

# Physique nucléaire

Physique



# Évolution du modèle atomique

Democritus 460 BC  
and Dalton 1803 AD



Thomson  
1897



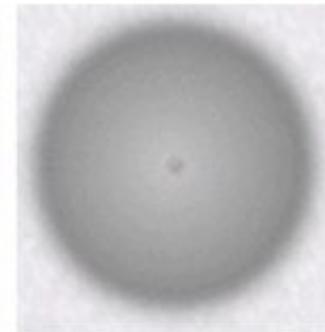
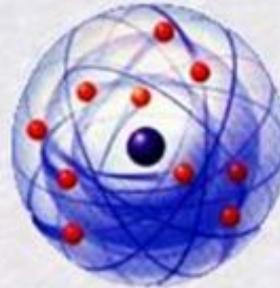
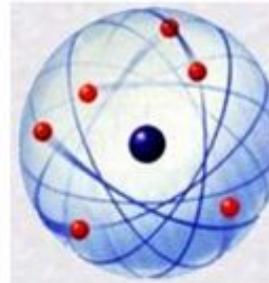
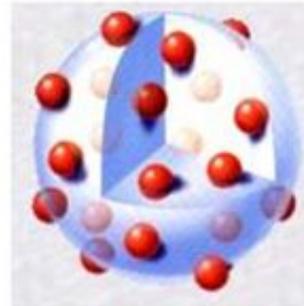
Rutherford  
1912



Bohr  
1913

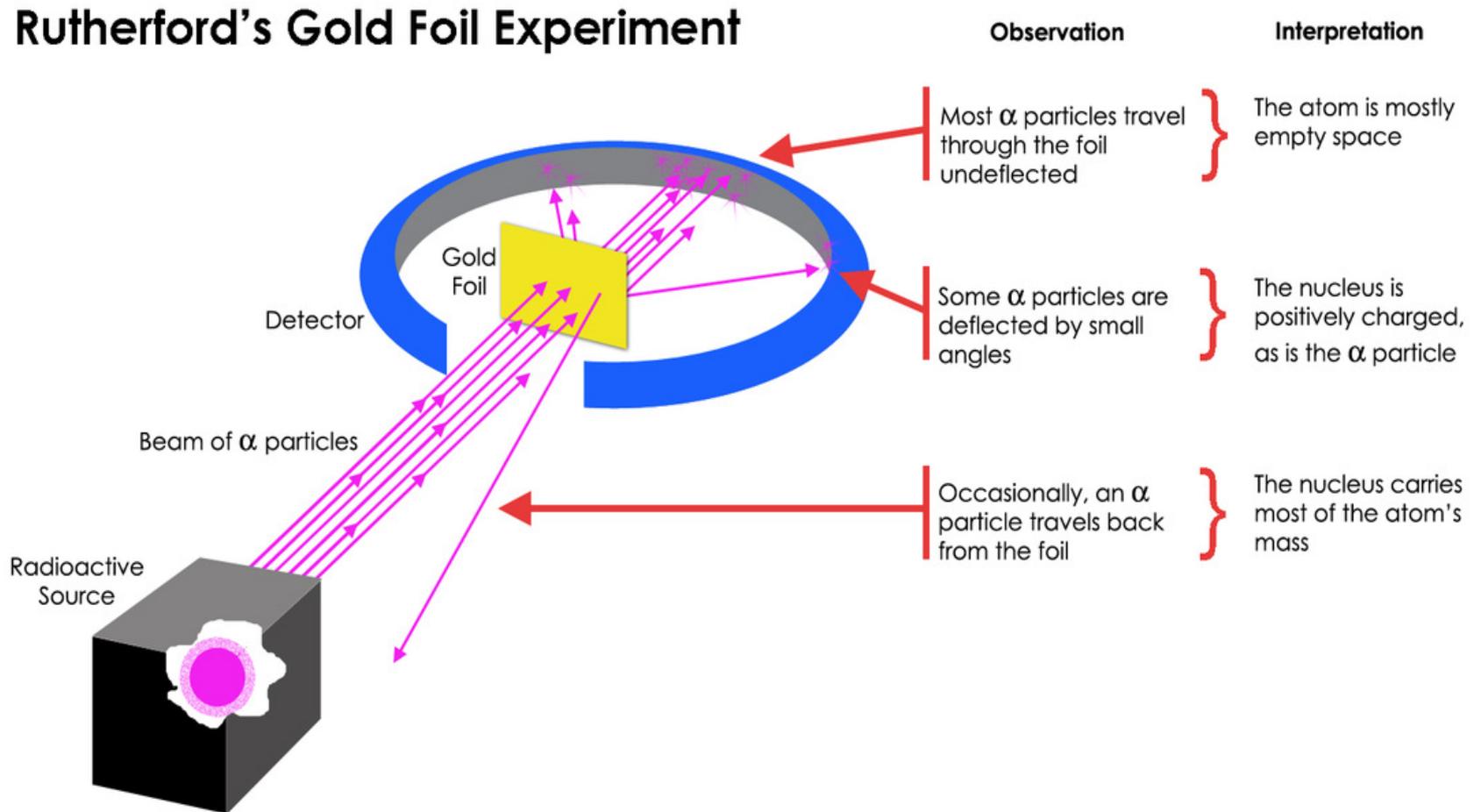


Modern  
Quantum  
Cloud Model  
post 1930

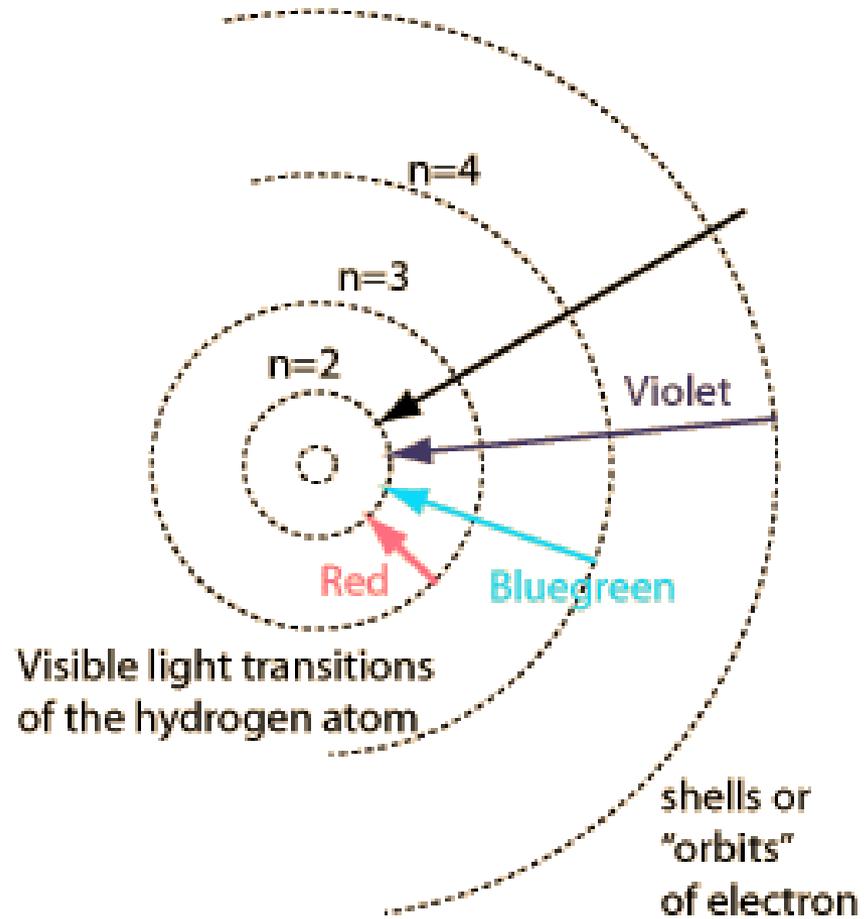
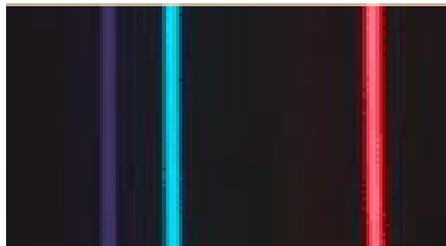
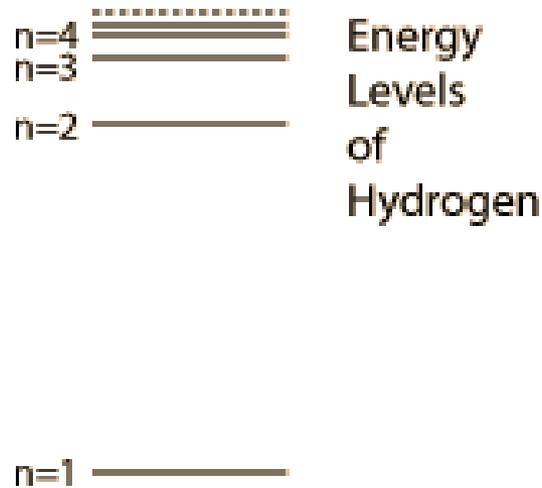


# Découverte du noyau

## Rutherford's Gold Foil Experiment

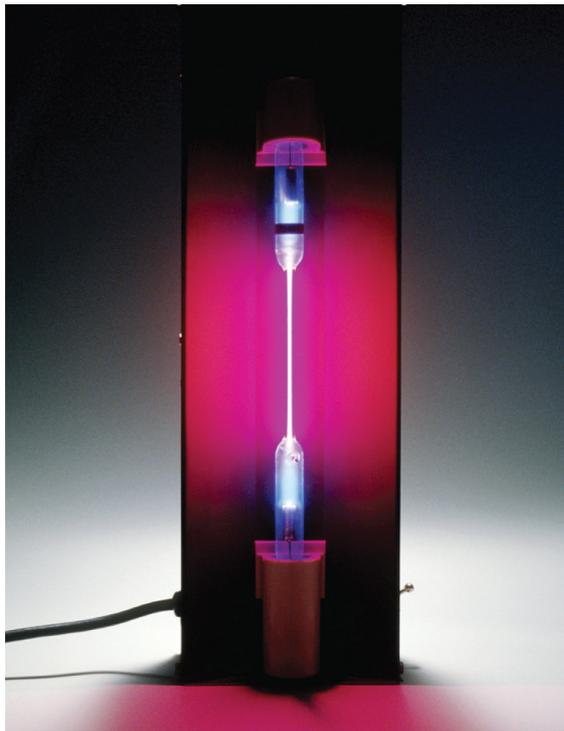


# Le modèle de Bohr

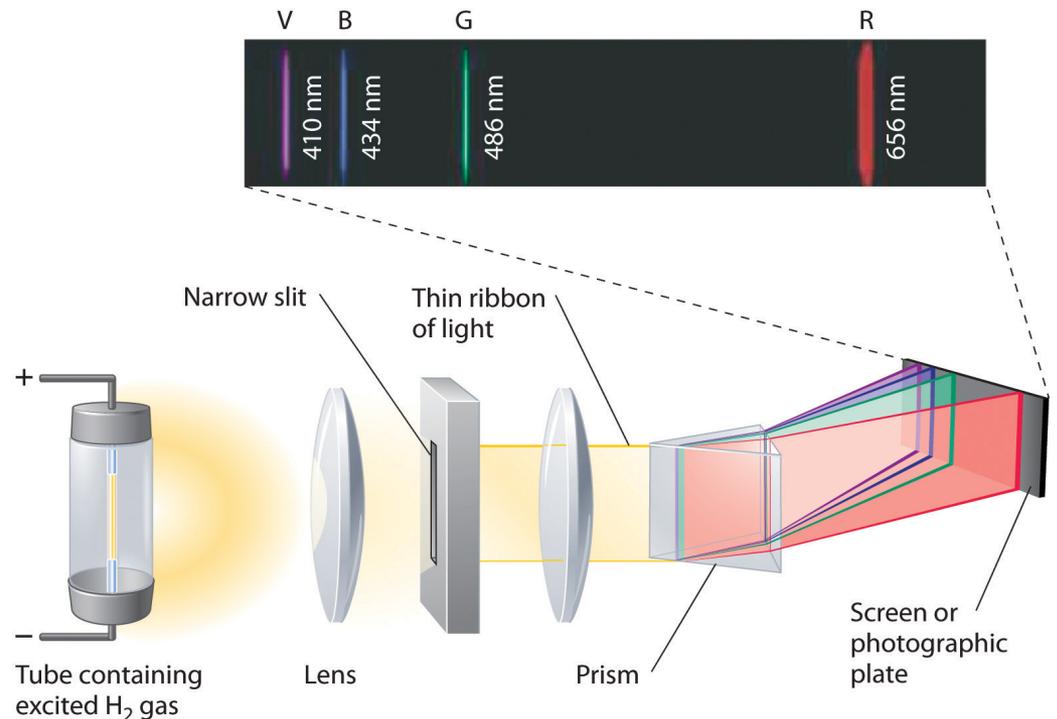


# Les spectres d'émission

Un échantillon de gaz soumis à une source d'énergie émet un spectre de raies caractéristique de cet élément.



(a)

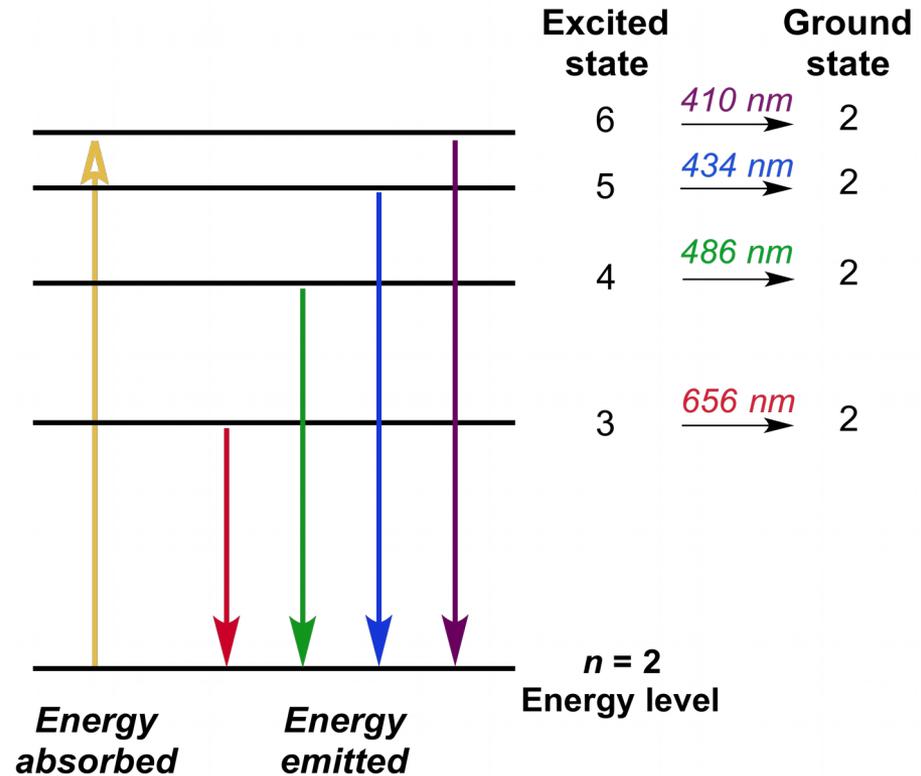


(b)

# Les niveaux d'énergie

Le spectre d'émission met en évidence des niveaux d'énergie discrets que l'électron excité peut occuper. En redescendant à son état fondamental, il émet de l'énergie sous forme de lumière, ie sous forme de photons.

$$E = hf \text{ ou } E = \frac{hc}{\lambda}$$

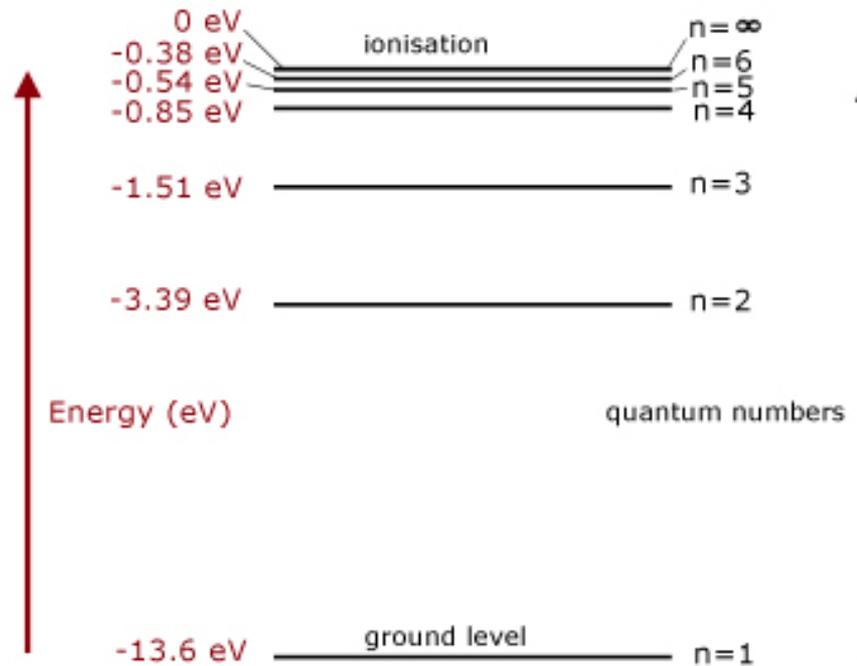


# Exemple

Quelle est la couleur émise lors du passage d'un électron de  $n=3$  à  $n=2$  ?

$$1\text{eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$



# Électron = onde ou particule ?

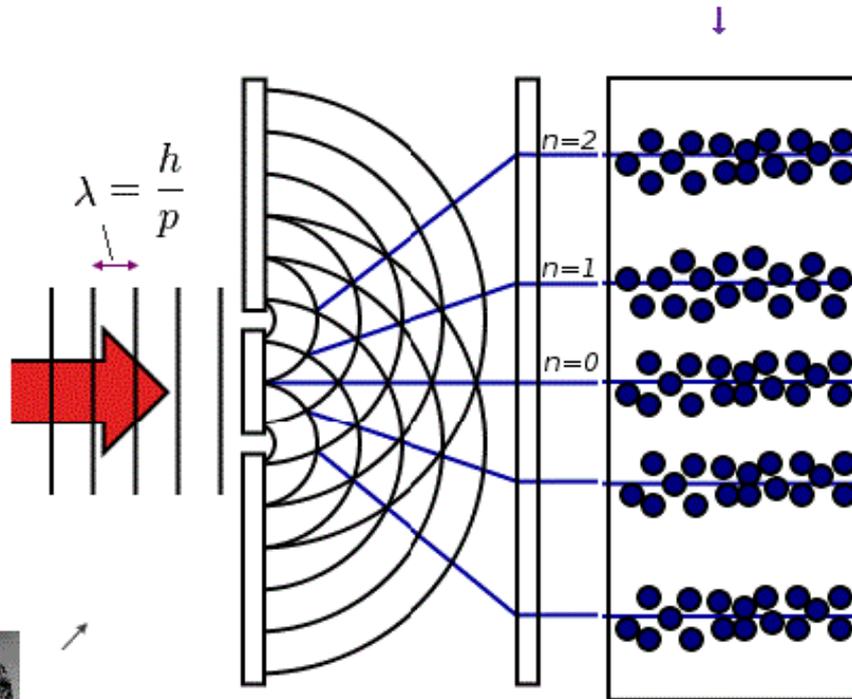


electron  
 $e^-$

$$\lambda = \frac{h}{p}$$



Davisson



# Numéro atomique et nombre de masse

- Le **numéro atomique** est le nombre de protons de l'atome.
- Le **nombre de masse** est le nombre de nucléons de l'atome.
  - Nucléons = composants du noyau
  - Nucléons = protons + neutrons
- **Isotopes** = même numéro atomique mais nombre de masse différent. Les radioisotopes sont des isotopes **radioactifs**.

$$\text{Unité de masse atomique} = \frac{1}{12} \times \text{masse du } {}^1_6\text{C}$$

$$1 \text{ u} = 1,6605402 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

# Exemple

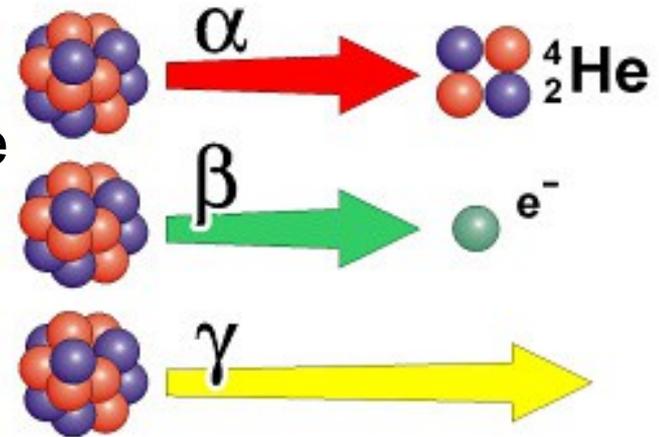
Calcule la charge en Coulombs et la masse en kg  
d'un noyau de  ${}_{26}^{54}\text{Fe}$



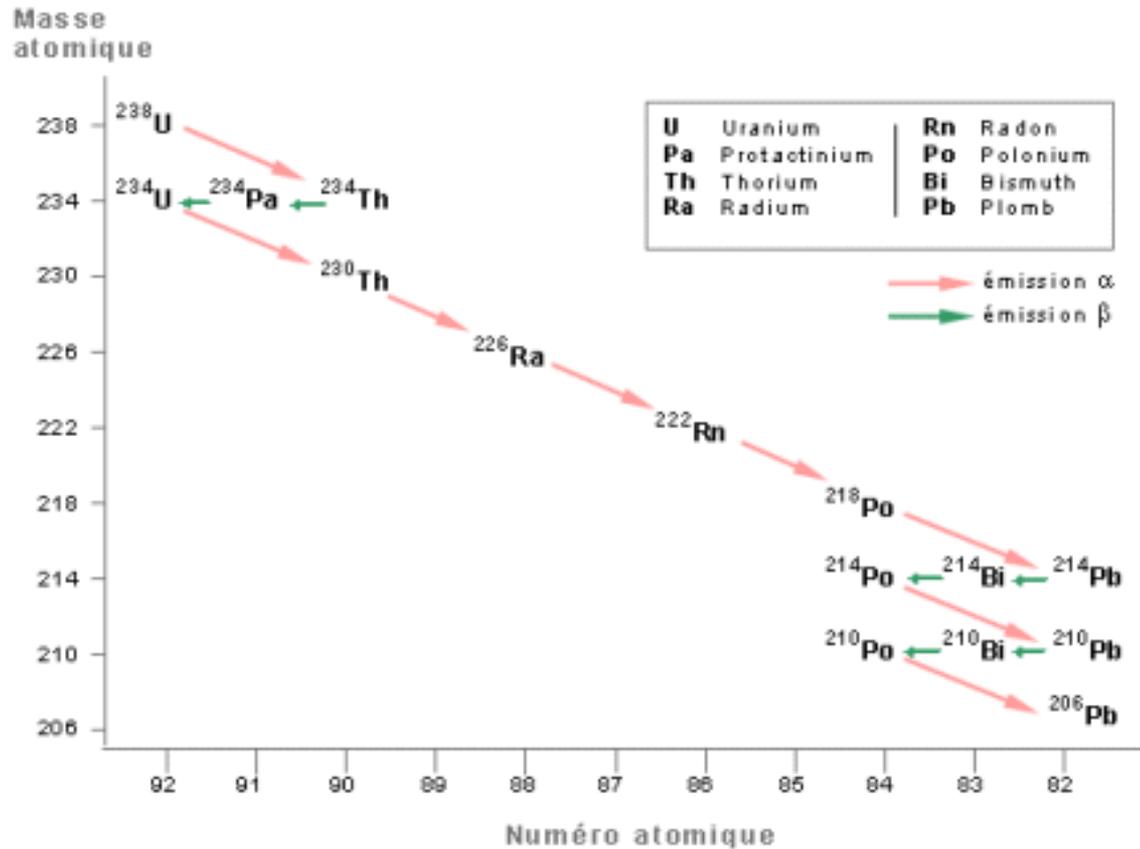
# Désintégration radioactive

Lorsque des atomes radioactifs se désintègrent, ils émettent de l'énergie sous forme de rayonnements :

- Rayonnement  $\alpha$  : émission d'une particule  $\alpha$  (noyau d'hélium)
- Rayonnement  $\beta^-$  : émission d'un électron suite à la transformation d'un neutron en proton
- Rayonnement  $\beta^+$  : émission d'un positron suite à la transformation d'un proton en neutron
- Rayonnement  $\gamma$  : émission d'énergie pure



# Chaîne de désintégration



Ce diagramme montre le chemin suivi pour arriver à un atome stable.

# Example

- Écris l'équation pour la désintégration beta du scandium-47
- Écris l'équation de désintégration alpha qui produit du samarium-146
- Écris l'équation de désintégration du curium-244 sachant qu'elle produit deux rayonnements alpha et trois rayonnements gamma.



# Décroissance radioactive

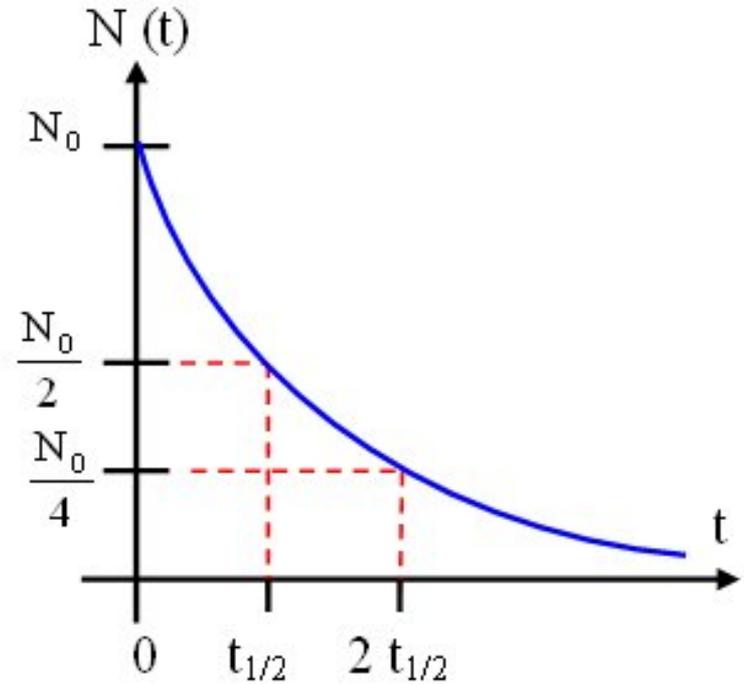
La vitesse de désintégration est proportionnelle au nombre de noyaux restants :

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda N$$

donc

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

La décroissance est exponentielle.

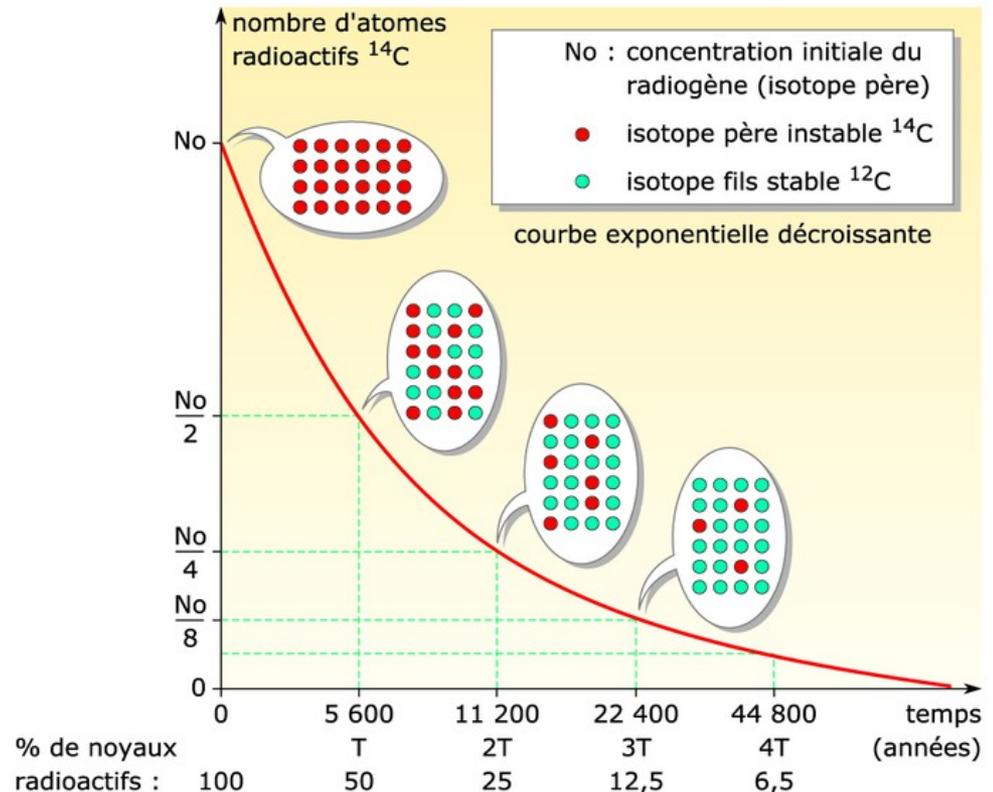


# Demi-vie

La demi-vie ou période radioactive, est le temps nécessaire pour que la moitié des noyaux soit désintégrée.

| Nom des éléments radioactifs | Période radioactive    |
|------------------------------|------------------------|
| Radon 222 .....              | 4 jours                |
| Iode 131 .....               | 8 jours                |
| Césium 137 .....             | 30 ans                 |
| Carbone 14 .....             | 5500 ans               |
| Plutonium 239 ..             | 24 100 ans             |
| Uranium 234 .....            | 245 000 ans            |
| Uranium 235 .....            | 710 000 000 ans        |
| Uranium 238 .....            | 4,5 milliards d'années |

Décroissance radioactive du  $^{14}\text{C}$



# Exemple

Le césium-137 a une demi-vie de 30 ans. Combien reste-t-il de césium après 90 ans si l'échantillon de départ était de 1,0 g ?

Quel est l'âge d'un os qui contient 0,3125 g de carbone-14 alors qu'il en avait 80,0000 g au départ ?

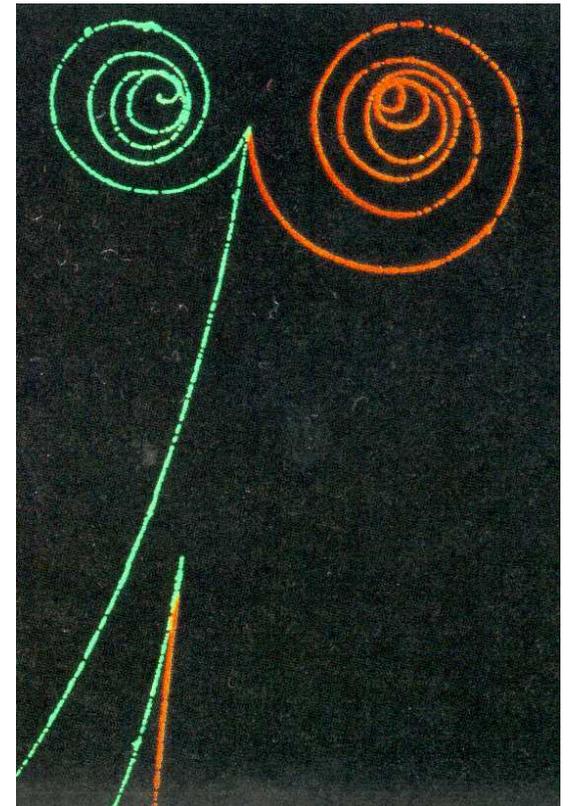
Quelle est la demi-vie d'un radioisotope s'il reste 62,5 g d'un échantillon de 500,0 g après 24,3 h ?

# Énergie = matière

L'équivalence entre énergie et matière est mise en évidence par l'équation d'Einstein :

$$E = mc^2$$

Production d'un électron  
(vert) et d'un positron  
(rouge) à partir d'un rayon  
gamma



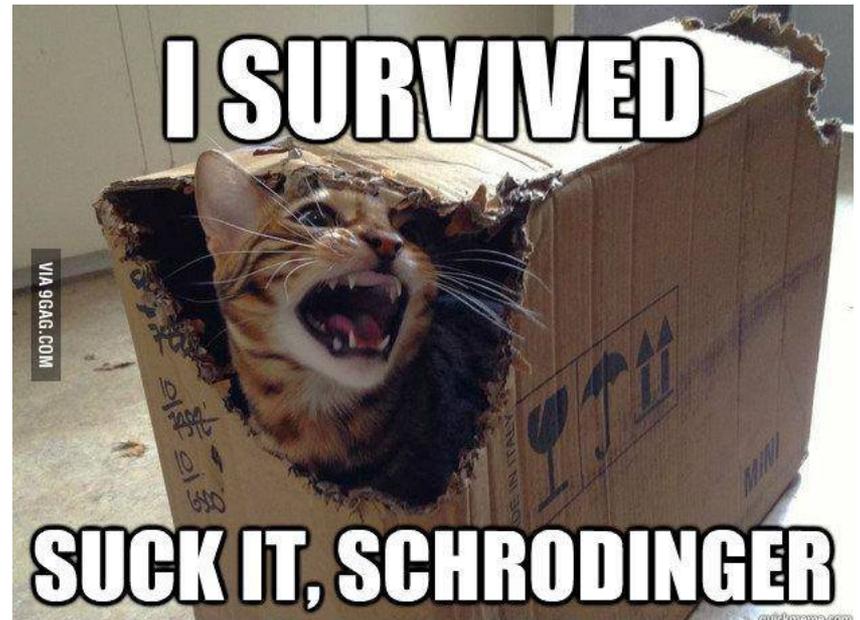
# Exemple

Quel est l'équivalent en eV de la masse d'un électron ?

Masse de l'électron =  $9,1 \times 10^{-31}$  kg

vitesse de la lumière =  $3 \times 10^8$  m.s<sup>-1</sup>

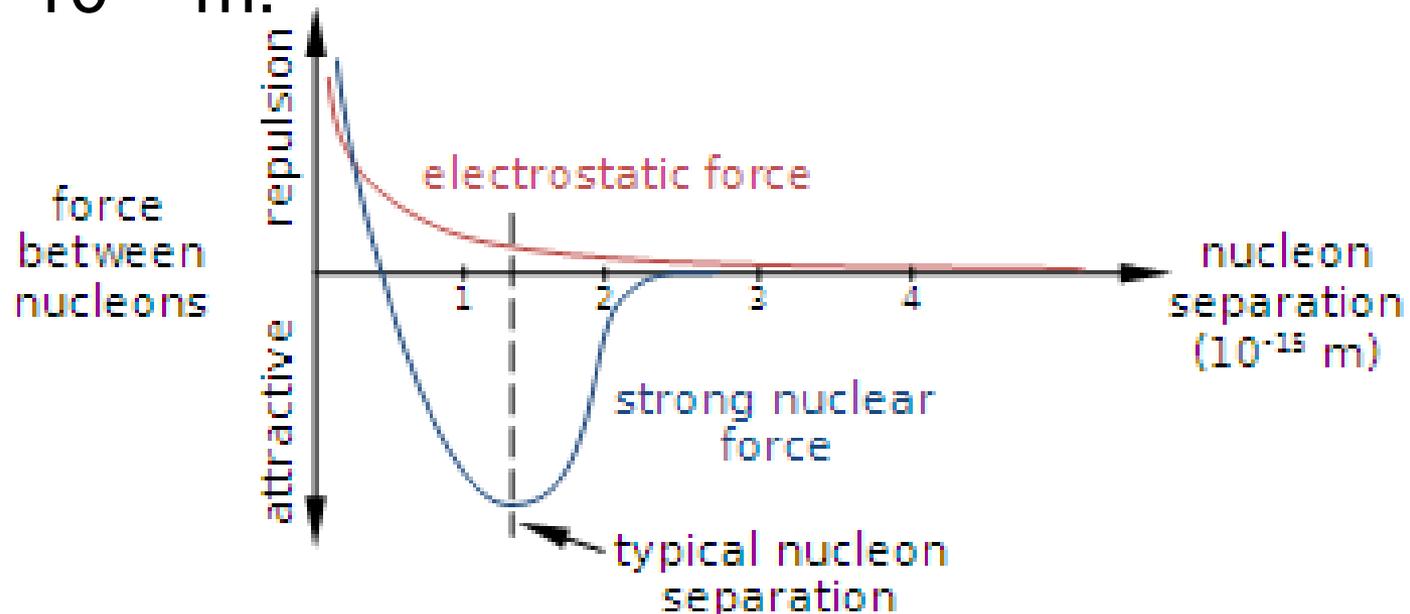
1 eV =  $1,6 \times 10^{-19}$  J



# La force nucléaire

La stabilité du noyau est assurée par la force nucléaire, une force d'attraction entre les nucléons, attractive quand les nucléons se séparent et répulsive lorsqu'ils se rapprochent.

Cette force n'agit que sur de très courtes distances,  $10^{-15}$  m.



# Le défaut de masse

La somme des masses de tous les protons et de tous les neutrons est supérieure à la masse du noyau. On définit donc le défaut de masse comme :

$\delta = \text{masse des nucléons} - \text{masse du noyau}$

$$\delta = Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\text{noyau}}$$

# Exemple

Calcule le défaut de masse de l'or-197 sachant que la masse du noyau est de 196,924 u.

# Exemple

Calcul du défaut de masse du noyau de  ${}^{54}_{26}\text{Fe}$

$$\begin{aligned}\Delta m &= \text{masse des nucléons} - \text{masse du noyau} \\ &= \text{masse de 26 protons} + \text{masse de 28 neutrons} - \text{masse du noyau} \\ &= 26 m_p + 28 m_n - \text{masse noyau Fe} \\ &= 26 (\text{masse atomique H}) + 28 m_n - \text{masse atomique Fe} \\ &= 26 \times 1,00782 + 28 \times 1,00866 - 53,9396 = 0,5062 \text{ u.}\end{aligned}$$

Or  $1 \text{ u} = 931,5 \text{ MeV}$  donc  $\delta = 471,5 \text{ MeV}$

# L'énergie de liaison nucléaire

L'énergie de liaison nucléaire est la quantité d'énergie requise pour séparer les nucléons d'un noyau atomique.

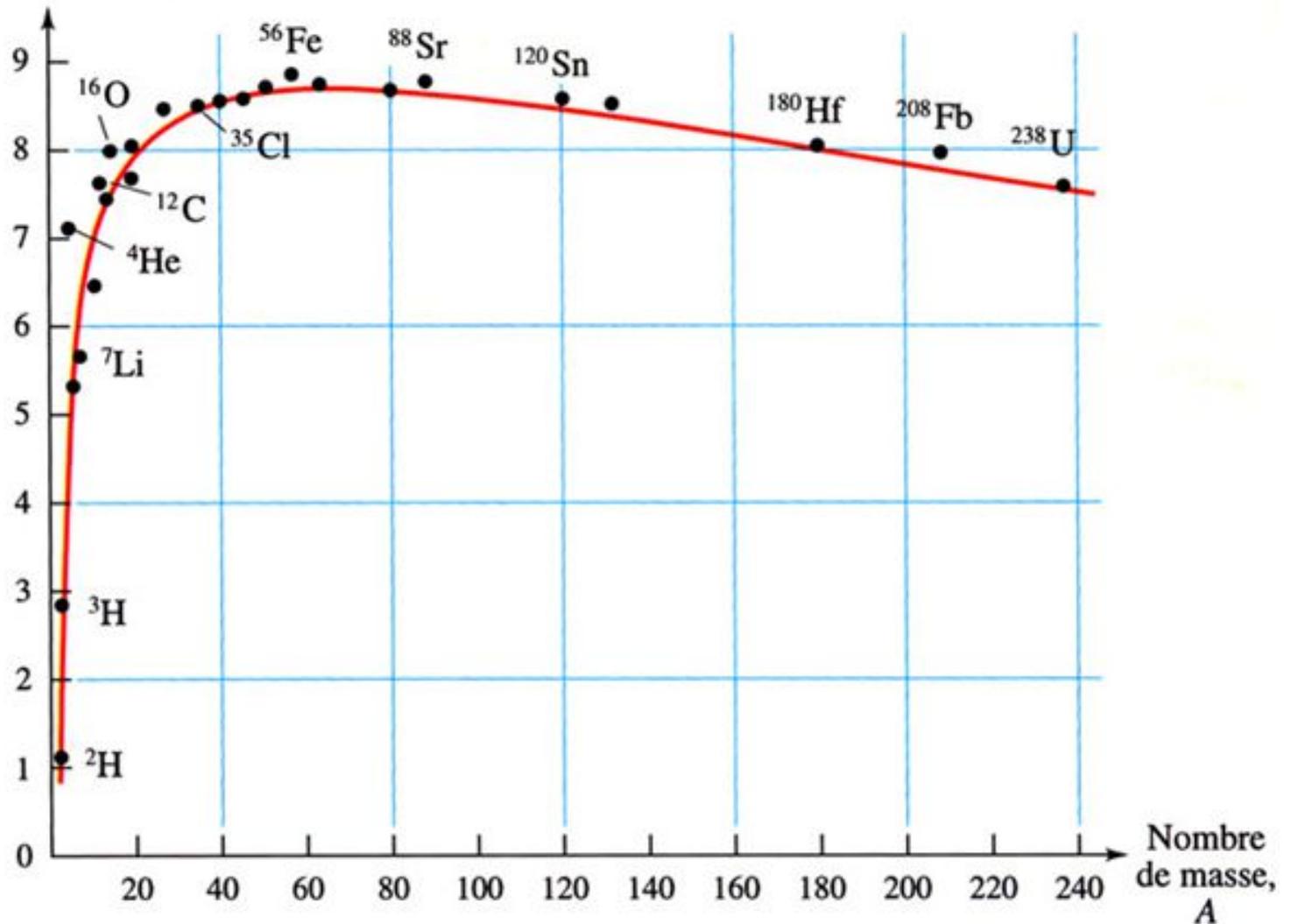
Elle peut être également définie comme l'énergie nécessaire pour créer un noyau.

*Elle peut être calculée grâce au défaut de masse :*

$$E_l = \delta c^2$$

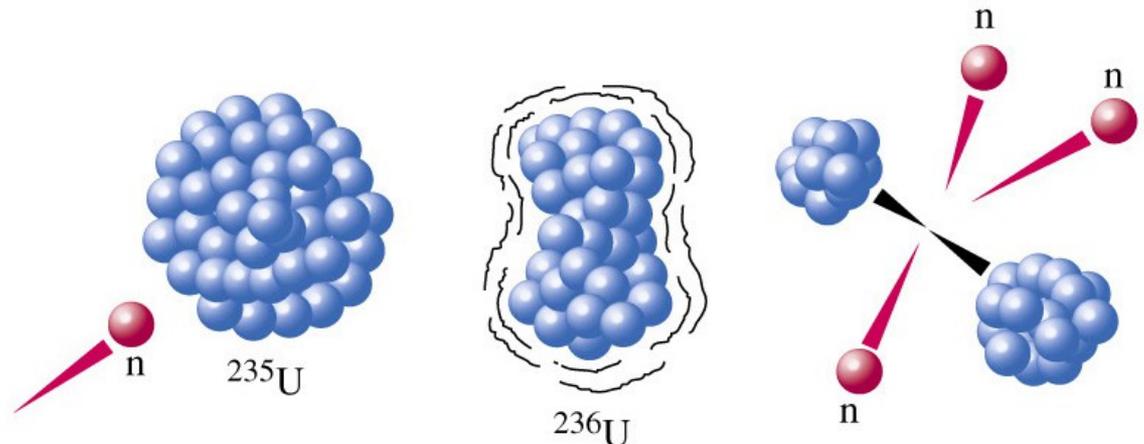
# Énergie de liaison par nucléon

Énergie de liaison  
: nucléon (MeV)

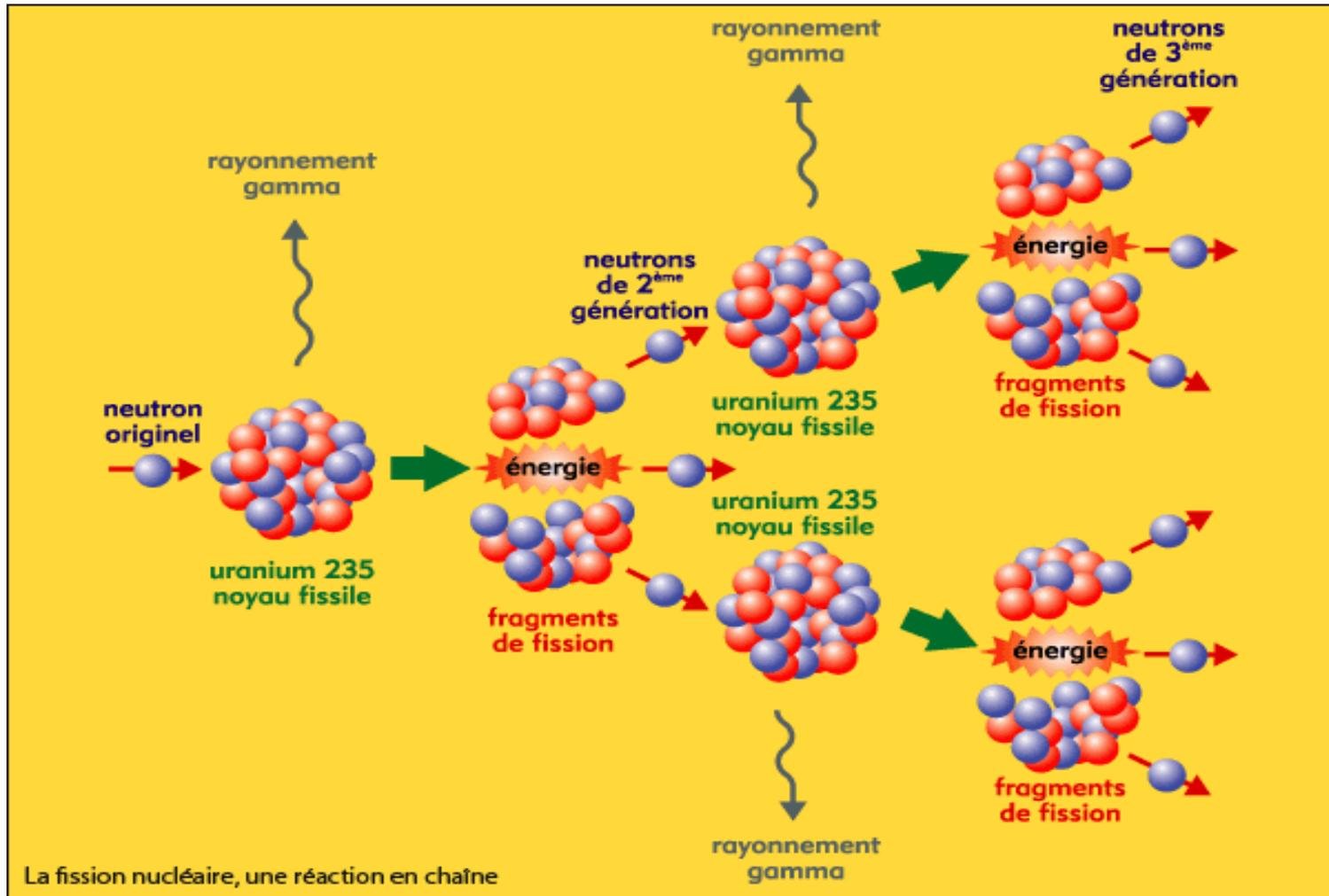


# La fission nucléaire

- Division d'un noyau lourd en 2 noyaux plus légers, des particules subatomiques et de l'énergie (Beaucoup d'énergie est libérée).
- La fission est utilisée par les centrales nucléaires (pour la production de l'énergie électrique ou les armes nucléaires)
- Les produits de la fission ou les déchets nucléaires sont hautement radioactifs, très dangereux et difficiles à éliminer. Si la fission n'est pas contrôlée, elle peut mener à une explosion.

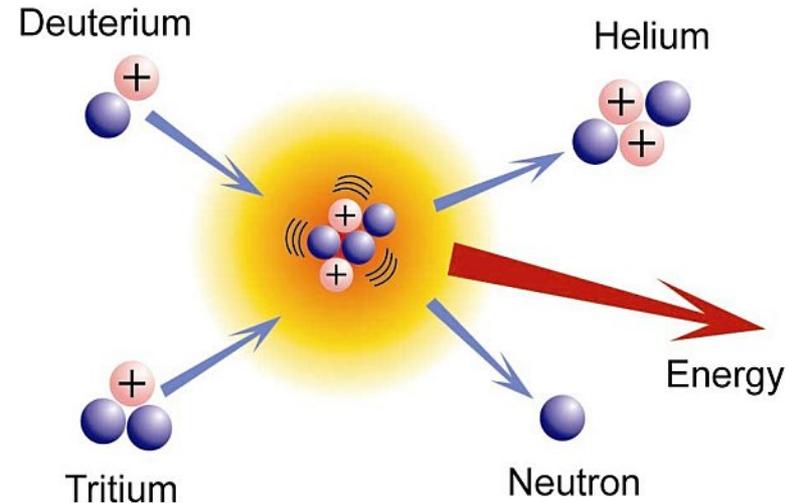


# Réaction en chaîne

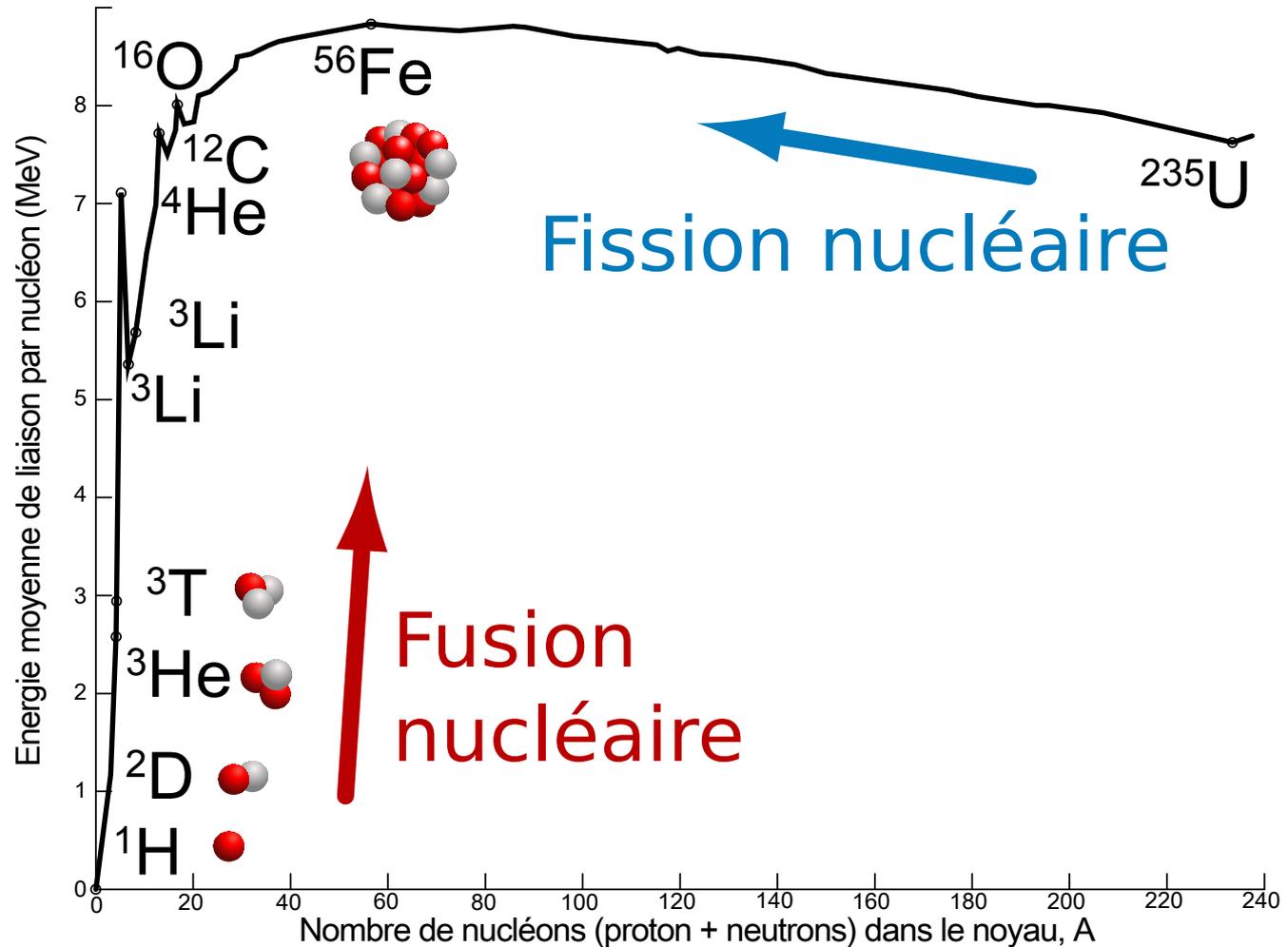


# La fusion nucléaire

- Combinaison de 2 noyaux légers en un noyau lourd.
- Cette réaction se produit au centre du soleil et d'autres étoiles.
- Des atomes d'hydrogène se frappent violemment pour devenir un atome d'hélium
- Cette réaction libère beaucoup d'énergie
- Les produits ne sont pas radioactifs
- La bombe atomique utilise la fission et la fusion



# Fusion et fission nucléaires



# Les particules élémentaires

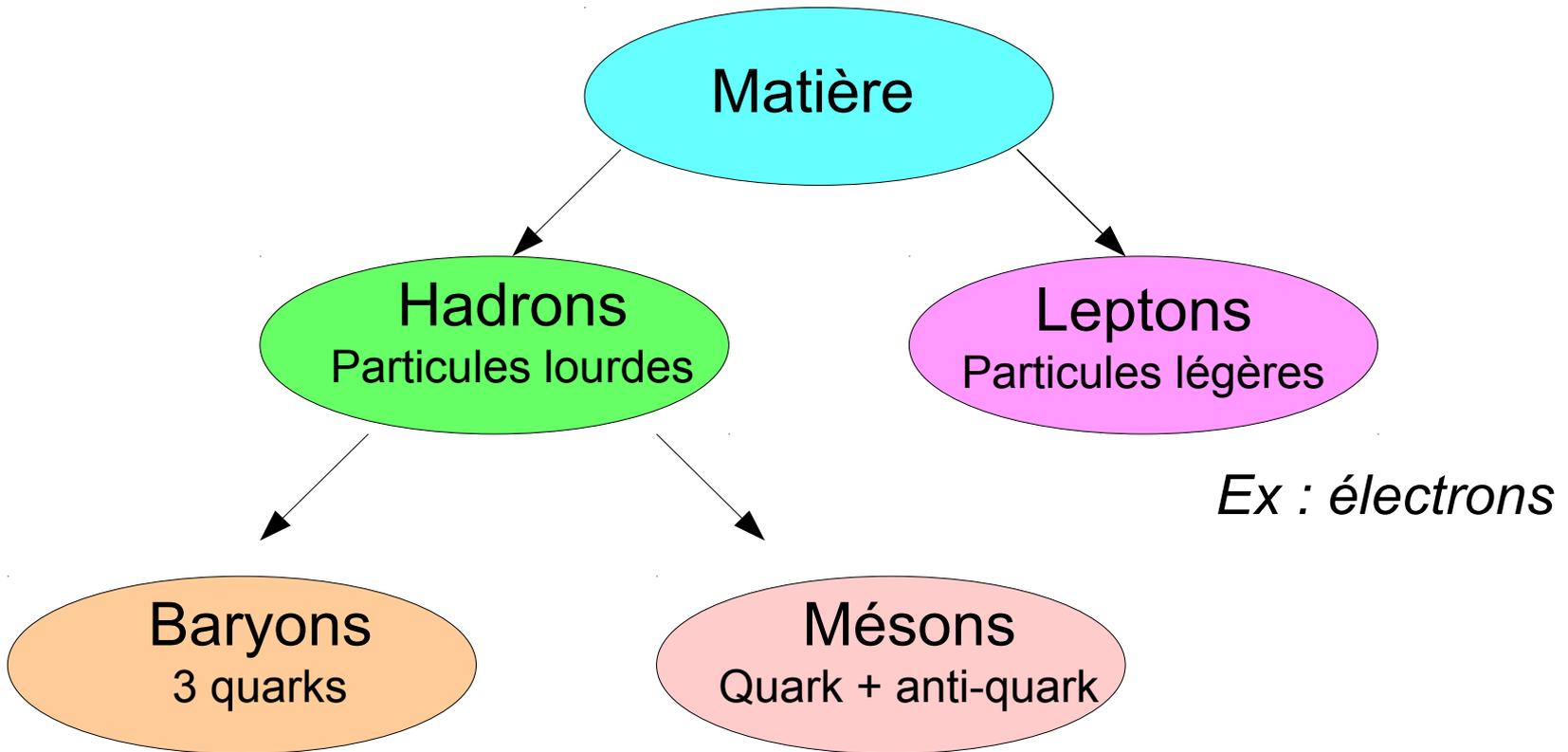
Il y a trois types de particules élémentaires :

- Les quarks
  - Les leptons
  - Les particules d'interaction
- Il existe 6 saveurs de quarks

*Les anti-particules ont toutes les caractéristiques opposées d'une particule sauf la masse qui est la même.  
Ex : le positron.*

|         |  | Particules de matière (fermions)                                     |  |   | Particules d'interactions                               |
|---------|--|--|--|---|---|
|         |  | I  | II   | III   |   |
| QUARKS  |  | 2.4 MeV<br>+2/3<br>1/2<br><b>u</b><br>up                             | 1.27 GeV<br>+2/3<br>1/2<br><b>c</b><br>charm                       | 171.2 GeV<br>+2/3<br>1/2<br><b>t</b><br>top                       | 0<br>0<br>1<br><b>γ</b><br>photon                       |
|         |  | 4.8 MeV<br>-1/3<br>1/2<br><b>d</b><br>down                           | 104 GeV<br>-1/3<br>1/2<br><b>s</b><br>strange                      | 4.2 GeV<br>-1/3<br>1/2<br><b>b</b><br>bottom                      | 0<br>0<br>1<br><b>g</b><br>gluon                        |
|         |  | <2.2 eV<br>0<br>1/2<br><b>ν<sub>e</sub></b><br>neutrino électronique | <0.17 MeV<br>0<br>1/2<br><b>ν<sub>μ</sub></b><br>neutrino muonique | <15.5 MeV<br>0<br>1/2<br><b>ν<sub>τ</sub></b><br>neutrino tauique | 91.2 GeV<br>0<br>1<br><b>Z<sup>0</sup></b><br>boson Z   |
| LEPTONS |  | 511 KeV<br>-1<br>1/2<br><b>e</b><br>électron                         | 105.7 MeV<br>-1<br>1/2<br><b>μ</b><br>muon                         | 1.777 GeV<br>-1<br>1/2<br><b>τ</b><br>tau                         | 80.4 GeV<br>±1<br>1<br><b>W<sup>±</sup></b><br>bosons W |

# Hadrons, baryons et mésons



*Exemples : protons et neutrons*

*Proton = uud*

*Neutron = ddu*

# Le nombre baryonique

Tous les quarks possèdent une caractéristique importante, le nombre baryonique, B :

quarks  $\rightarrow B = \frac{1}{3}$

anti-quarks  $\rightarrow B = -\frac{1}{3}$

Le nombre baryonique d'un hadron est la somme des nombres baryoniques des particules qui le constituent :

proton = uud  $\rightarrow B = \frac{1}{3} + \frac{1}{3} + \frac{1}{3} = 1$

Baryons  $\rightarrow B = 1$

Mésons  $\rightarrow B = 0$

*Il y a conservation du nombre baryonique et de la charge électrique dans toutes les réactions.*

# Exemple

Soit la réaction :  $\Delta^0 \rightarrow p + \pi^-$  où  $\Delta^0 = udd$  et  $\pi^-$  est un méson.

- *Bilan des charges électriques : la charge de  $p$  est +1 et elle s'annule avec la charge du méson, ce qui est cohérent avec le fait que la charge de  $\Delta^0$  est nulle.*
- *Bilan des nombres baryoniques :  $\Delta^0$  et  $p$  sont des baryons donc  $B = 1$  et  $\pi^-$  est un méson donc  $B = 0$ . Le nombre baryonique ne change pas durant la réaction.*

# Les leptons

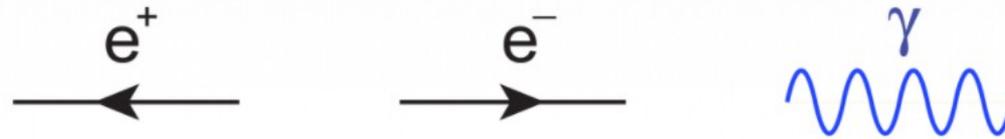
Il y a six différents types de leptons. Leur nombre baryonique est zéro. Un nombre leptonique leur est attribué : +1 pour les leptons et -1 pour les anti-leptons.

Il y a conservation du nombre leptonique lors des réactions.

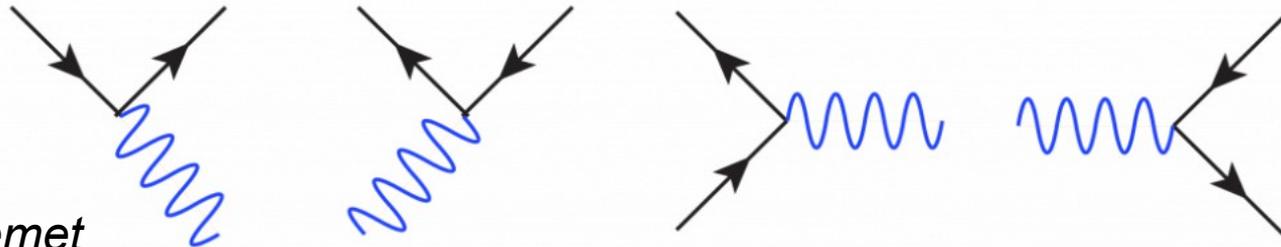
|                |  |   |   |
|----------------|--|---|---|
| masse →        | 0.511 MeV/c <sup>2</sup>   | 105.7 MeV/c <sup>2</sup>  | 1.777 GeV/c <sup>2</sup>  |
| charge →       | -1   | -1  | -1  |
| spin →         | 1/2  | 1/2   | 1/2   |
|                |    |    |    |
|                | électron   | muon  | tau   |
| <b>LEPTONS</b> | <2.2 eV/c <sup>2</sup>   | <0.17 MeV/c <sup>2</sup>  | <15.5 MeV/c <sup>2</sup>  |
|                | 0  | 0   | 0   |
|                | 1/2  | 1/2   | 1/2   |
|                |  |  |  |
|                | neutrino électronique  | neutrino muonique   | neutrino tauique  |

# Les diagrammes de Feynman

Outil utilisé pour représenter les interactions entre les particules et reposant sur des flèches (positron vers la gauche, électron vers la droite) et des tortillons (photons).



Le diagramme met en évidence les interactions grâce à des vertex :



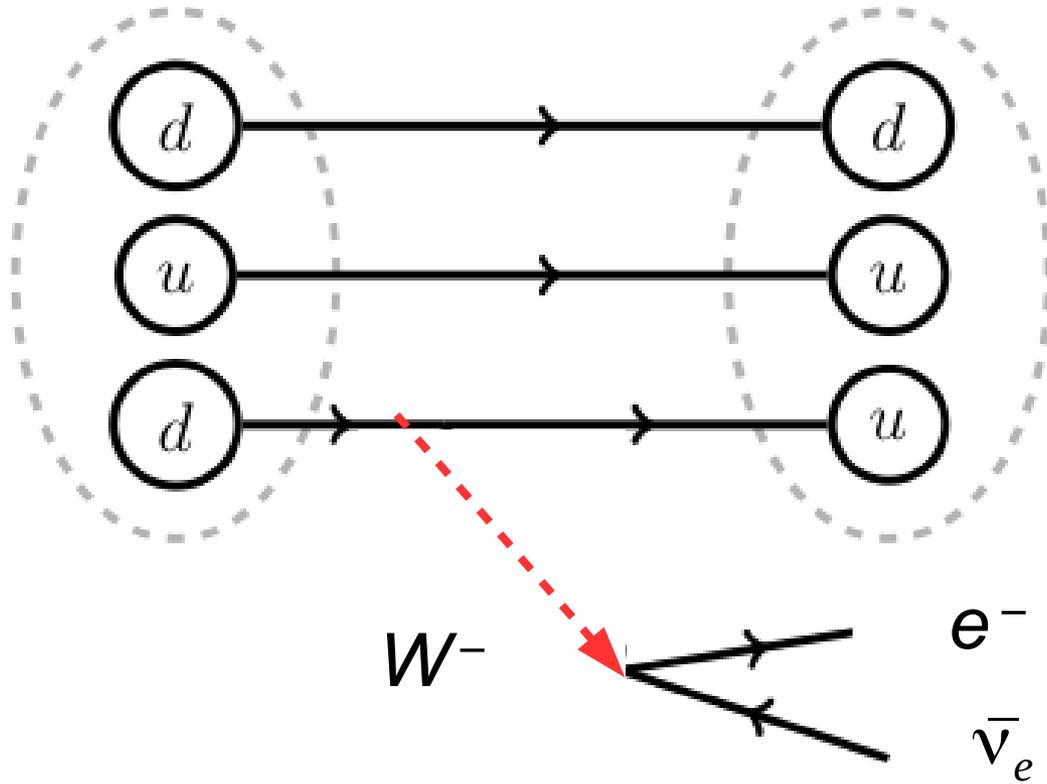
*Un électron émet un photon*

*Un positron émet un photon*

*Un électron et un positron se transforment en un photon*

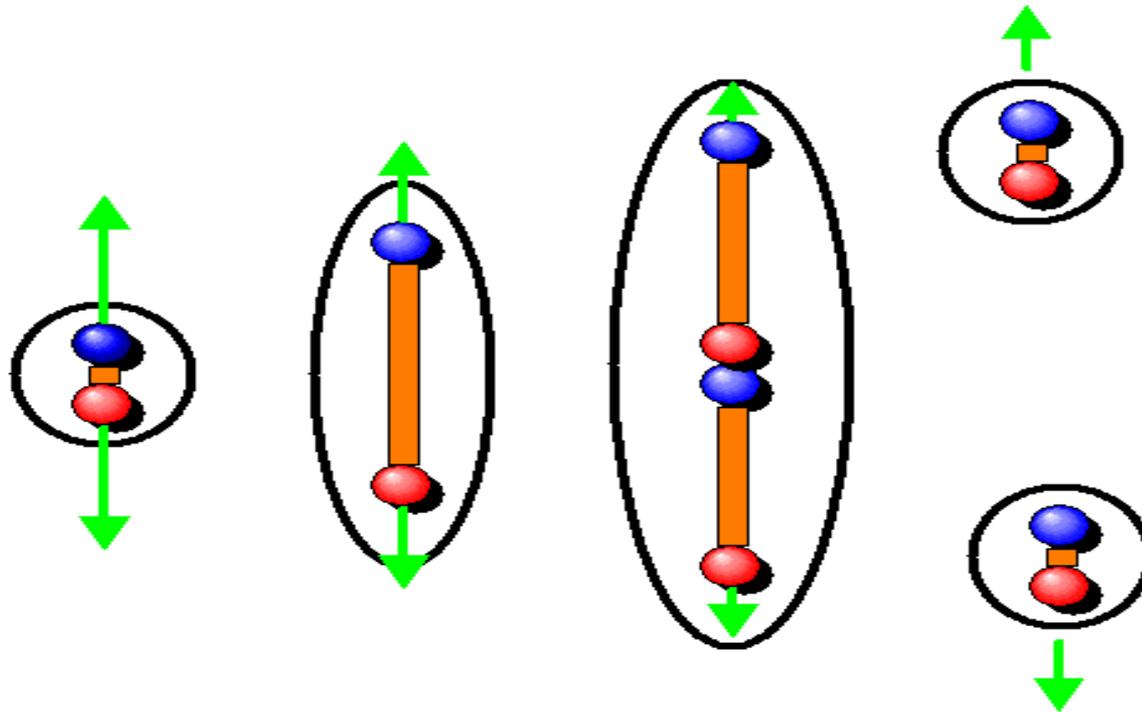
*Un photon se matérialise en un électron et un positron*

# Interactions faibles



# Le confinement des quarks

Les quarks ne peuvent pas être isolés et ne peuvent donc pas être étudiés séparément.



# Exemple

- Démontre