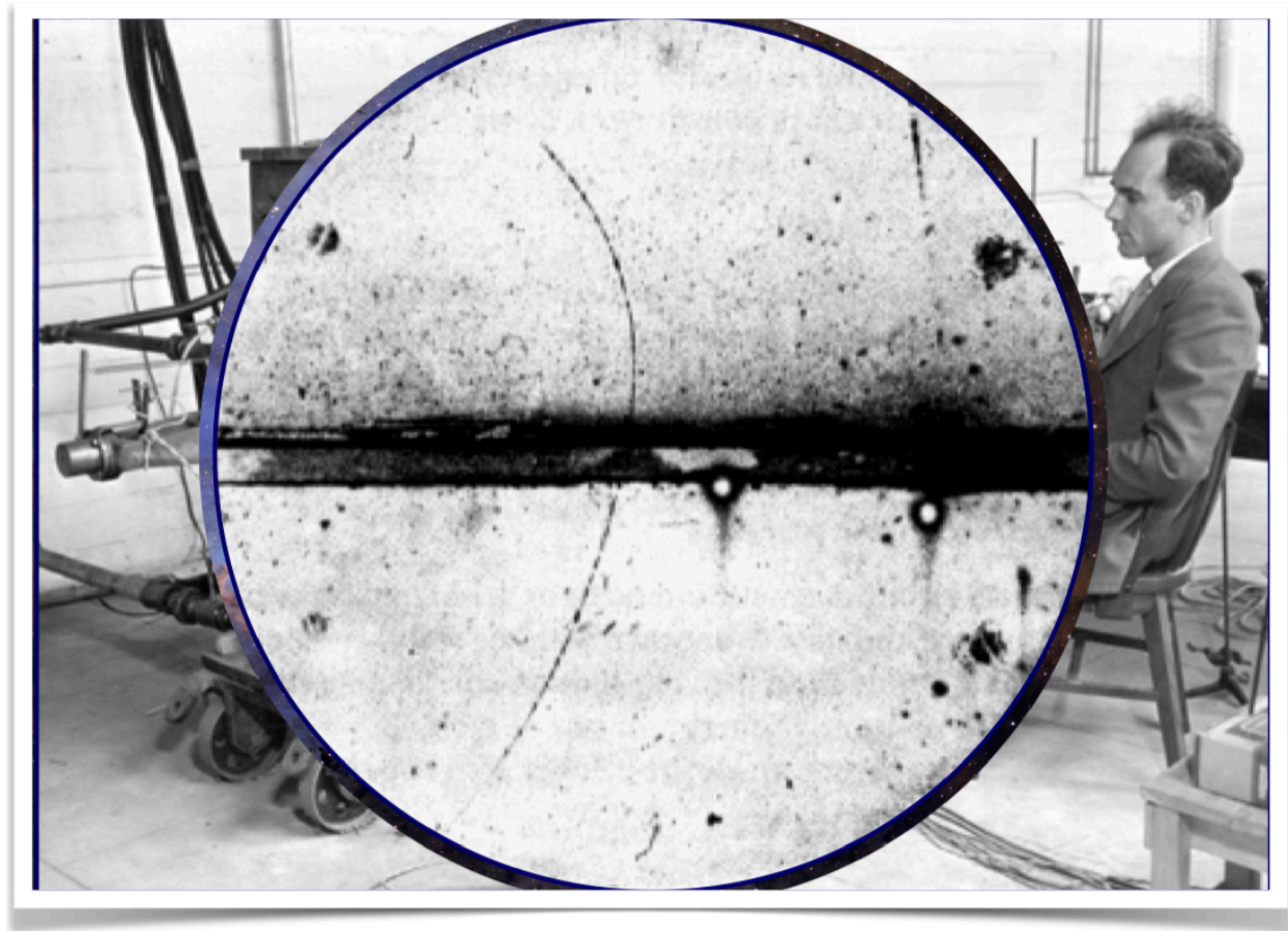


Les particules de matière

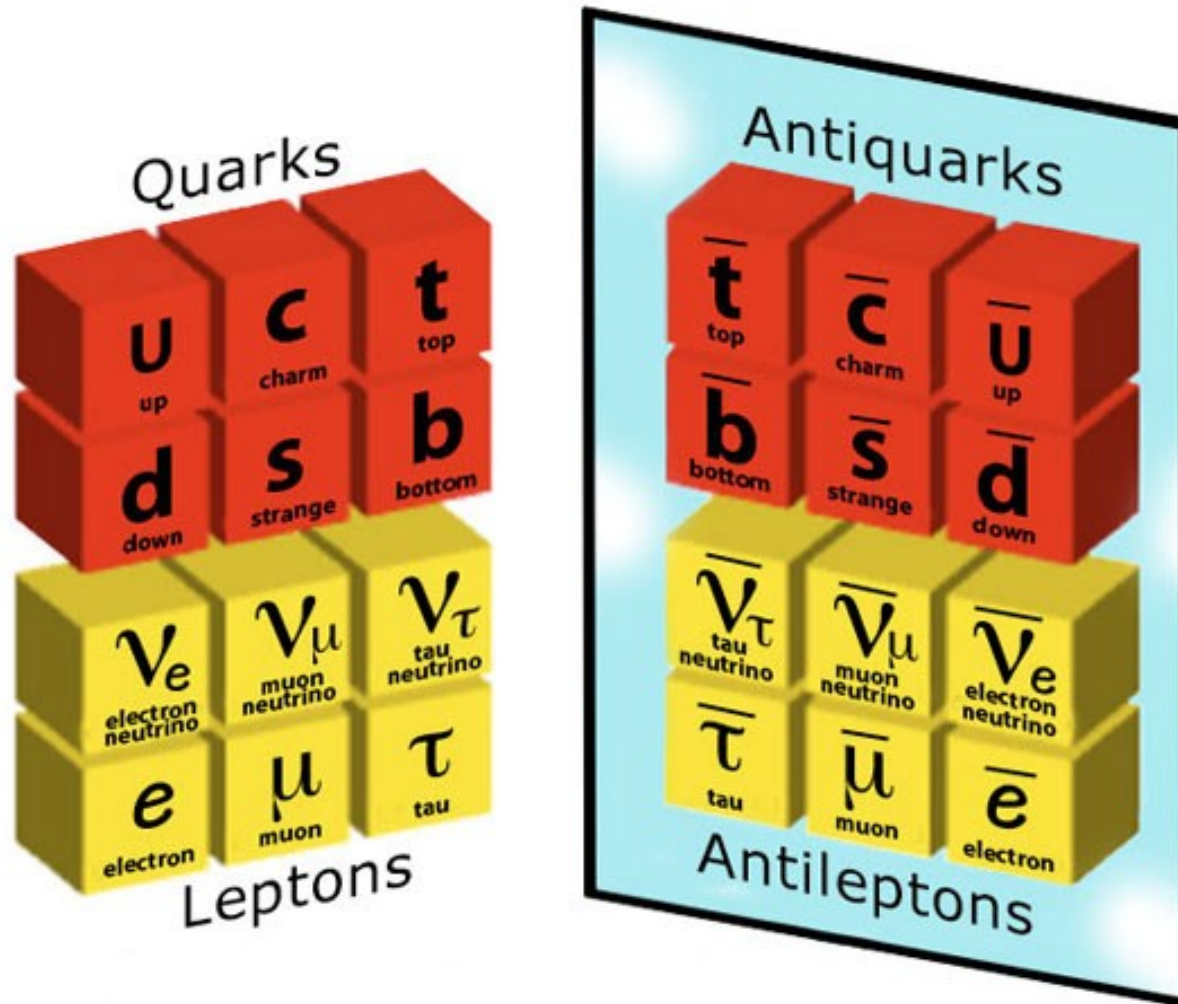


1932, découverte d'une **particule de même masse que l'électron** mais de **charge électrique opposée** par Carl Anderson

L'antimatière existe !



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**.

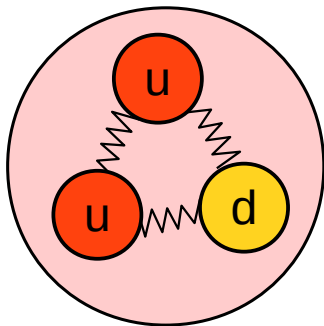
Les quarks forment des hadrons

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

Matière ordinaire

Proton

(charge +1)

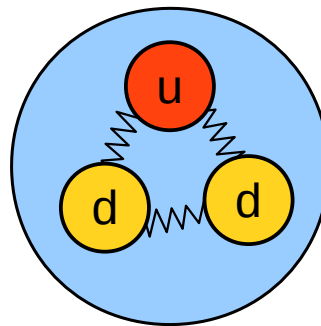


$$\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = 1$$

u u d

Neutron

(charge 0)



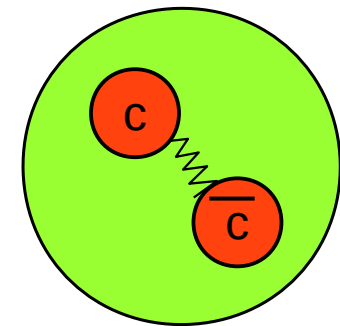
$$\frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0$$

u d d

Et exotique (exemple)

J/ Psi

(charge 0)



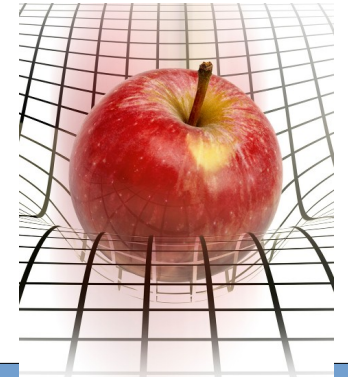
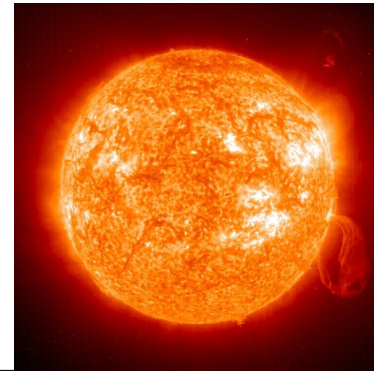
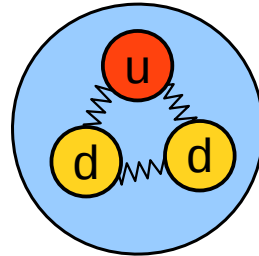
$$\frac{2}{3} - \frac{2}{3} = 0$$

c \bar{c}

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

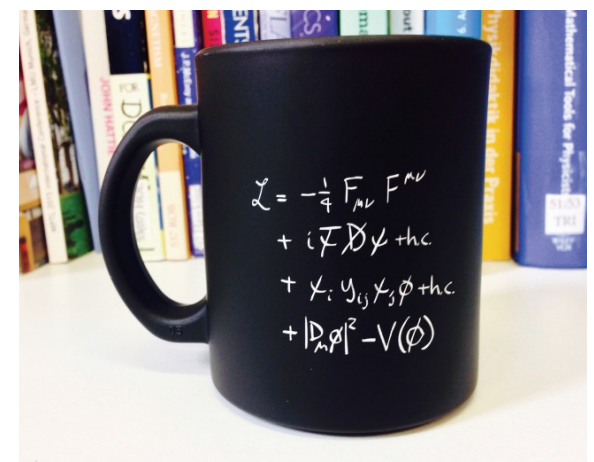
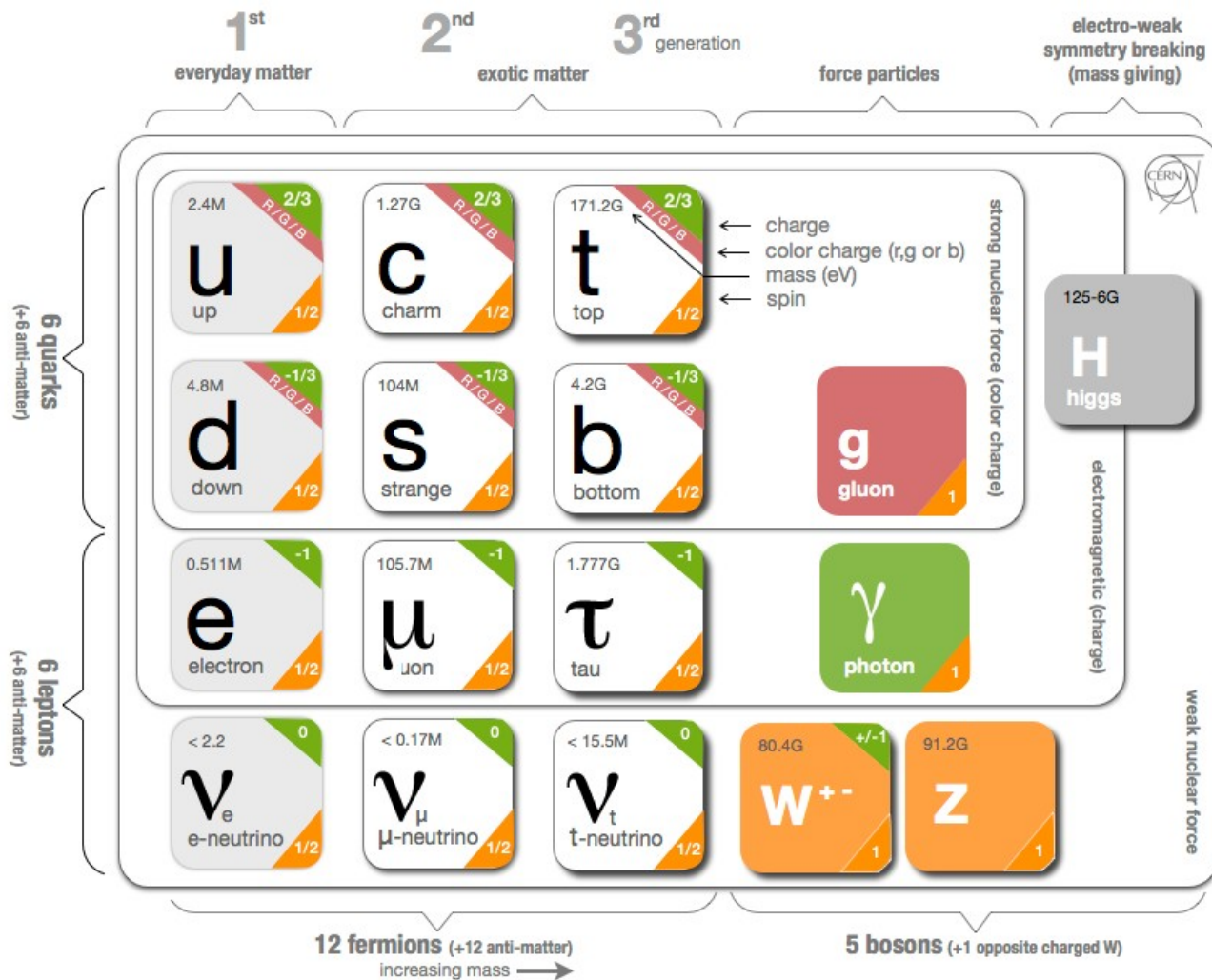
Les interactions

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

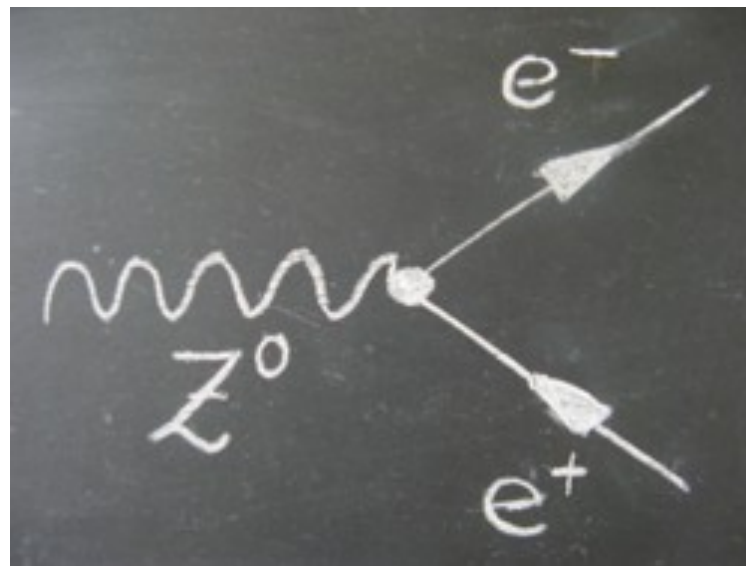
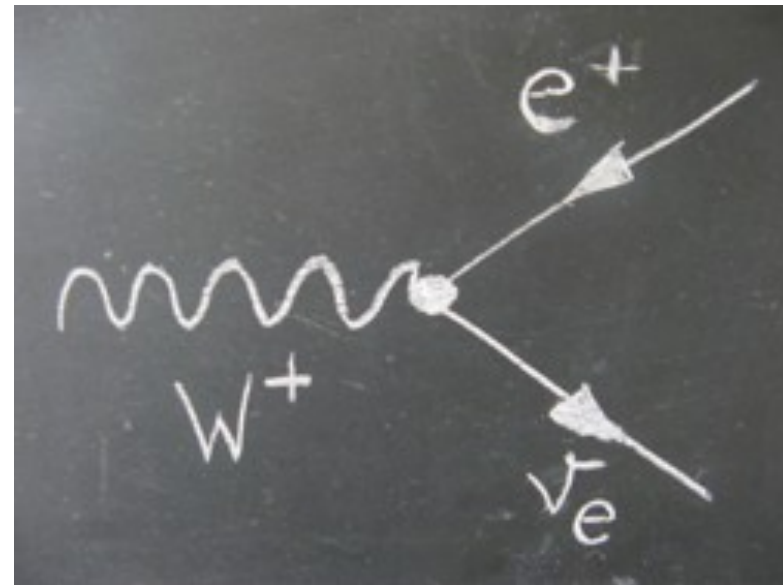
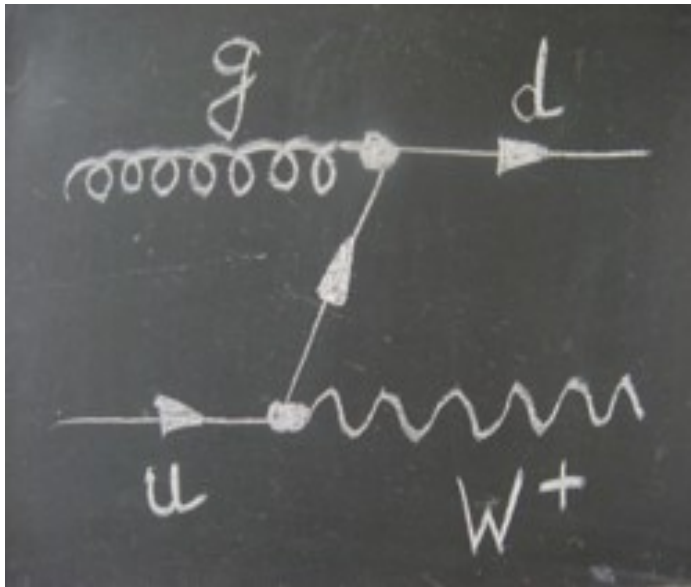


Le **Modèle Standard** est la théorie qui décrit les particules connues et leurs interactions.

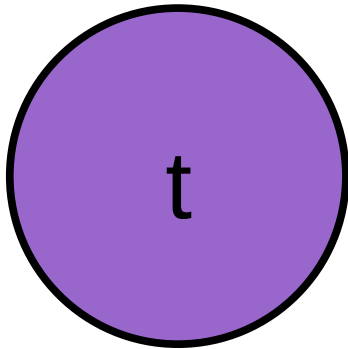
Toutes ces particules avaient été observées avant le LHC, sauf une : le **boson de Higgs**, responsable de la masse des particules

Diagramme de Feynman

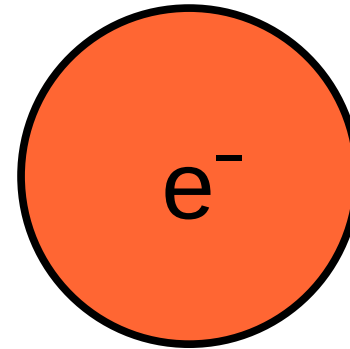
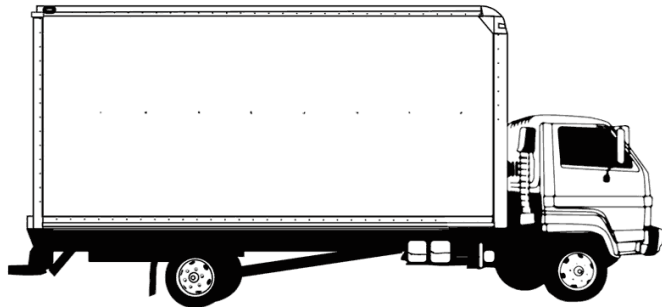
La dynamique des particules



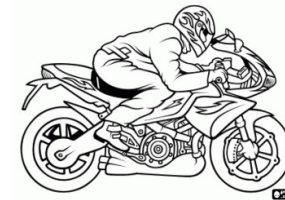
Boson de Higgs: qu'est-ce que ça change?



Quark top: TRES LOURD



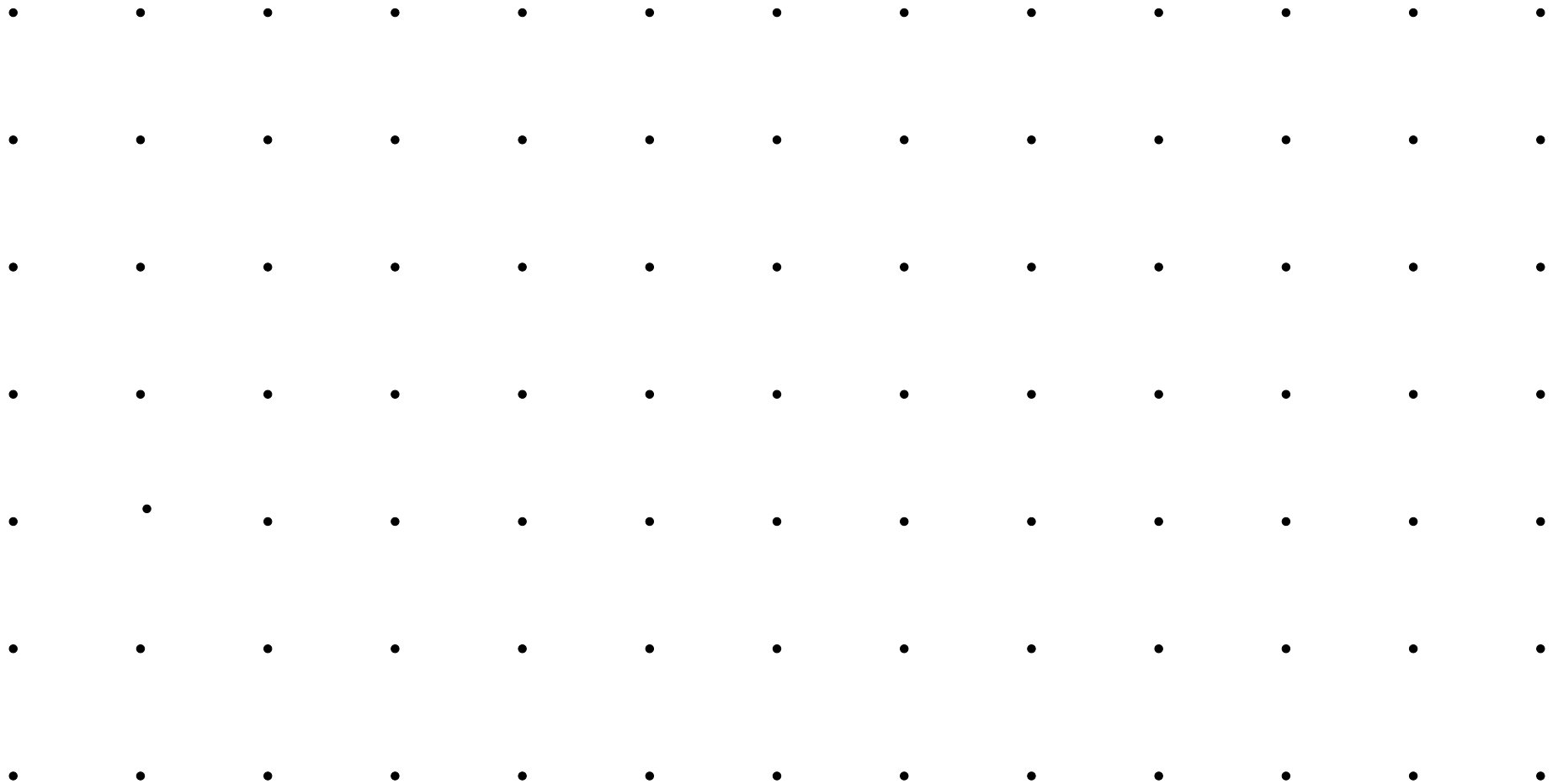
Électron: très léger



Mais pourquoi???

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

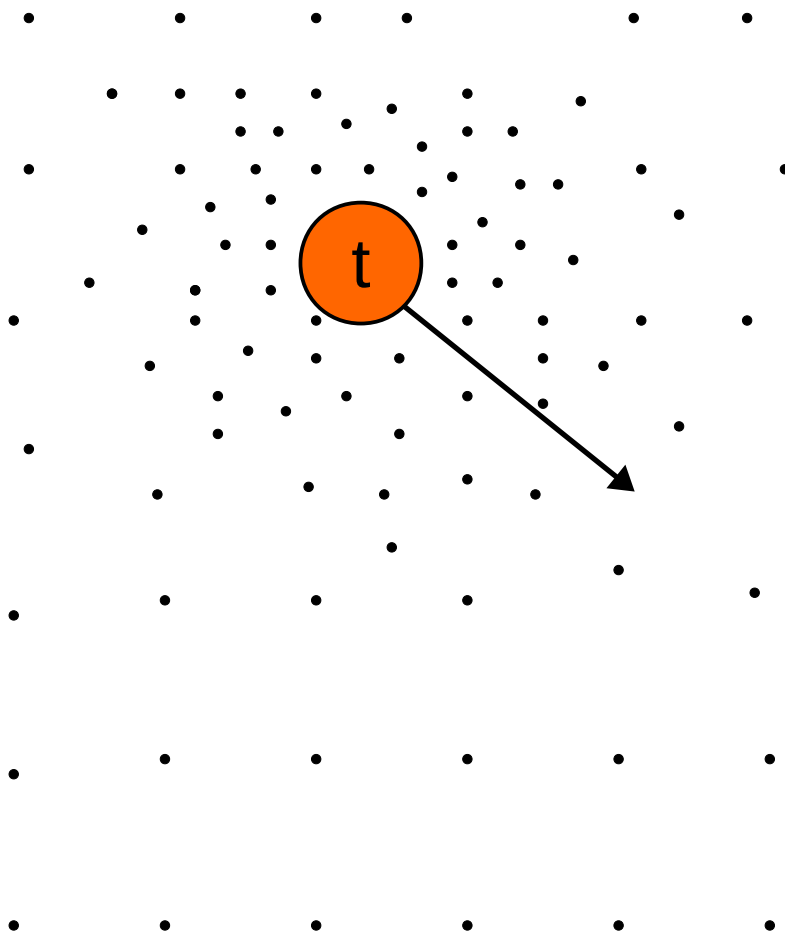
$$E = mc^2$$



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 .



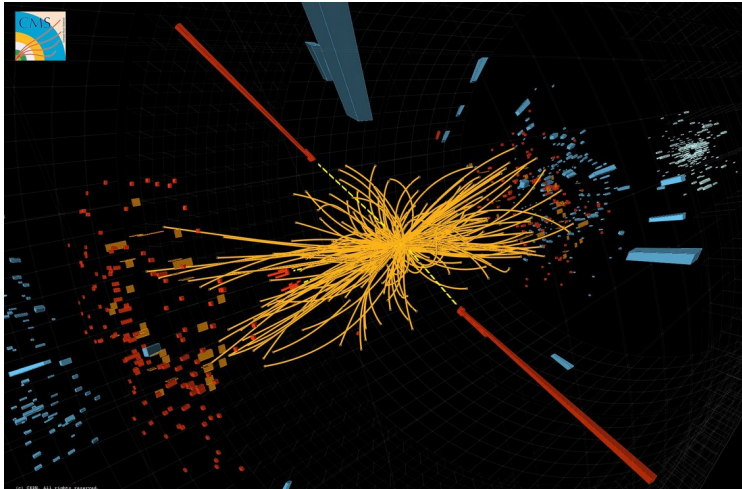
L'énergie d'interaction est grande

$$E = mc^2$$



la masse est grande

Le boson de Higgs



Observé en 2012,
48 ans après sa
prédiction !



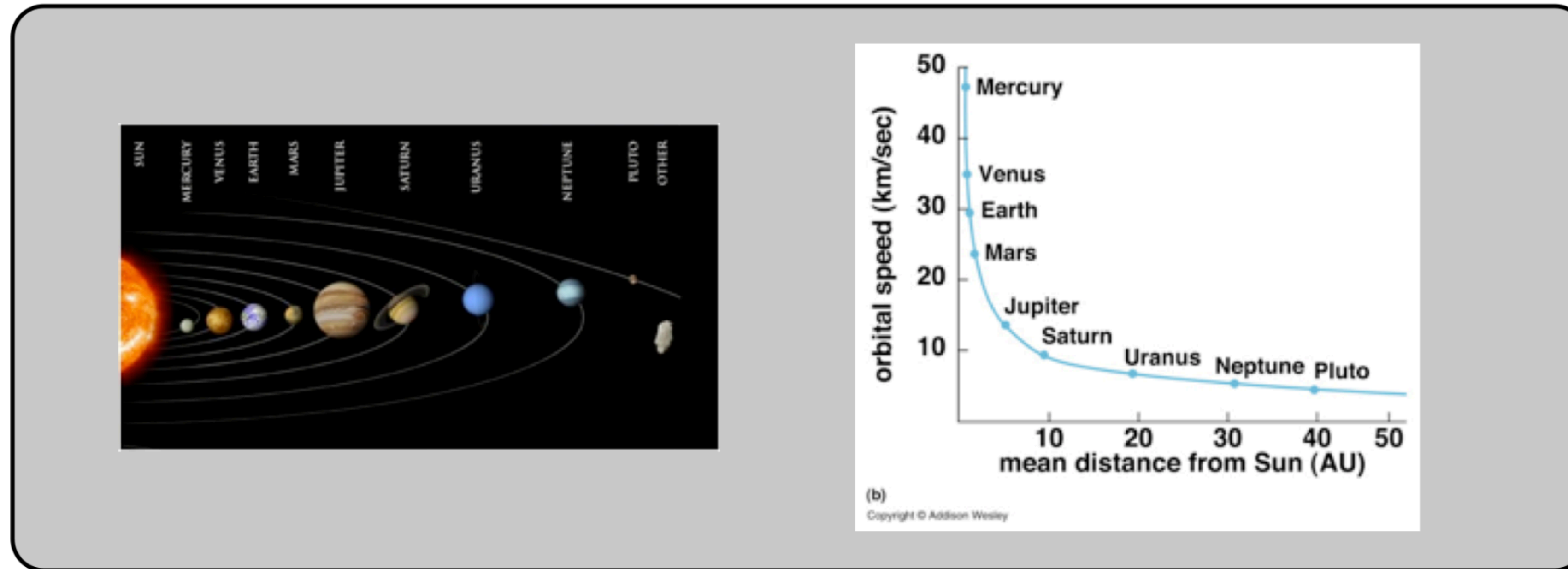
Immense succès du modèle standard

Cependant, encore beaucoup de questions sans réponses...

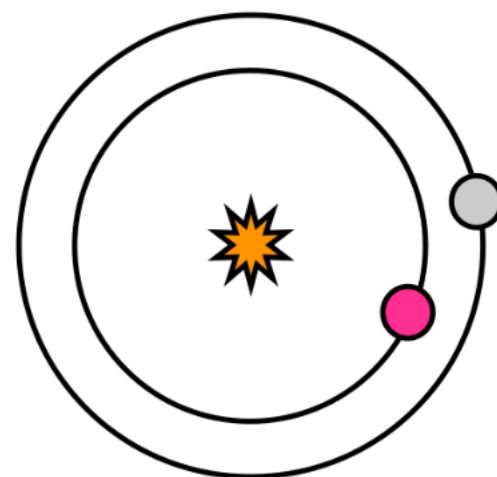
- Pourquoi y a-t-il **trois familles** de constituants ?
- Pourquoi le **quark top** est-il si lourd ?
- Où est passé l'**anti-matière** ? A l'origine, il y devait y avoir autant de matière que d'anti-matière.
- Qu'est-ce que la **matière noire** et l'**énergie noire** ?
- Comment inclure la description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



Courbes de rotation des planètes

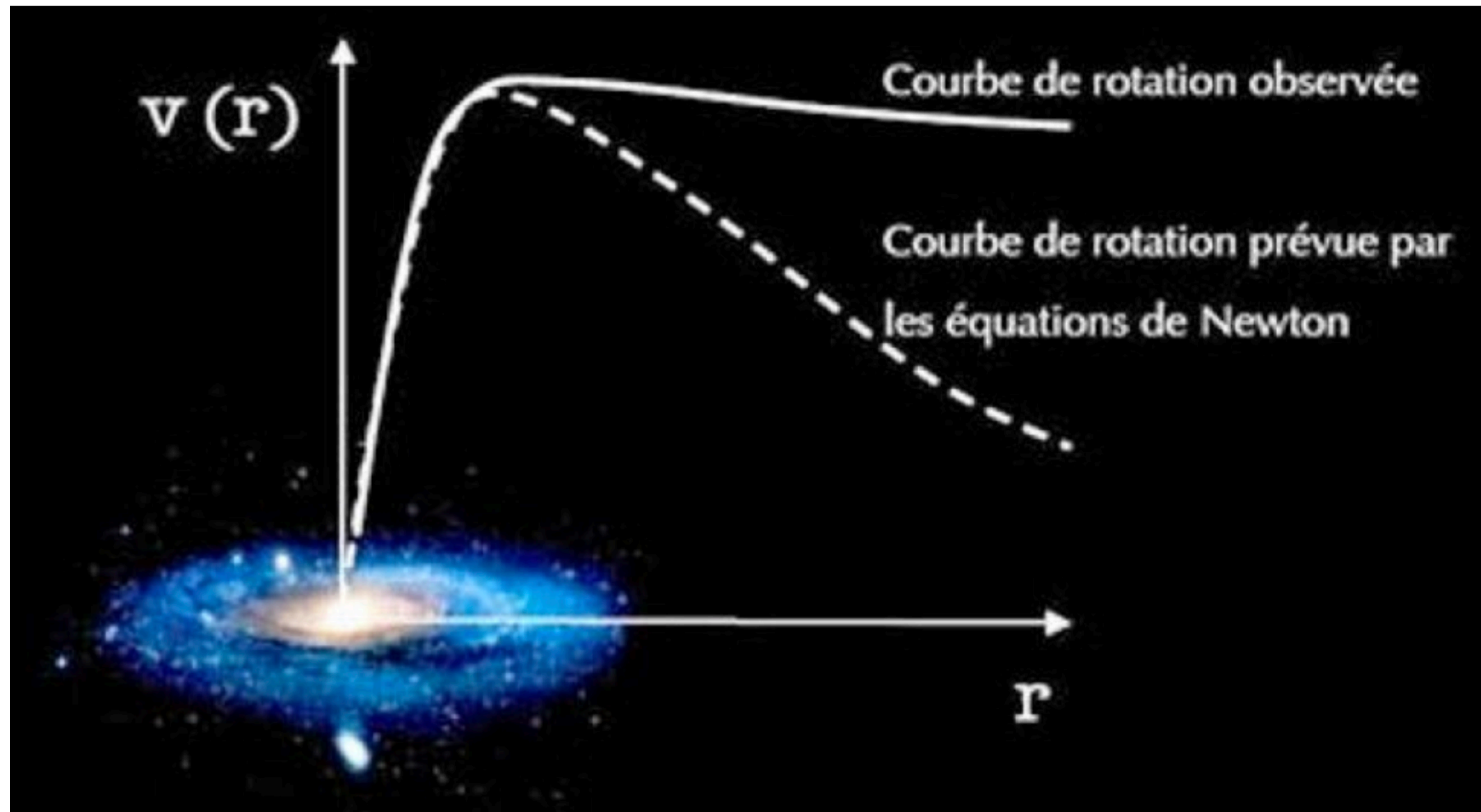


La vitesse de rotation d'une planète dépend :



- du rayon de son orbite
- de la masse contenue à l'intérieur de son orbite

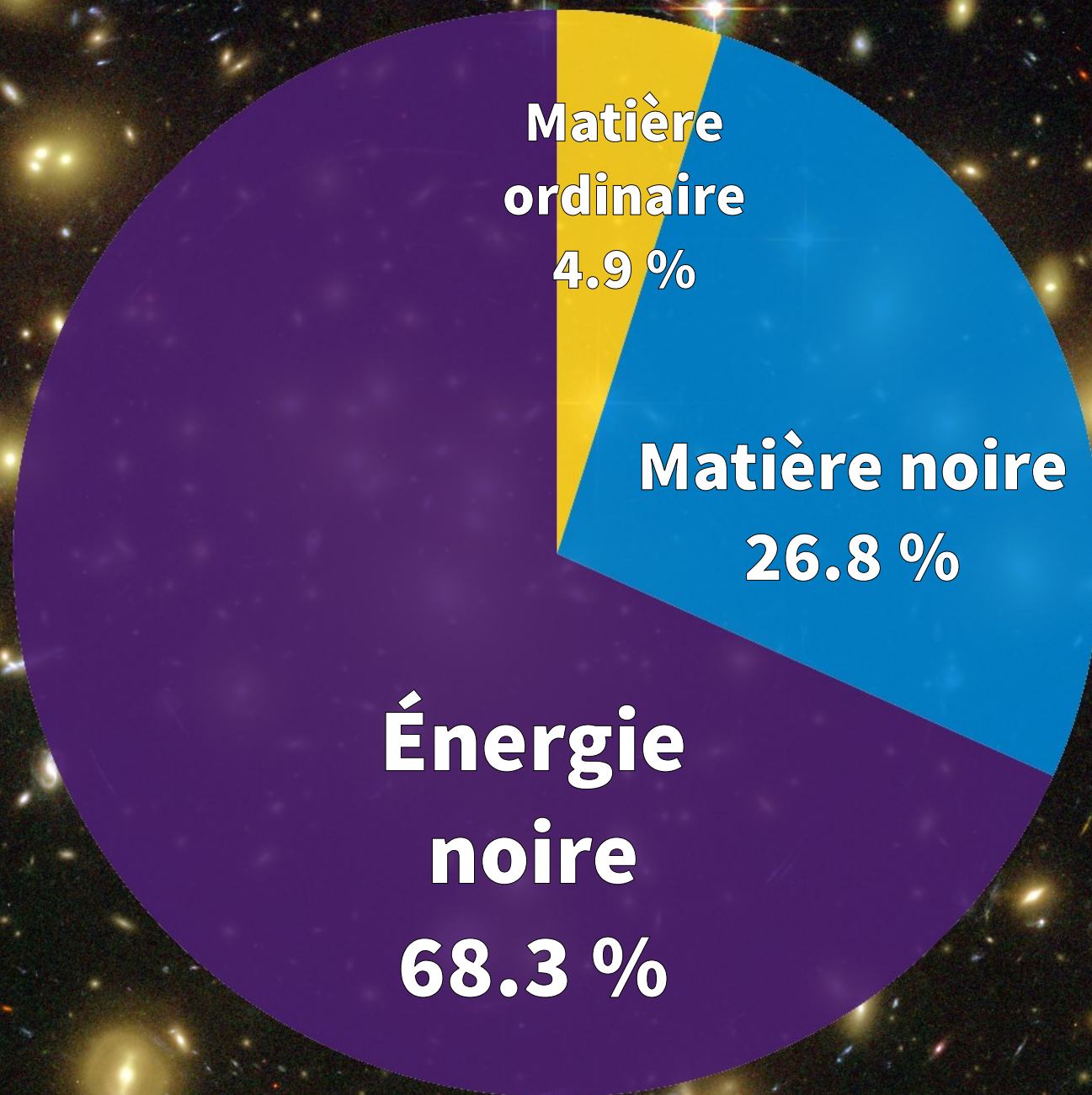
Courbes de rotation des galaxies



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



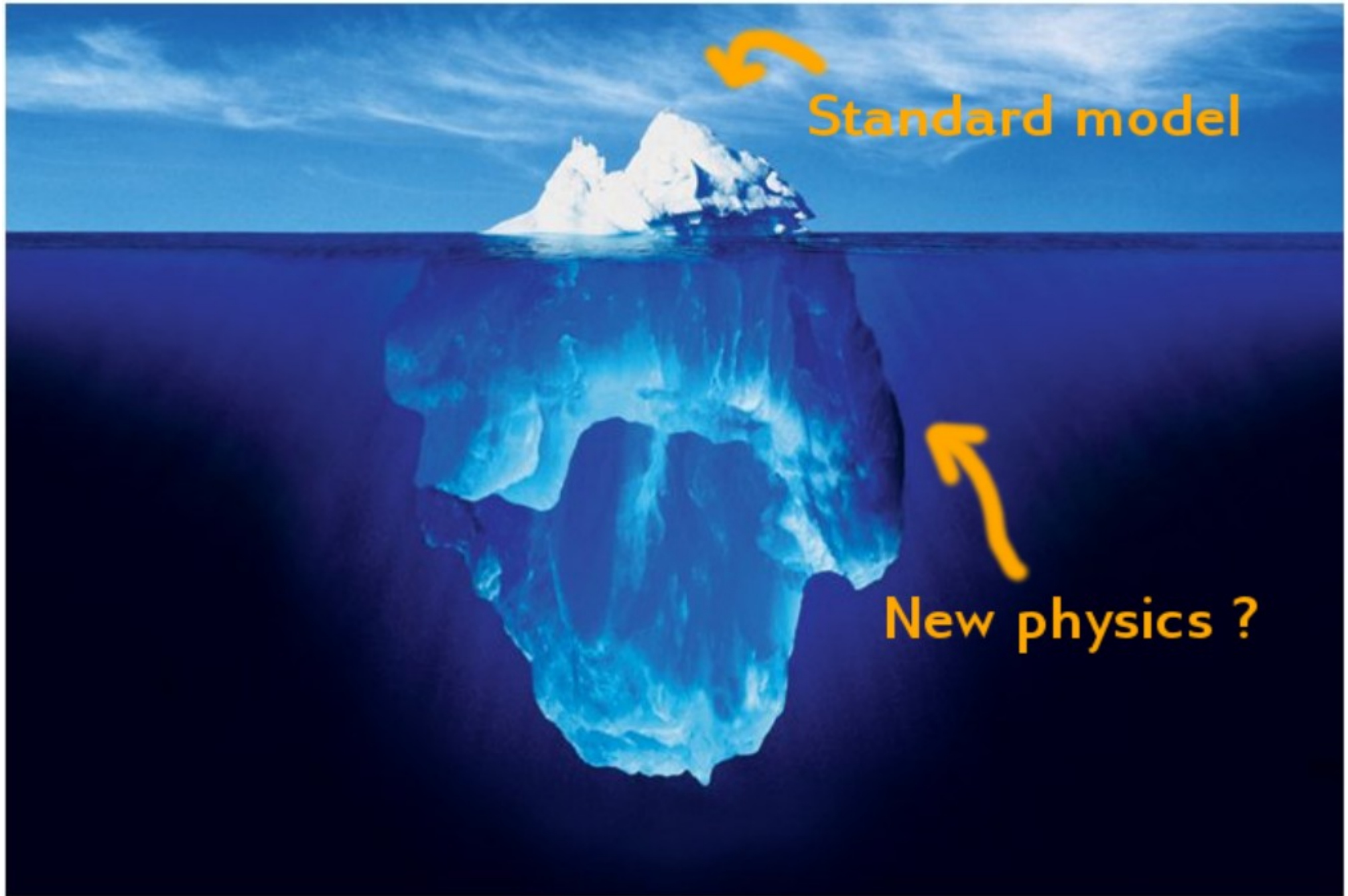
**... il doit y avoir
de la masse en plus, mais
qu'on ne voit pas !
De la « matière noire »**



**Matière
ordinaire**
4.9 %

Matière noire
26.8 %

**Énergie
noire**
68.3 %



Standard model



New physics ?