

Structure de la matière

- Du macroscopique à l'élémentaire
- Structure d'un atome et classification périodique
- Les 4 états de la matière
- Les forces/interactions fondamentales
- Le « modèle standard »

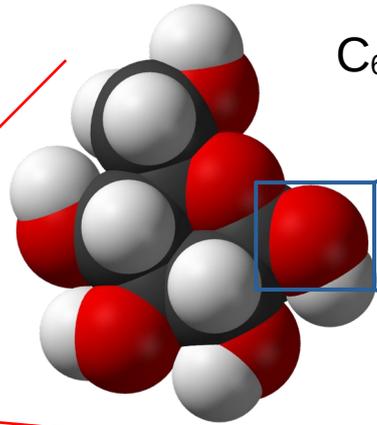
Notions utilisées :

1. Introduction

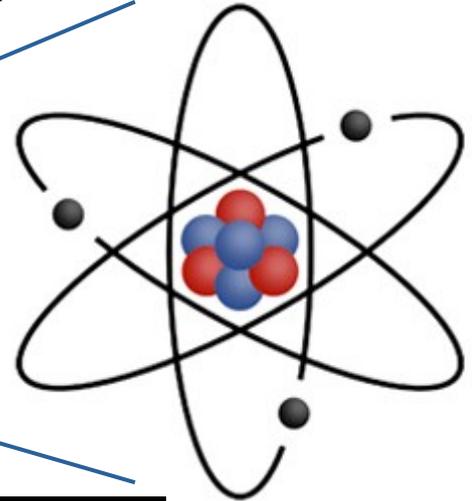
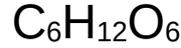
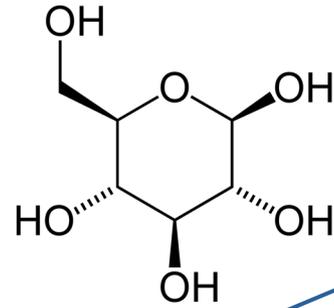
De la cellule à l'atome



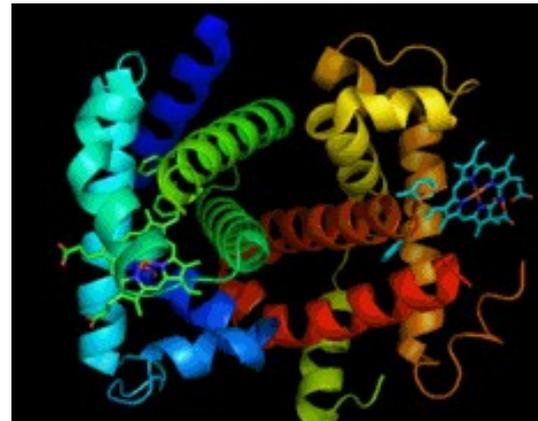
Cellule animale
(Russell Kightley)
 10^{-5} m



Molécule de glucose
 $\sim 10^{-9}$ m



Atome
(CNRS)
 $\sim 10^{-10}$ m



Molécule d'hémoglobine

Les ions

Un « **ion** » est un atome ou une molécule qui perd ou gagne un ou plusieurs électrons

- N'est **plus électriquement neutre**
- **Cation** (+) / **anion** (-)
- Exemple :
 - Na^+ , Mg^{2+}
 - Cl^- , SO_4^{2-}

Convient pour la préparation des aliments des nourrissons

| Analyse (mg/l) | | | |
|--------------------------------|-------|--|-------|
| Calcium (Ca^{2+}) | : 0,8 | Hydrogénocarbonates (HCO_3^-) | : 3,6 |
| Sodium (Na^+) | : 6,7 | Sulfates (SO_4^{2-}) | : 2,0 |
| Magnésium (Mg^{2+}) | : 1,0 | Chlorures (Cl^-) | : 14 |
| Potassium (K^+) | : 0,2 | Nitrates (NO_3^-) | : 1,6 |

Extrait sec à 180°C : 40mg/l - pH : 5
Production de la Source des Montagnes d'Arrée
Source des MONTAGNES D'ARRÉE - ZA de Ty Douar - 29450 COMMANA

Structure de l'atome (2)



- Les **électrons** orbitent autour du **noyau**, organisés en « **couches** »
 - Couche 1 (« K ») : 2 électrons
 - Couche 2 (« L ») : 8 électrons
 - Couche 3 (« M ») : 8 électrons (+10)
 - ...
- Éléments classés dans une « **table périodique des éléments** »
 - Formalisée par Dmitri Mendeleïev en 1869 à **partir des propriétés chimiques** (la place représente la configuration électronique)
 - La légende veut que la table lui soit apparue en rêve (2 fois...)
 - A permis de **prédire l'existence d'éléments encore inconnus** : scandium (Z=21), gallium (Z=31), germanium (Z=32)...

Les **liaisons** entre atomes

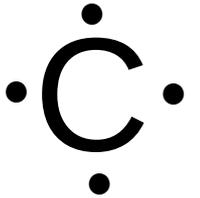
- **Règle de l'octet** : un atome « aime » avoir **8 électrons** sur sa couche externe (de **valence**)



- Détermine ses propriétés chimiques

- Sauf 1ère ligne de la table périodique : H, He

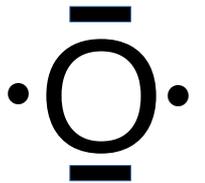
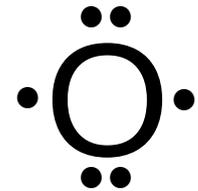
- 2 électrons (règle du « duet »)



- Electrons propres : électrons de « valence »

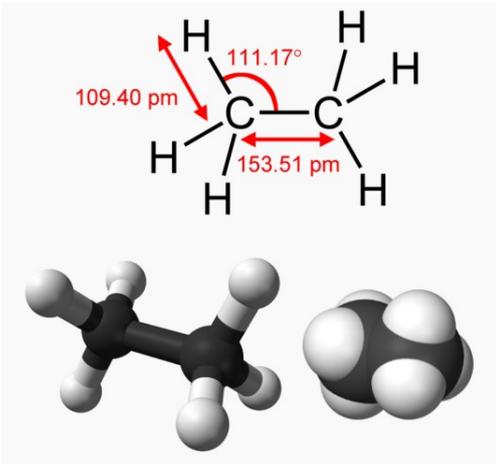
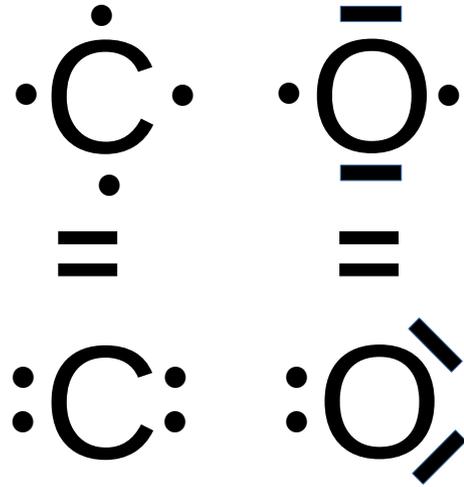
- ou partagés : **liaisons « covalentes »**

= mise en commun d'électrons

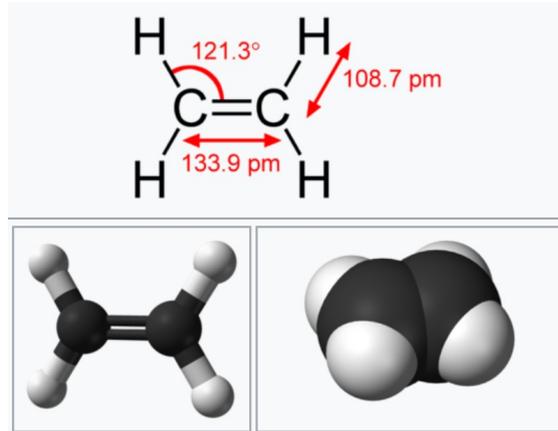


Les molécules

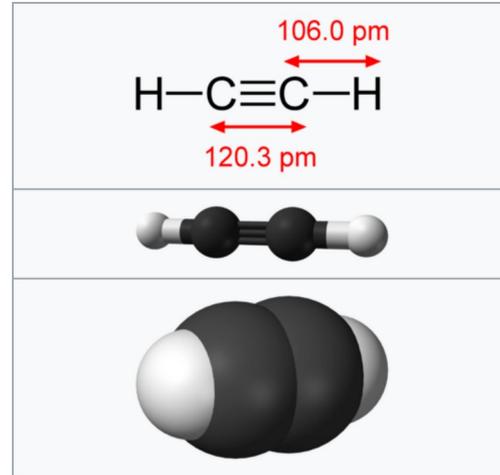
- Assemblages d'atomes liés par des **liaisons covalentes (simples, doubles ou triples)**
- Exemple : le carbone (4 électrons de valence)



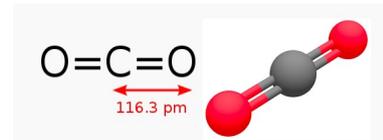
éthane



éthène (éthylène)



éthyne (acétylène)



dioxyde de carbone

Les 4 états de la matière (1)

- **L'état solide**

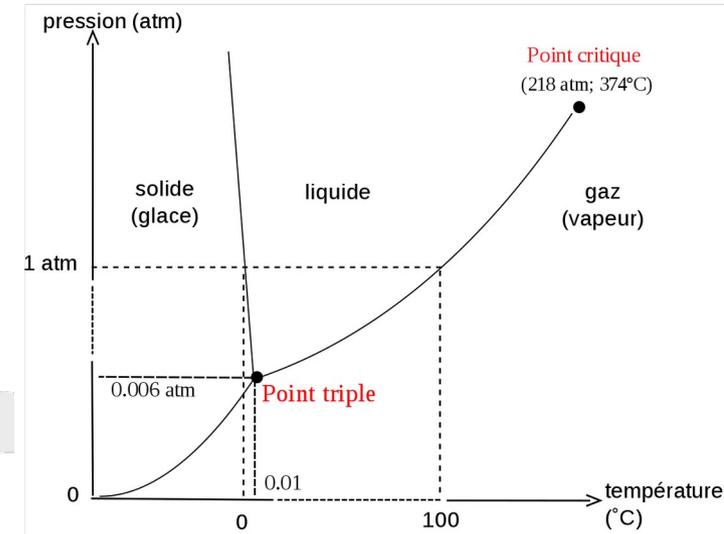
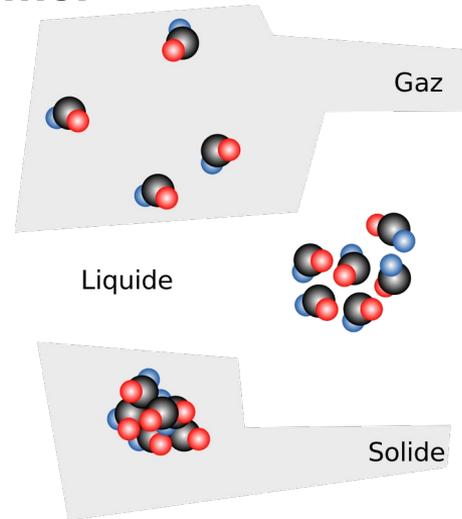
- A une **forme propre** et un **volume propre**
- **Transmet les forces sans se déformer**

- **L'état liquide**

- **Pas de forme propre/déformable**
- **Transmet les pressions**
- Les particules restent proches

- **L'état gazeux**

- **ni forme propre, ni volume propre**
 - **tend à occuper tout le volume disponible**
- Les particules sont très faiblement liées

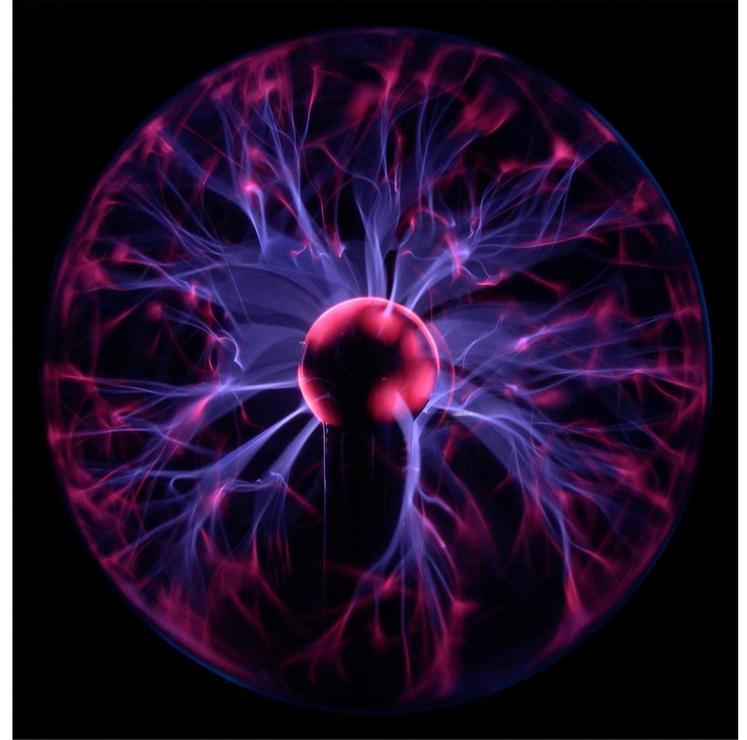


Les 4 états de la matière (2)

Les plasmas représentent **plus de 99 % de la matière ordinaire** dans l'Univers

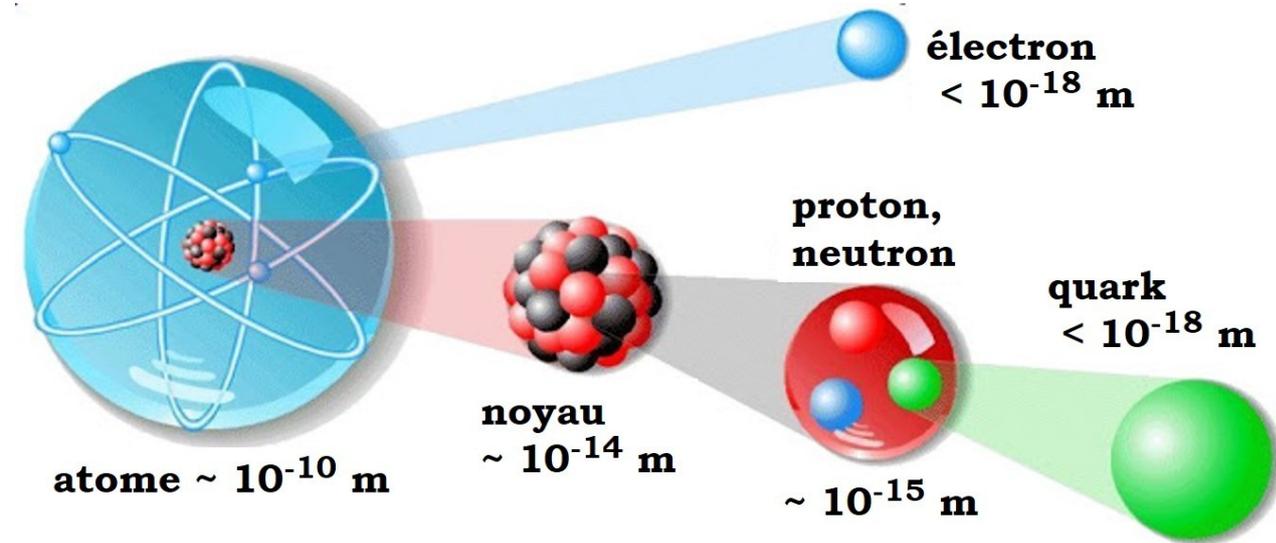
Exemple :

Plasma d'électrons et d'ions
(gaz ionisé conducteur)



« Lampe à plasma »

De l'atome aux particules élémentaires



$$m_e = 9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$m_P \approx m_N = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg} \approx 1840.m_e$$

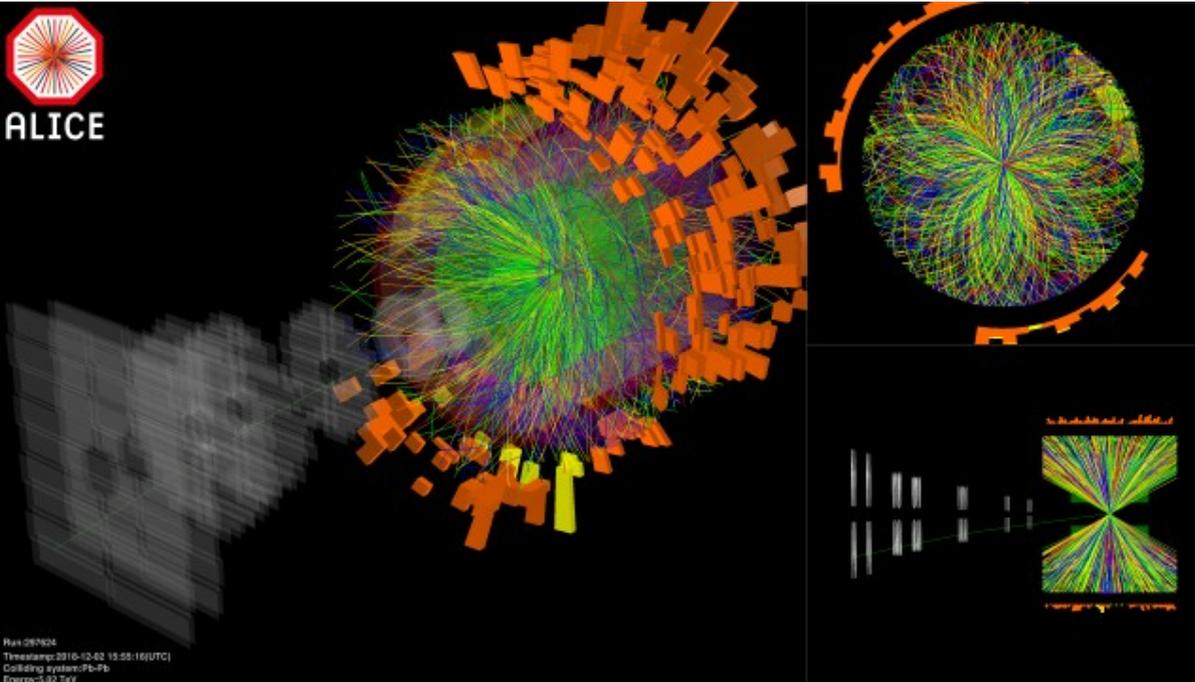
- 99,98 % de la masse de l'atome de lithium sont dans le noyau
- Attention, on ne peut pas dire que 99,9 % de la matière sont vides...
- **Quarks et électrons = particules « élémentaires »**
 - indivisibles
 - de taille inconnue

Les 4 états de la matière (3)

Le plasma de quarks et de gluons

Les quarks et les gluons ne sont plus confinés dans des noyaux

À très haute énergie/température : 10^{12} K, soit 10^5 fois la T_p du Soleil



Détecteur ALICE au CERN
(collisions d'ions)

Images : CERN

Les forces fondamentales

Elles gouvernent les **interactions** entre les particules

Elles sont transmises par des « **bosons vecteurs** »

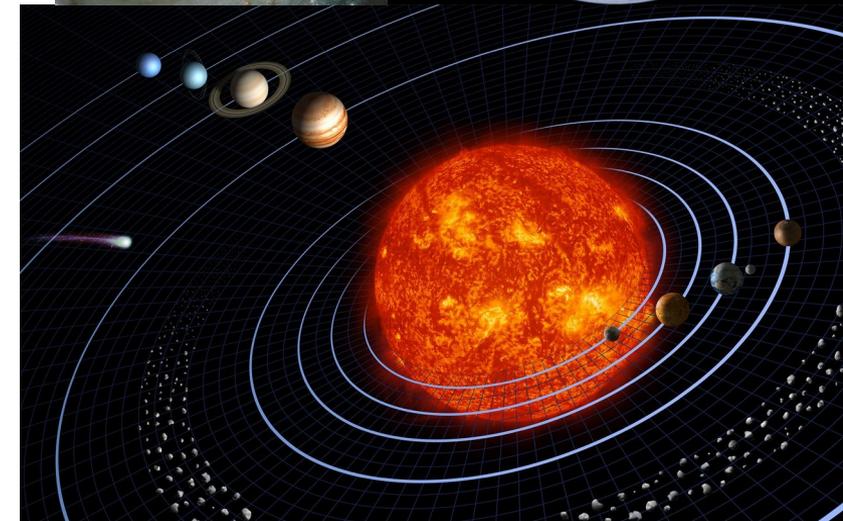
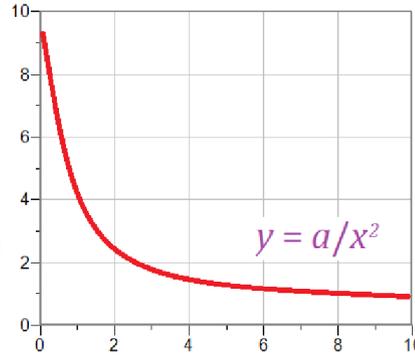
| Interaction | Théorie courante | Médiateurs | Masse (GeV/c ²) | Puissance relative approximative | Rayon d'action (m) | Dépendance de distance |
|-------------------|----------------------------------|-----------------------|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| Forte | Chromodynamique quantique (QCD) | huit gluons | 0 | 1 | $2,5 \times 10^{-15}$ | $\frac{1}{r^7}$ |
| Électromagnétique | Électrodynamique quantique (QED) | photon | 0 | 10^{-2} | ∞ | $\frac{1}{r^2}$ |
| Faible | Théorie électrofaible | W^+ , W^- , Z^0 | 80, 80, 91 | 10^{-5} | 10^{-18} | $\frac{1}{r^5}$ à $\frac{1}{r^7}$ |
| Gravitation | Relativité générale | graviton (postulé) | 0 | 10^{-40} | ∞ | $\frac{1}{r^2}$ |

La force gravitationnelle

$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = -G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \cdot \vec{e}_{12} = -\vec{F}_{2 \rightarrow 1}$$

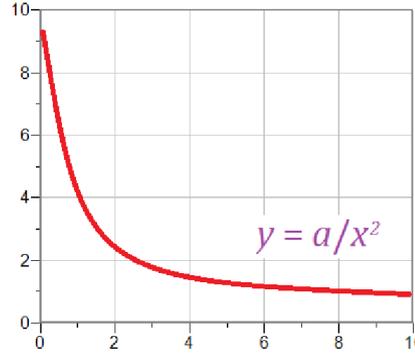
$G = 6,674 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2.\text{kg}^{-2}$
constante gravitationnelle

- S'exerce **entre 2 objets massifs**
- **Toujours attractive**
- Force en « **1 sur r^2** » : **portée infinie**
- Responsable de :
 - La gravité terrestre
 - Les marées
 - différence entre les 2 faces de la Terre
 - La formation des planètes et des étoiles
 - L'existence de systèmes liés
 - Terre-Lune, Système Solaire, galaxies
- **Très faible intensité** mais l'emporte *in fine* sur les autres forces dans les phénomènes astrophysiques
 - Notamment dans la vie d'une étoile



La force électromagnétique

- S'exerce entre des charges électriques
- Force en « 1 sur r^2 » :
 - portée infinie
 - Très intense à courte distance
- Peut être :
 - **Attractive** (charges opposées)
 - **Répulsive** (charges de même signe)



$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = 4 \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \cdot \vec{e}_{12} = -\vec{F}_{2 \rightarrow 1}$$

$$\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ A}^2 \cdot \text{s}^4 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$$

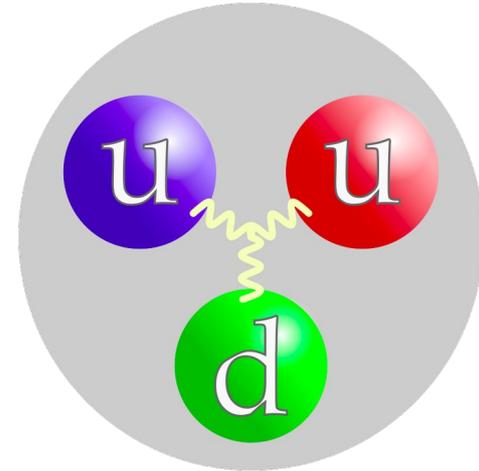
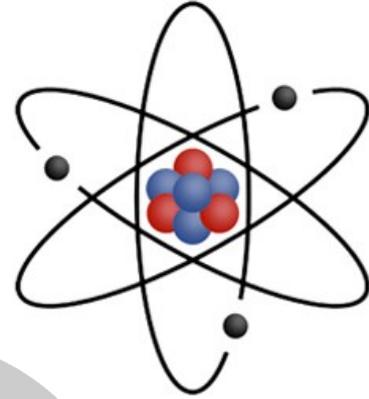
permittivité du vide



- Responsable de :
 - Phénomènes électriques/électrostatiques
 - La cohésion des atomes
 - (électrons autour des noyaux)
 - L'existence des molécules
 - Liaisons atomiques

La force (nucléaire) forte

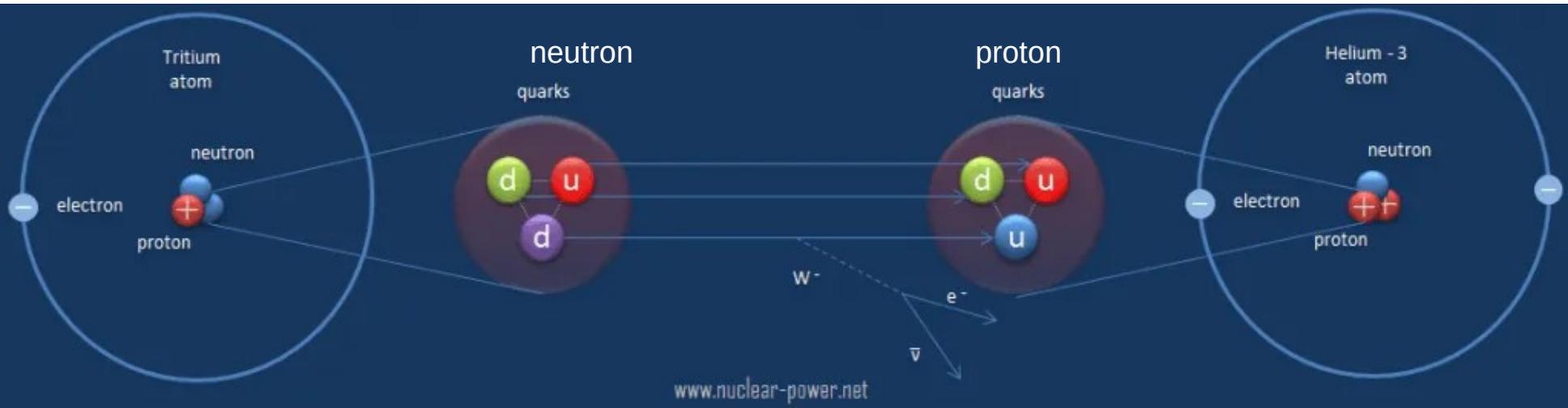
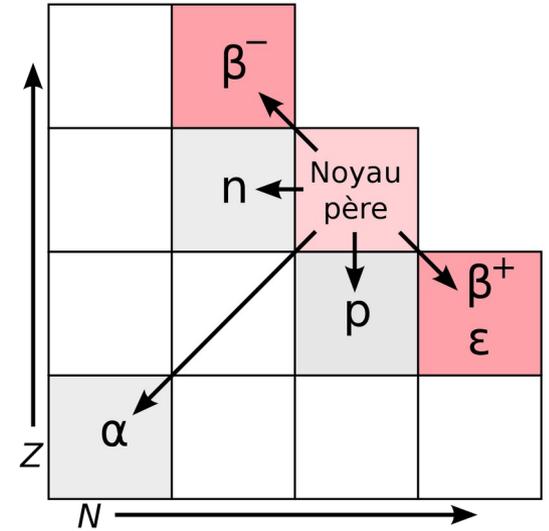
- **Force électrique répulsive très importante** dans un noyau
 - Car protons chargés positivement
 - \Rightarrow le noyau **ne devrait pas être stable**
- La FF permet la **cohésion des noyaux**
 - et des nucléons (protons et neutrons)
 - S'oppose à la force électrostatique répulsive
- **Très intense**, d'où son nom
- **Très courte portée** : 10^{-15} m (noyau)



Représentation de la force forte dans un proton (uud)

La force (nucléaire) faible

- Peut **transformer** une particule en une autre
- À l'origine de certains types de **radioactivité**
 - β^- (un neutron est transformé en proton) : émission d'un e^-
 - β^+ (un proton est transformé en neutron) : émission d'un e^+
 - **Capture électronique ϵ** : un proton absorbe un $e^- \rightarrow$ neutron
 - Permet la **nucléosynthèse dans une étoile**
- **Très courte portée** : $10^{-17} - 10^{-18}$ m



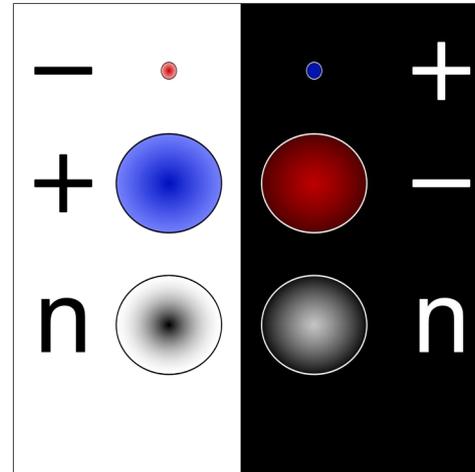
Le « modèle standard »

Ensemble des **particules élémentaires** et des **bosons vecteurs** qui composent toute la matière connue

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

Ne sont pas représentés :

- Les **antiparticules** des quarks et des leptons (charge opposée)



Comparaison de la charge des particules (à gauche) et celle des antiparticules (à droite) ; avec de haut en bas : électron et positron, proton et antiproton, neutron et antineutron (wikipedia)

- Le **graviton** (pas encore détecté)