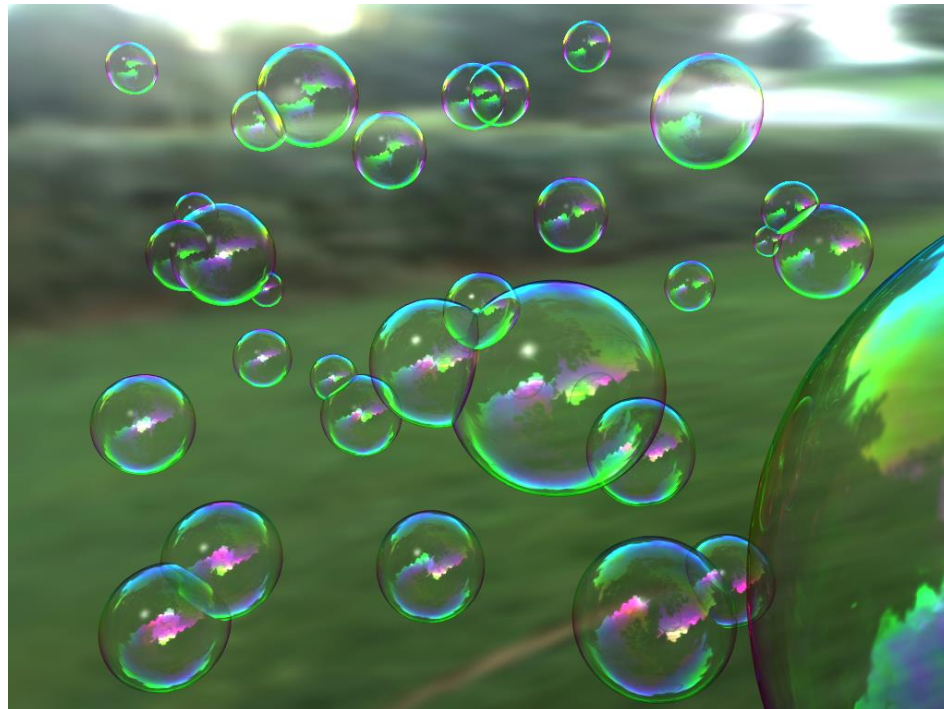


Les objets de la physique des particules



Les particules

Toute la matière qui nous entoure est constituée de particules

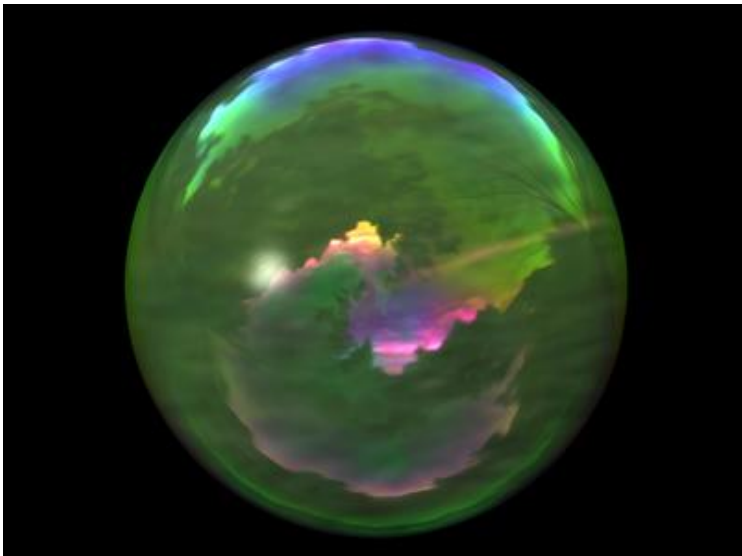


Les particules

Elles ne sont pas toutes identiques

Élémentaires

Elles n'ont pas de structure interne



Composites

Existence d'une structure interne

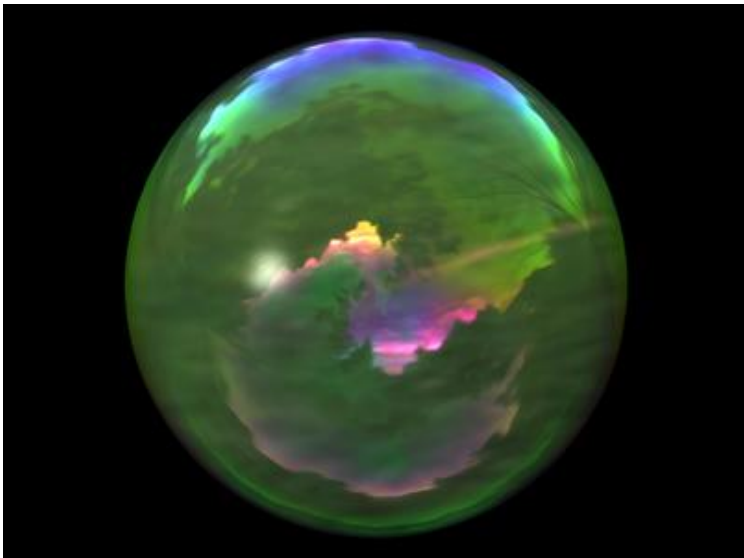


Les particules

Elles ne sont pas toutes identiques

Élémentaires

Elles n'ont pas de structure interne



Composites

Existence d'une structure interne



Les questions

1. **Combien et quelles** sont-elles ?
2. **Comment interagissent-elles** entre elles ?
3. D'où vient leur **masse** ?

Au début on ne connaissait que l'atome

Atome : άτομος [atomos], « qui ne peut être divisé »

Tableau périodique des éléments

Groupes: 1 IA, 2 IA, 3 IIIB, 4 IVB, 5 VB, 6 VIB, 7 VIIB, 8 VIII, 9 VIII, 10 VIII, 11 IB, 12 IIB, 13 IIIB, 14 IVA, 15 VA, 16 VIA, 17 VIIA, 18 VIIIA

Périodes: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7

Legend:

- nom de l'élément (**gaz**, **liquide** ou **solide** à 0°C et 101.3 kPa)
- numéro atomique
- symbole chimique
- masse atomique relative ou [celle de l'isotope le plus stable]

Color Key:

- métaux alcalins
- alcalino-terreux
- lanthanides
- actinides
- métaux de transition
- métaux pauvres
- métalloïdes
- non-métaux
- halogènes
- gaz nobles
- primordial
- désintégration d'autres éléments
- synthétique

Au début on ne connaissait que l'atome

Atome : άτομος [atomos], « qui ne peut être divisé »

Charge électrique nulle

Ils s'organisent en molécules

Object d'étude de la *chimie*

Il doit exister quelque chose plus fondamental...

L'électron

En 1897 J-J. Thomson découvre l'électron :

$$\text{Charge électrique} = -1.6 \cdot 10^{-19} C$$

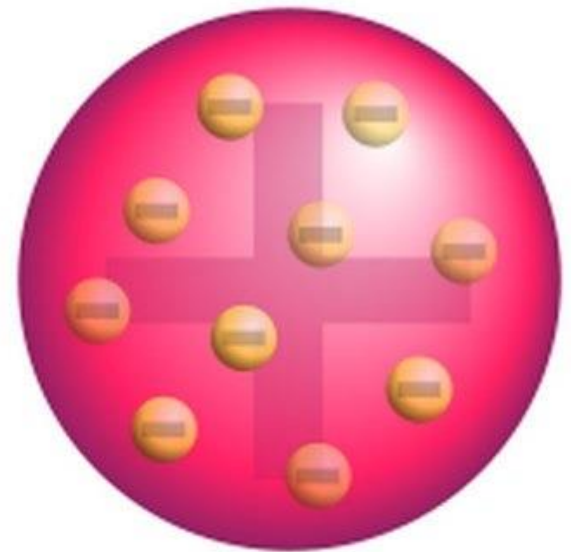
(charge électrique élémentaire = -1)

La charge électrique est « *quantisée* » : on ne peut avoir que des multiples entiers de charge électrique élémentaire (on ne peut pas les diviser !)

L'électron

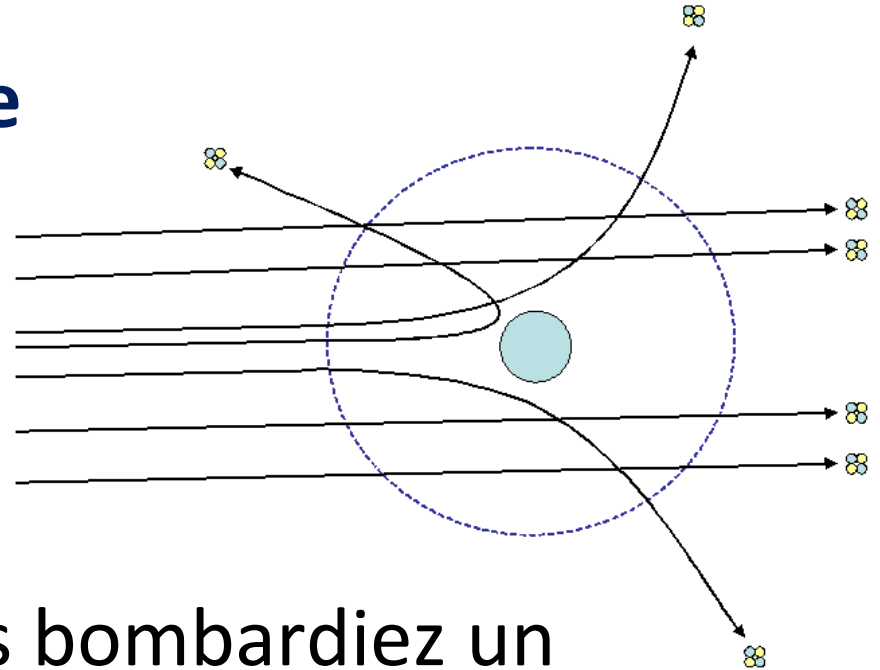
Premier modèle atomique de Thomson:

Électrons plongés dans un
atome lourd composé de
*charges positives de
nature inconnue*



La structure de l'atome

Rutherford (1911) :
la **masse est concentrée**
au cœur d'un atome
composé de vide

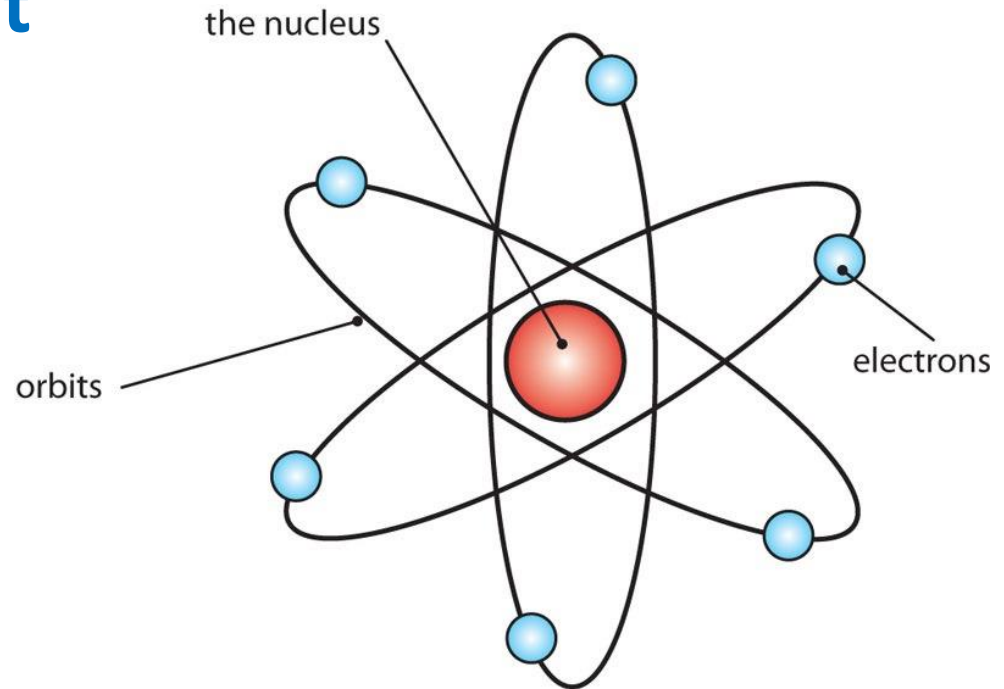


« c'est comme si vous bombardiez un
buvard avec un obus de 75 et que vous
le voyez rebondir »

La structure de l'atome

Rutherford (1911) : L'atome est essentiellement vide.

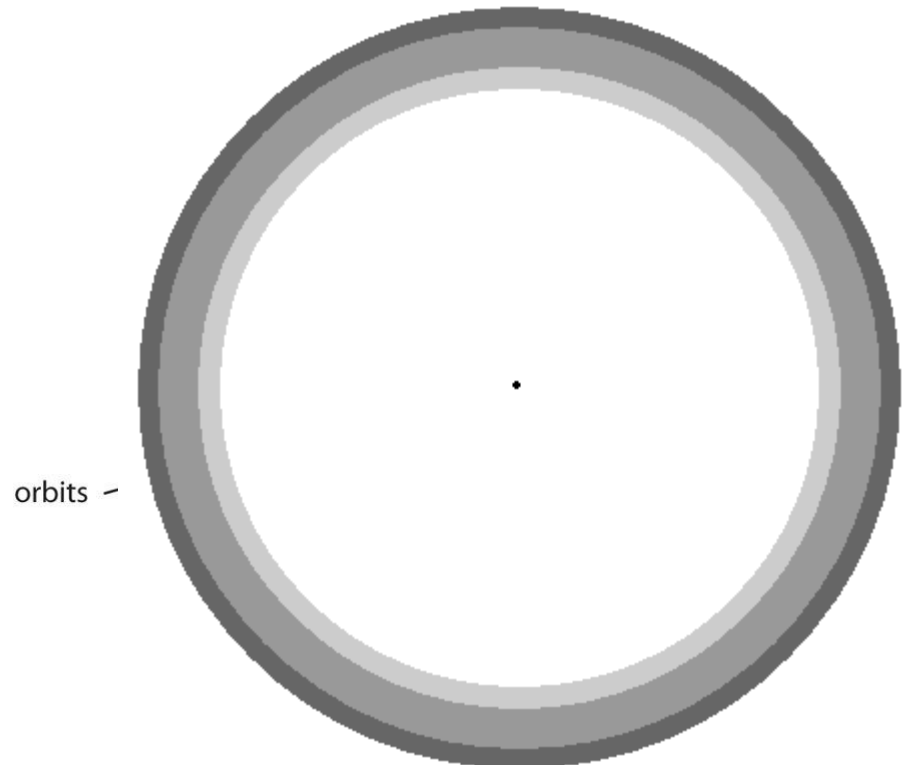
Un noyau extrêmement petit et un nuage d'électrons qui orbitent très loin du noyau.



La structure de l'atome

Rutherford (1911) : L'atome est essentiellement vide.

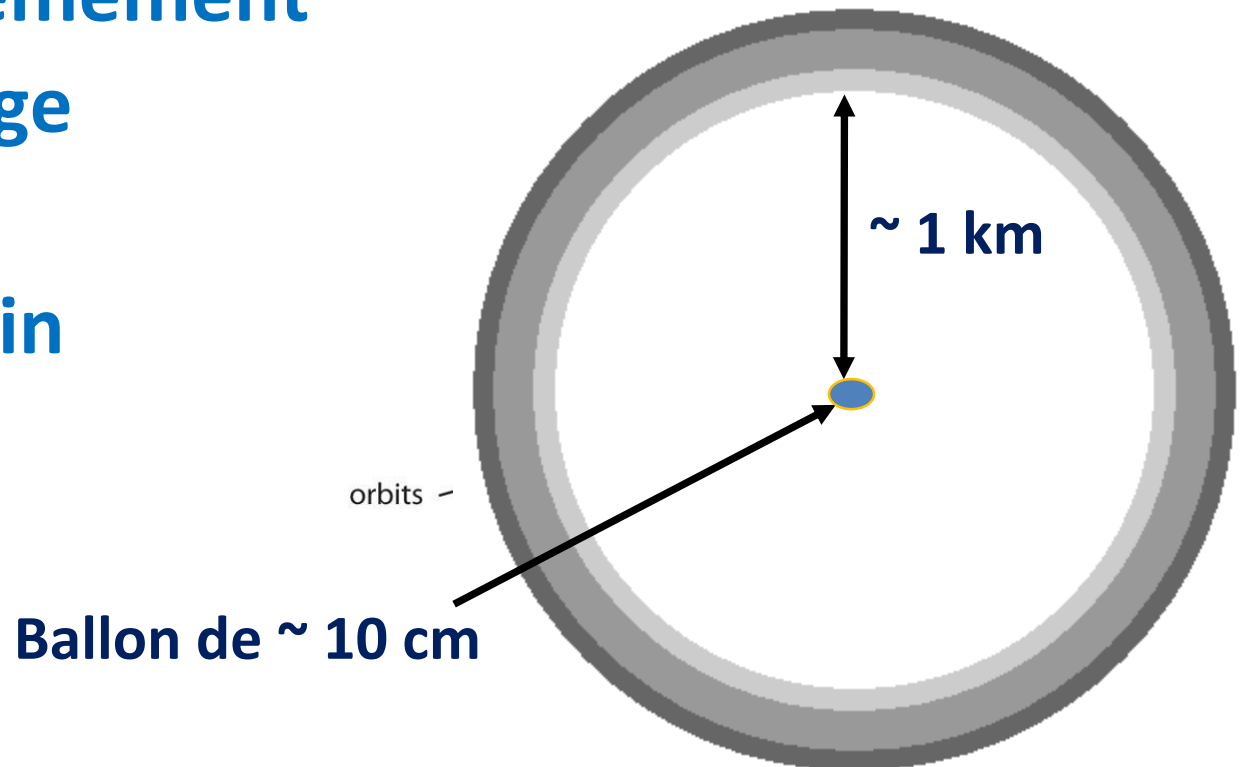
Un noyau extrêmement petit et un nuage d'électrons qui orbitent très loin du noyau.



La structure de l'atome

Rutherford (1911) : L'atome est essentiellement vide.

Un noyau extrêmement petit et un nuage d'électrons qui orbitent très loin du noyau.



L'interaction électrique

Ce qui permet aux électrons de former un système lié avec le noyau (*cad* l'atome) est l'**interaction électrique**

Loi de Coulomb :

« L'intensité de la force électrostatique entre deux charges électriques est proportionnelle au produit des deux charges et est inversement proportionnelle au carré de la distance entre les deux charges »

En pratique :

Charges de même (différent) signe se repoussent (attirent)

La force augmente ou diminue en fonction de la distance

Et le noyau ?

Est-il élémentaire comme l'électron ?

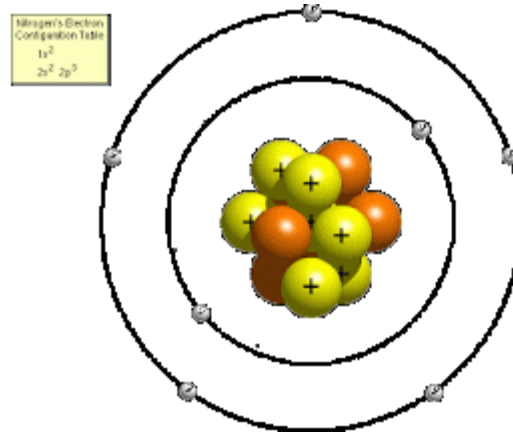
Rutherford (1919) : mise en évidence du **proton**

- charge électrique = +1
- masse de l'hydrogène

Chadwick (1932) : découverte du **neutron**

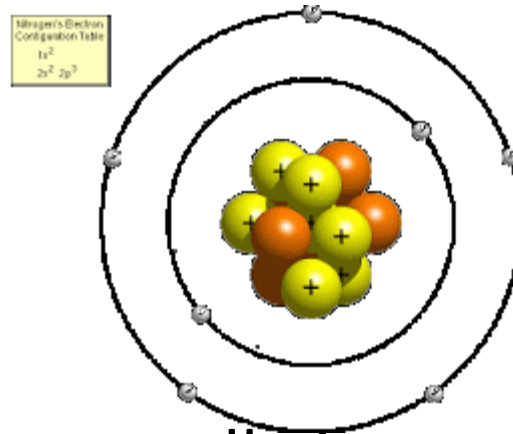
- charge électrique = 0
- (presque!) même masse que le proton (un peu plus lourd)

Et le noyau ?



De nouvelles interactions

Plusieurs charges électriques de même signe (protons) très proche l'une de l'autre subissant la répulsion électrique. Effet très fort!



Il doit y avoir une nouvelle interaction qui permet au noyau de rester stable : la **force forte**

La radioactivité

Fluorescence des sels d'uranium (Henri Becquerel – 1896)

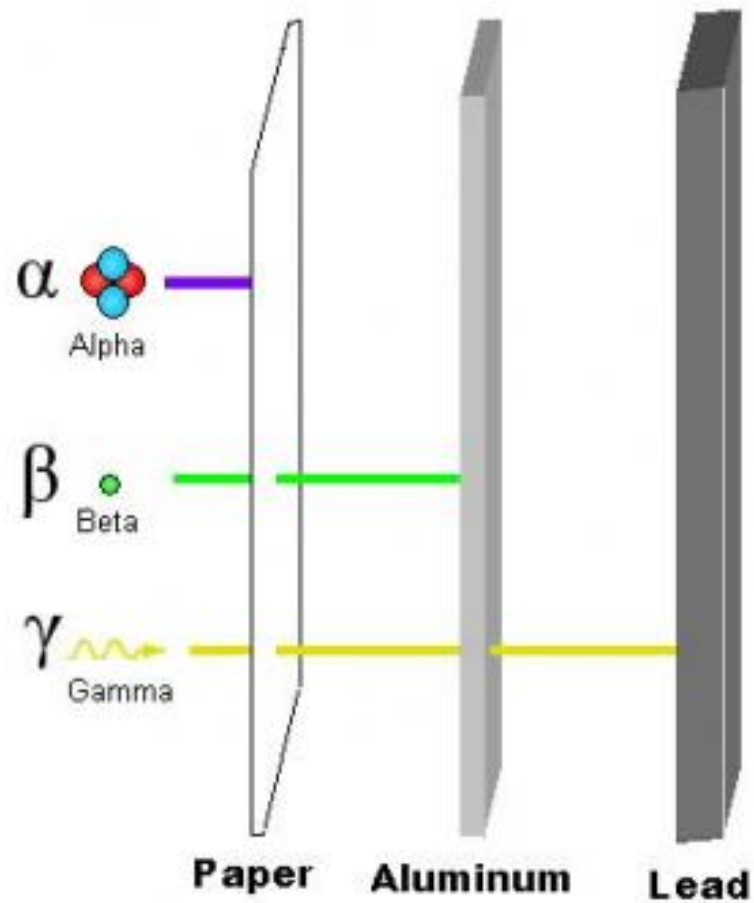
Pierre & Marie Curie montrent que l'uranium émet un rayonnement qui lui est propre (ce n'est pas une réaction chimique)

3 types de radioactivité selon leur degré de pénétration :

- **rayon α** : identifié à des noyaux d'hélium
- **rayon β** : identifié à des électrons
- **rayon γ** : identifié à des photons énergétiques émis

par les noyaux

La radioactivité



La radioactivité

Fluorescence des sels d'uranium (Henri Becquerel – 1896)

Pierre & Marie Curie montrent que l'uranium émet un rayonnement qui lui est propre (ce n'est pas une réaction chimique)

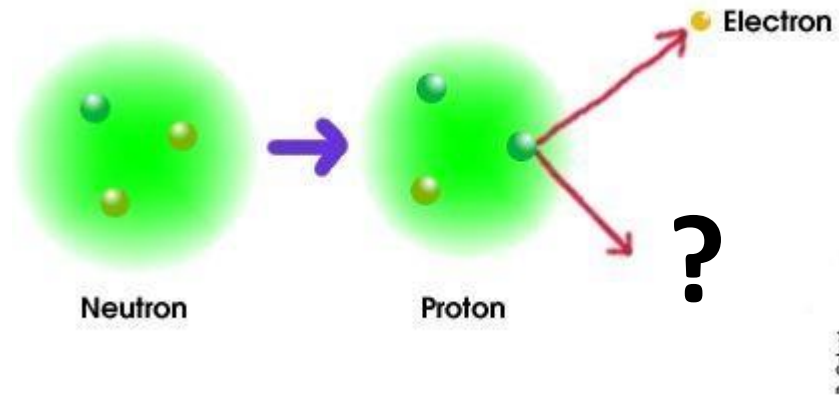
3 types de radioactivité selon leur degré de pénétration :

– **rayon α** : identifié à des noyaux d'hélium

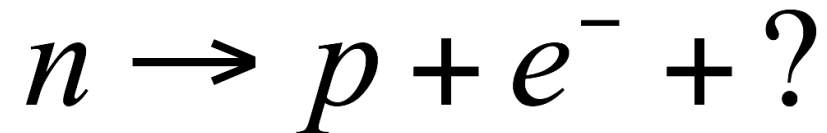
– **rayon β** : identifié à des électrons

– **rayon γ** : identifié à des photons énergétiques émis par les noyaux

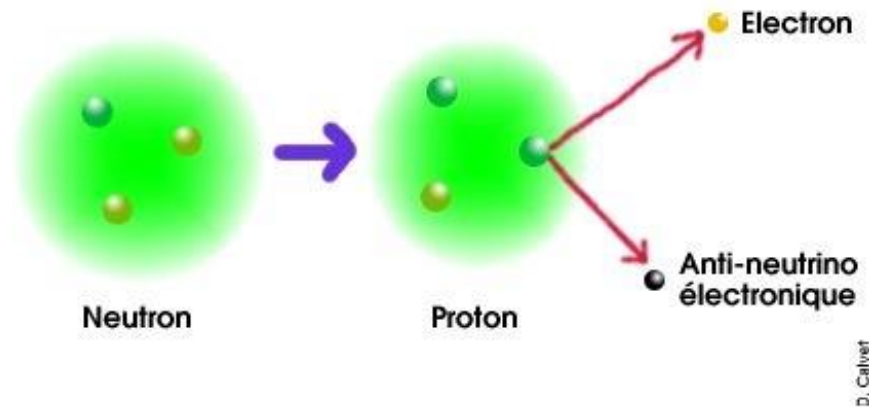
La radioactivité β



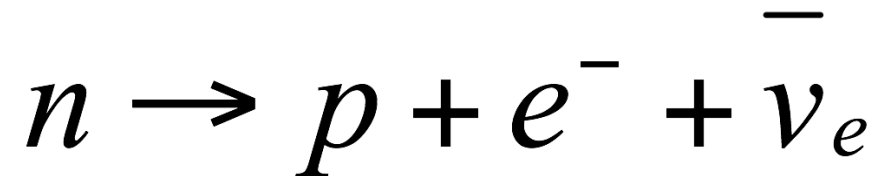
Au niveau des nucléons :



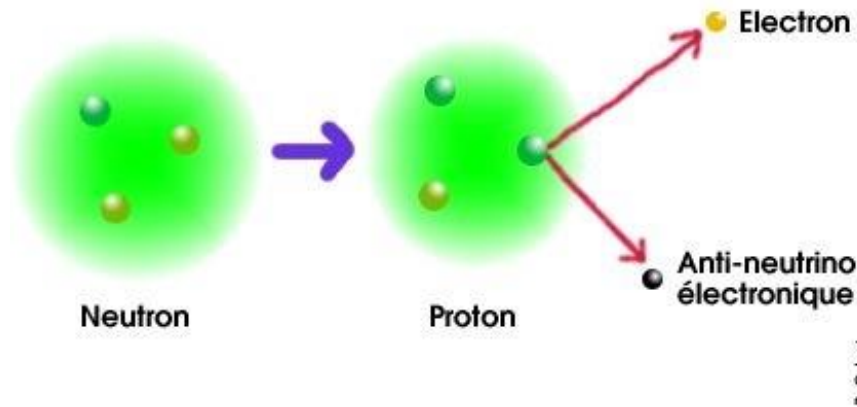
La radioactivité β



Pauli (1930) émet l'hypothèse d'une nouvelle particule, **le neutrino**.



La radioactivité β



Pauli (1930) émet l'hypothèse d'une nouvelle particule, **le neutrino**.

Une nouvelle force : **l'interaction faible**

Le neutrino

Charge électrique = 0

Masse = 0

Interagissent seulement *faiblement*

- 1956 : 1^{ère} mise en évidence d'un neutrino
 - Première expérience auprès d'un réacteur nucléaire (Savannah River, USA)
 - Cowan et Reines observent la capture d'un (anti)neutrino par un proton

A step further

Et les nucléons ?

Deep Inelastic Scattering ('60s, '70s) : un électron en collision avec un nucléon (scattering *à la* Rutherford)

Les nucléons ont une structure interne !

Le modèle des quarks

Protons et neutrons sont composés de « **quarks** »

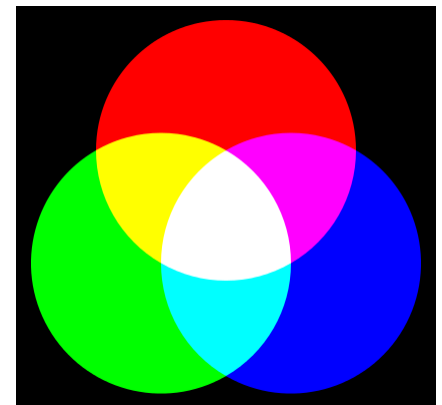
2 types de quarks avec
charge électrique
fractionnaire

| Up (u) | Down (d) |
|--------|----------|
| $+2/3$ | $-1/3$ |

Existent en trois charges « *couleurs* » :

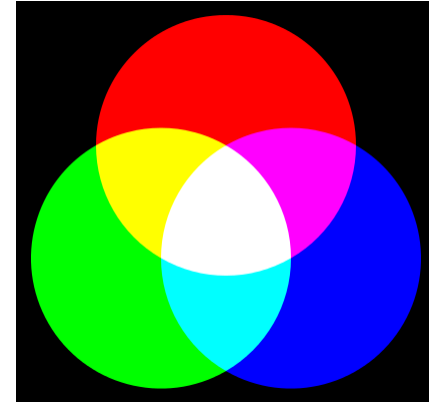
rouge, **vert**, **bleu**

– rouge + vert + bleu = blanc (neutre)

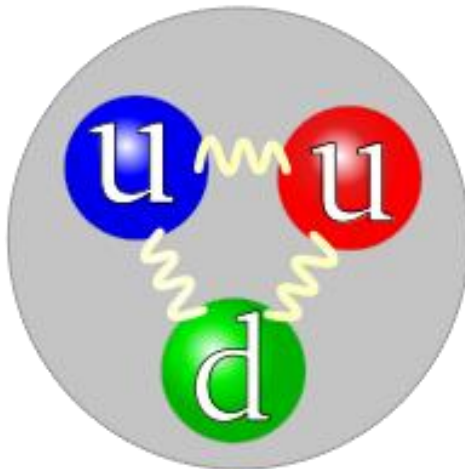


Le modèle des quarks

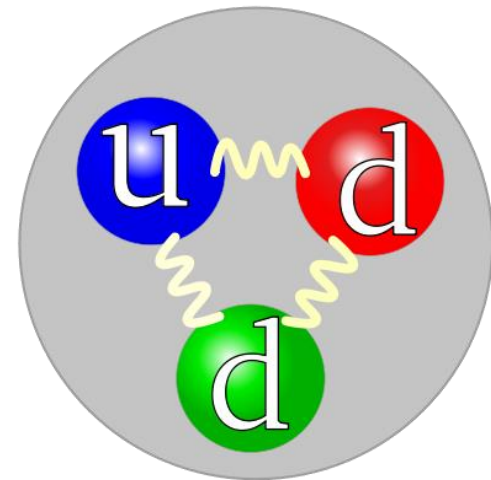
Les nucléons comportent
un quark de chaque couleur
et sont « blancs »



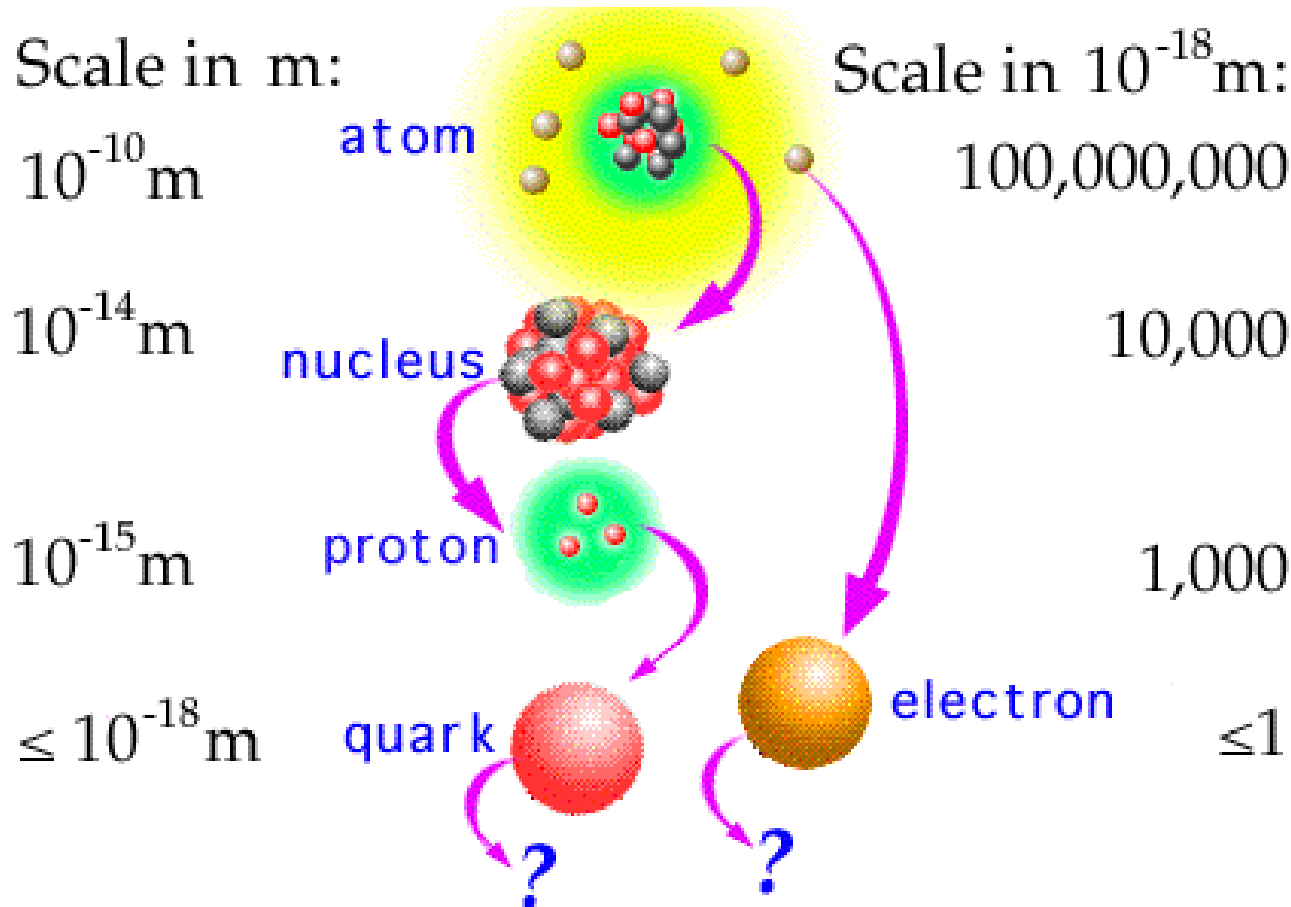
Proton



Neutron



Résumé des particules élémentaires que l'on vient de voir ensemble...



| 1ÈRE GÉNÉRATION | |
|-----------------|--|
| masse → | $\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$ |
| charge → | $2/3$ |
| spin → | $1/2$ |
| | u up |
| | $\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ |
| | $-1/3$ |
| | $1/2$ |
| | d down |
| | $0.511 \text{ MeV}/c^2$ |
| | -1 |
| | $1/2$ |
| | e électron |
| | $< 2.2 \text{ eV}/c^2$ |
| | 0 |
| | $1/2$ |
| | ν_e neutrino électronique |

...il existe d'autres particules élémentaires constituant la matière, mais plus massives et qui ne sont pas « stables »

| | 1 ^{ÈRE} GÉNÉRATION | 2 ^{ÈME} GÉNÉRATION | 3 ^{ÈME} GÉNÉRATION |
|----------------|---|---|--|
| masse → | ≈2.3 MeV/c ² | ≈1.275 GeV/c ² | ≈173.07 GeV/c ² |
| charge → | 2/3 | 2/3 | 2/3 |
| spin → | 1/2 | 1/2 | 1/2 |
| | u up | c charm | t top |
| | d down | s strange | b bottom |
| QUARKS | | | |
| | 0.511 MeV/c ² | 105.7 MeV/c ² | 1.777 GeV/c ² |
| | -1 | -1 | -1 |
| | 1/2 | 1/2 | 1/2 |
| | e électron | μ muon | τ tau |
| | <2.2 eV/c ² | <0.17 MeV/c ² | <15.5 MeV/c ² |
| | 0 | 0 | 0 |
| | 1/2 | 1/2 | 1/2 |
| LEPTONS | ν_e neutrino électronique | ν_μ neutrino muonique | ν_τ neutrino tauique |

Les interactions

Relativité restreinte :

la vitesse maximale possible est la vitesse de la lumière
(seulement particules de masse=0 peuvent l'atteindre)

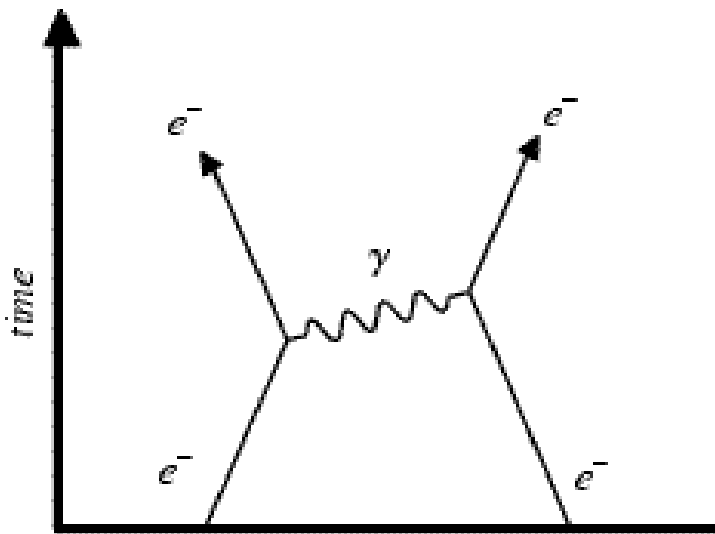
Il n'y a pas d'interactions instantanées

Deux particules peuvent interagir si elles occupent la **même position** au **même instant** (interaction local)

Comment expliquer l'interaction entre particules à distance ?

Les interactions

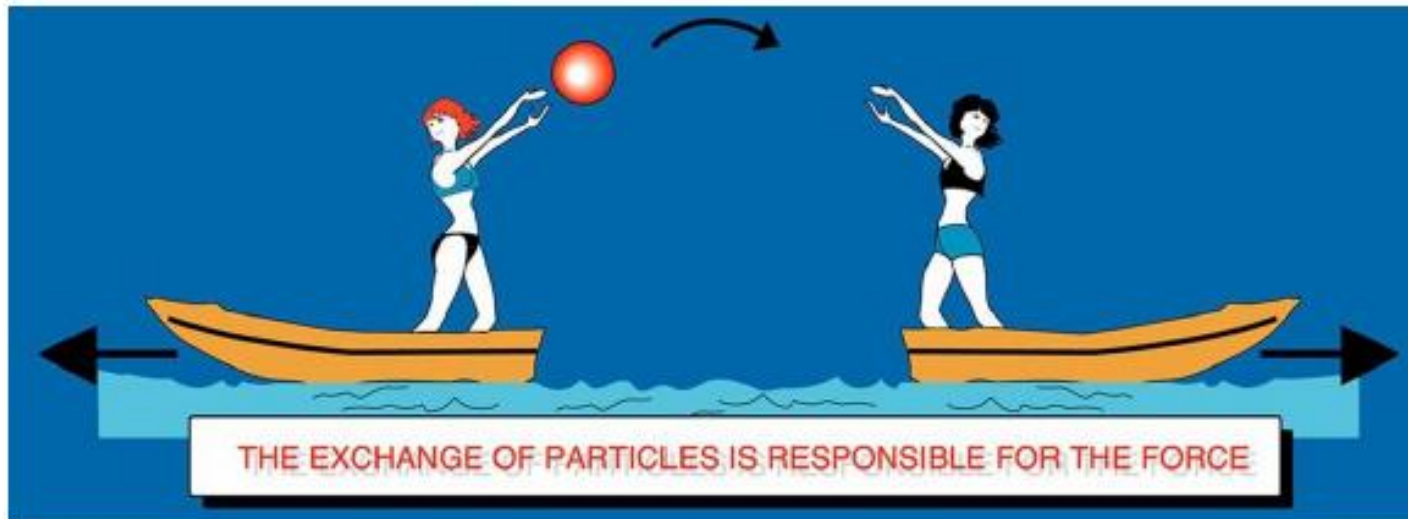
A l'aspect granulaire de la matière correspond un **aspect granulaire des forces**



Les interactions individuelles sont expliquées par **l'échange de particules de rayonnement (boson) entre particules de matière (fermion)**

Les interactions

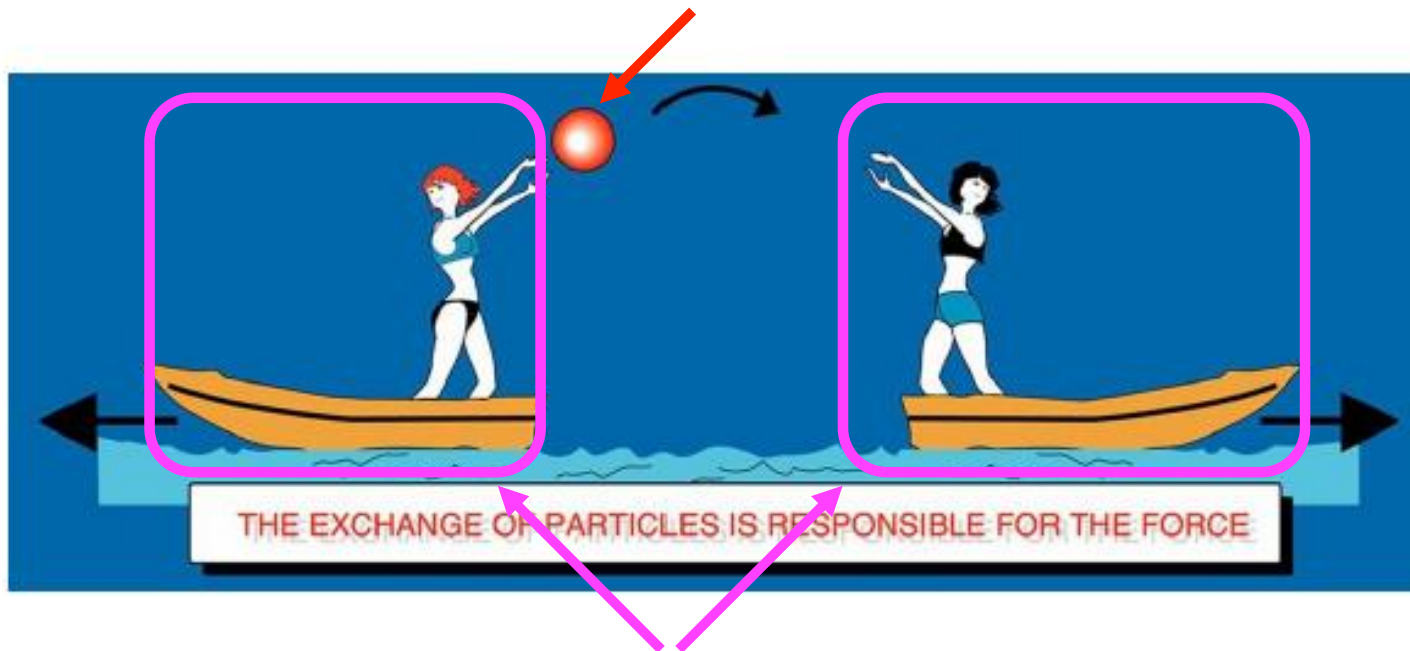
Principe d'action et réaction



Les interactions

















Principe d'action et réaction

Boson : permet l'échange d'information
(vecteur d'une « force » fondamentale)



















Fermion : particule de matière interagissant en fonction
de la « force » liée au boson échangé

Les interactions

| | 1 ^{ÈRE} GÉNÉRATION | 2 ^{ÈME} GÉNÉRATION | 3 ^{ÈME} GÉNÉRATION | |
|----------|--|--|---|--|
| masse → | ≈2.3 MeV/c ² | ≈1.275 GeV/c ² | ≈173.07 GeV/c ² | 0 |
| charge → | 2/3 | 2/3 | 2/3 | 0 |
| spin → | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1 |
| QUARKS |  u up |  c charm |  t top |  g gluon |
| |  d down |  s strange |  b bottom |  γ photon |
| |  e électron |  μ muon |  τ tau |  Z boson Z |
| LEPTONS |  ν _e neutrino électronique |  ν _μ neutrino muonique |  ν _τ neutrino tauique |  W [±] bosons W [±] |
| | 0.511 MeV/c ² | 105.7 MeV/c ² | 1.777 GeV/c ² | 91.2 GeV/c ² |
| | -1 | -1 | -1 | 0 |
| | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1 |
| | <2.2 eV/c ² | <0.17 MeV/c ² | <15.5 MeV/c ² | 80.4 GeV/c ² |
| | 0 | 0 | 0 | ±1 |
| | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1 |
| | | | | BOSONS DE JAUGE |

Les interactions

| | 1 ^{ÈRE} GÉNÉRATION | 2 ^{ÈME} GÉNÉRATION | 3 ^{ÈME} GÉNÉRATION | |
|----------|--|--|---|--|
| masse → | ≈2.3 MeV/c ² | ≈1.275 GeV/c ² | ≈173.07 GeV/c ² | 0 |
| charge → | 2/3 | 2/3 | 2/3 | 0 |
| spin → | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1 |
| QUARKS |  u up |  c charm |  t top |  g gluon |
| |  d down |  s strange |  b bottom |  γ photon |
| |  e électron |  μ muon |  τ tau |  Z boson Z |
| LEPTONS |  ν _e neutrino électronique |  ν _μ neutrino muonique |  ν _τ neutrino tauique |  W [±] bosons W [±] |
| | 0.511 MeV/c ² | 105.7 MeV/c ² | 1.777 GeV/c ² | 91.2 GeV/c ² |
| | -1 | -1 | -1 | 0 |
| | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1 |
| | <2.2 eV/c ² | <0.17 MeV/c ² | <15.5 MeV/c ² | 80.4 GeV/c ² |
| | 0 | 0 | 0 | ±1 |
| | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1 |
| | | | | BOSONS DE JAUGE |

















Force forte

Les interactions

| | 1 ^{ÈRE} GÉNÉRATION | 2 ^{ÈME} GÉNÉRATION | 3 ^{ÈME} GÉNÉRATION | |
|----------|---|-------------------------------------|------------------------------------|---|
| masse → | ≈2.3 MeV/c ² | ≈1.275 GeV/c ² | ≈173.07 GeV/c ² | 0 |
| charge → | 2/3 | 2/3 | 2/3 | 0 |
| spin → | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1 |
| QUARKS | u up | c charm | t top | g gluon |
| | d down | s strange | b bottom | γ photon |
| | e électron | μ muon | τ tau | Z boson Z |
| LEPTONS | ν _e neutrino électronique | ν _μ neutrino muonique | ν _τ neutrino tauique | W [±] bosons W [±] |
| | | | | BOSONS DE JAUGE |

Force électrique

Les interactions

| | 1 ^{ÈRE} GÉNÉRATION | 2 ^{ÈME} GÉNÉRATION | 3 ^{ÈME} GÉNÉRATION | |
|----------|--|--|---|--|
| masse → | ≈2.3 MeV/c ² | ≈1.275 GeV/c ² | ≈173.07 GeV/c ² | 0 |
| charge → | 2/3 | 2/3 | 2/3 | 0 |
| spin → | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1 |
| QUARKS |  u up |  c charm |  t top |  g gluon |
| |  d down |  s strange |  b bottom |  γ photon |
| |  e électron |  μ muon |  τ tau |  Z boson Z |
| LEPTONS |  ν _e neutrino électronique |  ν _μ neutrino muonique |  ν _τ neutrino tauique |  W [±] bosons W [±] |
| | | | | BOSONS DE JAUGE |

Force faible

La masse

La masse d'un corps correspond à l'inertie de celui-ci subissant un changement de son état de mouvement

Mécanisme de Higgs (1964)

- Explique l'origine de la masse des particules élémentaires
- Prédit l'existence d'une particule : le *boson de Higgs*

Une très longue recherche : le 4 Juillet 2012 sa découverte a finalement été annoncée

Mécanisme de Higgs



Mécanisme de Higgs



La masse d'une particule est le résultat de son interaction avec le champ de Higgs !

Le boson de Higgs



Le cadre complet

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

L'anti-matière

Est-ce que ça existe ?

L'anti-matière

Est-ce que ça existe ?

OUI

L'anti-matière

Est-ce que ça existe ?

OUI

Qu'est-ce que c'est ?

L'anti-matière

Est-ce que ça existe ?

OUI

Qu'est-ce que c'est ?

- L'anti-matière correspond au symétrique de la matière « vue dans un miroir » (enfin presque...)



L'anti-matière

Est-ce que ça existe ?

OUI

Qu'est-ce que c'est ?

- L'anti-matière correspond au symétrique de la matière « vue dans un miroir » (enfin presque...)
- Lorsqu'une particule de matière et une son anti-particule se rencontrent les deux s'annihilent : $e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$



À chaque particule correspond une anti-particule :

- de même masse
- de même spin
- de charge opposée

électron e^- •
proton p ⊕
neutron n ⊙

• e^+ positron
⊖ \bar{p} antiproton
⊙ \bar{n} antineutron

Histoire de l'anti-matière

1932 : découverte du positron dans les rayons cosmiques.

Prix Nobel en 1936

1955 : découverte de l'antiproton au Bevatron à Berkeley, Californie.

Prix Nobel en 1959

1956 : découverte de l'anti-neutron au Bevatron



1965: première observation d'anti-noyau : anti-deuteron au CERN et Brookhaven

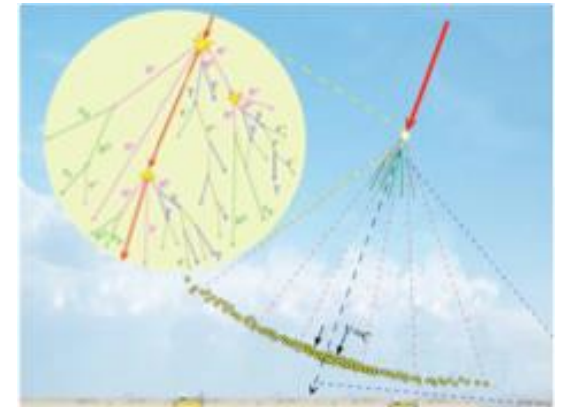
1995: premier atome d'anti-hydrogène produit au CERN

L'anti-matière autour de nous

Deux sources naturelles :

- rayons cosmiques
- radioactivité

pas de source massive dans l'Univers !



Sources artificielles :

- accélérateurs de particules
- TEP : Tomographie par Émission de Positrons

utilisé « tous les jours » à l'hôpital !



Difficile à :

- produire
- stocker



Pas pour tout de suite...⁴⁹

L'absence d'antimatière

Au début de l'Univers :

autant de matière que d'anti-matière...

Pourquoi l'antimatière a-t-elle disparu ?

○ est-elle l'exact opposée de la matière ?

Quiz

1. Qui est plus lourd, le quark down ou le quark up ? Et pourquoi?

Quiz

2. Le neutron libre se désintègre après 15 minutes dans un proton avec l'émission de radiation Beta. Ça vous dérange?

Quiz

2. Le neutron libre se désintègre après 15 minutes dans un proton avec l'émission de radiation Beta. Ça vous dérange? Et si oui pourquoi?

Quiz

3. Supposons que j'ai un proton accéléré à la vitesse de la lumière en collision avec un électron à repos. Que se passe?

Quiz

4. Les quarks up et down qui forment le proton ont une masse de 2-5 MeV. Le proton a une masse de 1000 MeV... y a-t-il un problème?

Quiz

5. Pourquoi la force forte tient ensemble les protons dans le noyau si les protons "sont de couleur blanc" ?

Et des nouvelles questions

1. **Pourquoi uniquement 3 familles ?**
2. **Pourquoi des masses si différentes** (*i.e.* pourquoi des interactions si différentes avec le champ de Higgs) ?
3. **L'origine de l'asymétrie matière-antimatière**
(éléments de discussion plus tard dans la matinée)
4. Et **la gravité** ?
5. ...

**Merci pour votre
attention!**