

LES INTERACTIONS QUI GOUVERNENT LE MONDE.

Les interactions entre particules élémentaires (électron, proton, neutron) assurent la cohésion de la matière. Parmi ces interactions, deux nous sont familières car leurs effets sont directement observables:

- l'**interaction gravitationnelle** entre des **masses** (loi formulée par Newton en 1687);
- l'**interaction électrique** entre des **charges** (loi formulée par Coulomb en 1785).

Cependant, ces deux interactions sont insuffisantes pour expliquer la cohésion des noyaux. Dans les années 1970, les physiciens ont élaboré une théorie faisant appel à une troisième interaction fondamentale: l'**interaction forte** entre **nucléons**.

1. COHESION DE LA MATIERE A L'ECHELLE ATOMIQUE: L'INTERACTION FORTE.

1.1. APPROCHE PAR LE CALCUL.

Un noyau d'hélium ${}^4_2\text{He}$ est formé de deux protons et deux neutrons.

- Les nucléons possèdent une masse: ils subissent donc une **attraction gravitationnelle**. Calculons un ordre de grandeur de l'attraction gravitationnelle entre deux protons, on considère que la taille du noyau est de l'ordre de $1 \times 10^{-15} \text{ m}$

$$F_{p/p} = G \times \frac{m_p \times m_p}{d^2} = 6,67 \times 10^{-11} \times \frac{(1,67 \times 10^{-27})^2}{(1,0 \times 10^{-15})^2} \quad \text{soit } F_{p/p \text{ Gravitationnelle}} = 1,86 \times 10^{-34} \text{ N}$$

Les interactions gravitationnelles neutron - neutron et proton - neutron ont des valeurs très voisines.

- Les protons portent des charges de mêmes signes: ils subissent donc une **répulsion électrique**. Calculons un ordre de grandeur de la répulsion électrique entre les deux protons, on considère qu'ils ne sont pas en contact mais séparés par un neutron:

$$F_{p/p} = k \times \frac{|q_p \times q_p|}{d^2} = 9 \times 10^9 \times \frac{(1,6 \times 10^{-19})^2}{(1,0 \times 10^{-15})^2} \quad \text{soit } F_{p/p \text{ Electrique}} = 2,3 \times 10^2 \text{ N}$$

La répulsion électrique est bien plus importante que l'attraction gravitationnelle. La valeur de cette force est de l'ordre:

- deux milliards de fois plus grande que celle de la force liant l'électron et le proton dans l'atome d'hydrogène;
- du poids d'une masse de 20 kg au voisinage de la Terre.

Une telle force devrait conduire à l'explosion de tout noyau atomique. On ne peut comprendre la stabilité d'un noyau sans faire l'hypothèse qu'un autre type d'interaction s'exerce en son sein. **Il existe donc une troisième force: l'interaction forte.**

1.2. L'INTERACTION FORTE.

L'interaction forte, bien que 100 à 1 000 fois plus forte que l'interaction électromagnétique, ne nous est pas familière car son action ne dépasse pas les dimensions du noyau, soit 10^{-15} m . C'est pourquoi elle n'est connue que depuis quelques décennies. Elle agit entre les nucléons et plus particulièrement entre les quarks qui sont les constituants des nucléons.

L'interaction forte permet d'expliquer:

- l'existence des noyaux atomiques. Les neutrons et les protons ne pourraient pas s'associer. Il n'y aurait donc pas de molécules et la vie ne serait pas possible;
- des réactions nucléaires se produisent dans le Soleil: des atomes d'hydrogène fusionnent pour former des atomes d'hélium. Il n'y a donc pas, au cours de ces réactions, conservation des éléments: ces réactions ne sont pas des réactions chimiques;
- l'énergie libérée par les réactions nucléaires est beaucoup plus importante que celle libérée par les réactions chimiques, car l'interaction forte est beaucoup plus intense que l'interaction électromagnétique.

1.3. CARACTERISTIQUES DE L'INTERACTION FORTE.

L'interaction forte est responsable de la cohésion du noyau atomique. Elle s'exerce entre les nucléons.

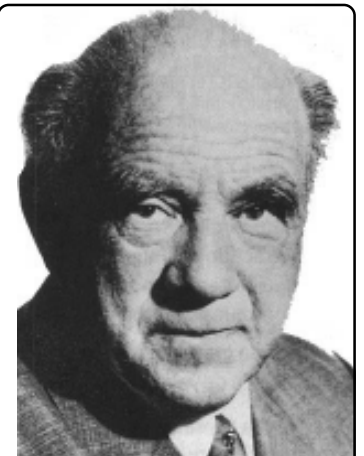
Elle est **indépendante de la charge électrique**: elle intervient entre nucléons, qu'ils soient des protons ou des neutrons.

Elle est de **très courte portée**, de l'ordre de 10^{-15} m . Au-delà de 10^{-14} m , l'interaction forte est négligeable devant les autres interactions.

Elle est **attractive** entre deux nucléons séparés d'une distance de l'ordre de $2 \cdot 10^{-15} \text{ m}$. Sur ces distances, elle est **100 à 1 000 fois** plus forte que l'interaction électrique protons-protons.

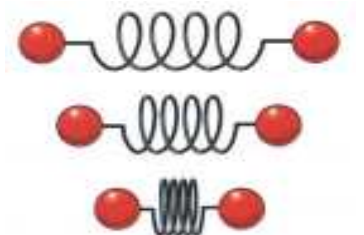
Au contraire de l'interaction gravitationnelle et de l'interaction électrique, l'**interaction forte augmente avec la distance**. L'interaction forte entre deux nucléons peut se comparer à l'action d'un ressort reliant deux billes. Plus les billes s'éloignent et plus le ressort tend à les rapprocher. Quand les billes sont proches, le ressort est détendu et il n'y a plus d'action.

L'interaction forte se manifeste donc par une attraction intense entre les nucléons du noyau atomique, **mais ne se manifeste plus à l'échelle de l'atome** et a fortiori à l'échelle macroscopique. Les **électrons sont insensibles à l'interaction forte**.



Carl Werner Heisenberg
(1901 - 1976)

Physicien allemand, il proposa l'existence d'une interaction forte en 1932.



2. COHESION DE LA MATIERE A L'ECHELLE HUMAINE: INTERACTION ELECTROMAGNETIQUE

2.1. APPROCHE PAR LE CALCUL.

L'atome est constitué d'un noyau chargé positivement et d'un cortège électronique chargé négativement.

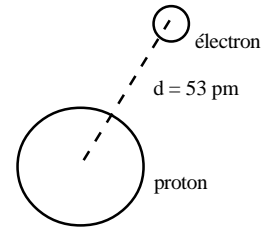
Le noyau (les protons) et les électrons possèdent une masse: ils subissent donc une attraction gravitationnelle. Calculons un ordre de grandeur de l'attraction gravitationnelle dans le cas de l'atome hydrogène:

$$F_{p/e} = F_{e/p} = G \times \frac{m_p \times m_e}{d^2} \quad ; \text{ soit } F_{p/e} = F_{e/p} = 10^{-47} \text{ N}$$

Le noyau (les protons) et les électrons portent des charges de signes opposés: ils subissent donc une attraction électrique. Calculons un ordre de grandeur de l'attraction électrique dans le cas de l'atome hydrogène:

$$F_{p/e} = F_{e/p} = k \times \frac{|q_p \times q_e|}{d^2} \quad ; \text{ soit } F_{p/e} = F_{e/p} = 10^{-7} \text{ N}$$

L'attraction universelle est donc négligeable devant l'attraction électrique. *L'interaction électrique assure ainsi la cohésion de la matière à l'échelle atomique.*



2.2. LES MANIFESTATIONS DE L'INTERACTION ELECTROMAGNETIQUE.

Les électrons d'un atome sont liés au noyau par l'attraction s'exerçant entre charges électriques de signes opposés.

Il en est de même pour les anions et les cations d'un solide ionique.

La liaison chimique entre atomes d'une même molécule est fondée, mais de façon complexe (elle ne se réduit pas à l'attraction entre charges électriques de signes opposés), sur l'interaction électromagnétique.

L'attraction entre molécules d'un liquide ou d'un solide moléculaire est également de nature électromagnétique. Cette interaction, qui assure la cohésion d'un fil ou d'un ressort tendu, explique la résistance d'un solide à la déformation.



Remarque.

Ces forces ont une portée infinie et sont 10^{36} fois plus fortes que les forces gravitationnelles. Sur Terre, c'est parce que les objets macroscopiques sont généralement neutres, et que la masse de la Terre est importante, que l'interaction électrique est souvent imperceptible.

2.3. ENONCE.

Deux corps ponctuels A et B, séparés d'une distance $d=AB$ et portant respectivement les charges q_A et q_B , sont soumis à deux forces directement opposées de même valeur:

$$F = k \frac{q_A \cdot q_B}{d^2}$$

F en Newton (N)
 q_A et q_B en Coulomb (C)
d en mètre (m)
 $k = 9,0 \times 10^9 \text{ N.m}^2.\text{C}^{-2}$ dans le vide ou dans l'air.

Les deux forces ont la même droite d'action: la droite (AB).

Ces forces sont attractives si les charges sont de signes contraires et répulsives si les charges sont de même signe.

2.4. UNE INTERACTION A COURTE PORTEE.

Deux molécules exercent l'une sur l'autre des forces:

- attractives (entre protons de l'une et électrons de l'autre);
- répulsives (entre protons - ou électrons - de l'une et de l'autre).

Comme toutes les molécules sont électriquement neutres, ces forces tendent à se compenser. Toutefois, la compensation n'est pas totale pour les molécules en contact: dans ce cas, les forces attractives l'emportent, ce qui explique la cohésion des solides ou des liquides moléculaires.

La force résultante décroît très rapidement avec la distance: sa portée n'excède pas quelques dimensions moléculaires. C'est pourquoi les forces de cohésion au sein d'un liquide ou d'un solide n'augmentent pas avec son volume.

Les forces d'interaction électromagnétiques sont inexistantes entre solides distincts électriquement neutres.

3. COHESION DE LA MATIERE A L'ECHELLE ASTRONOMIQUE: INTERACTION GRAVITATIONNELLE

3.1. LES MANIFESTATIONS DE L'INTERACTION GRAVITATIONNELLE.

En dehors de toute action d'électrisation, la matière est électriquement neutre car elle est formée d'atomes, eux-mêmes neutres.

Dans ces conditions, la matière, à l'échelle astronomique ne met pas en jeu l'interaction électrique: seule l'interaction gravitationnelle, attractive, intervient. *L'interaction gravitationnelle assure la cohésion de la matière à l'échelle de l'Univers.*

Elle est responsable

De la forme et de l'existence des galaxies, des étoiles et des planètes, de la naissance et de la mort des étoiles. D'immenses nuages de gaz se sont contractés sous l'effet de l'attraction gravitationnelle.

Elle régit le mouvement des satellites, des corps célestes et des galaxies.

Les forces gravitationnelles ont une portée infinie et sont toujours attractives. De ce fait, malgré leur faible intensité elles cumulent leurs effets et leurs actions se manifestent même à des distances astronomiques.

Dans l'Univers la loi de l'attraction universelle est vérifiée avec une grande précision par l'étude du mouvement des planètes, des étoiles doubles.

Dans la vie courante, cette interaction se manifeste par la pesanteur: tous les objets sont attirés par la Terre, notamment les molécules de l'atmosphère. Si cette attraction avait été insuffisante, celles-ci se seraient dissipées dans l'espace, empêchant l'apparition de la vie. Quand l'astre est trop léger, l'interaction gravitationnelle est trop faible pour retenir l'atmosphère: c'est la cas, par exemple, de la Lune.

3.2. ENONCE

Deux corps ponctuels de masse m_A et m_B , séparés d'une distance d , exercent l'un sur l'autre des forces attractives $F_{A/B}$ et $F_{B/A}$, de même direction, de sens opposés et de même valeur:

$$F_{A/B} = F_{B/A} = \frac{m_A \cdot m_B}{d^2}$$

F en Newton

avec m_A et m_B en kilogramme (kg)

d en mètre (m)

$G = 6,67 \cdot 10^{-11}$ S.I.

4. POUR CONCLURE.

Trois interactions fondamentales assurent dans l'univers la cohésion de la matière à différentes échelles:

- l'interaction forte à l'échelle du noyau;
- l'interaction électromagnétique à l'échelle atomique et humaine;
- l'interaction gravitationnelle à l'échelle astronomique.

