

1

Les interactions fondamentales

1. LA STRUCTURE DE LA MATIERE

1.1. Les particules élémentaires

La matière est constituée au niveau microscopique par des atomes, des ions et des molécules. Ces édifices résultent de l'assemblage de trois briques de base : protons, neutrons et électrons appelées particules élémentaires.

	Localisation	Masse	Charge
Proton	dans le noyau	$m_p = 1,67.10^{-27}$ kg	$q_p = 1,60.10^{-19}$ C
Neutron	dans le noyau	$m_n = 1,67.10^{-27}$ kg	$q_n = 0$ C
Electron	autour du noyau	$m_e = 9,11.10^{-31}$ kg	$q_e = -1,60.10^{-19}$ C

Remarques

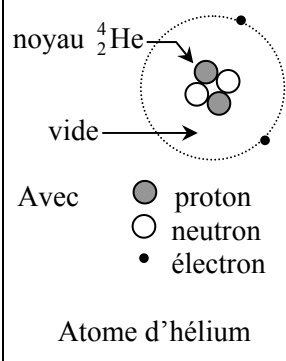
Protons et neutrons sont appelés nucléons.

La masse d'un nucléon est environ 2 000 fois plus grande que celle d'un électron.

Toute charge électrique est multiple de la charge élémentaire $e = 1,60.10^{-19}$ C.

1.2. Les atomes

Un atome est composé d'un noyau autour duquel gravitent des électrons. Il possède autant d'électrons que de protons car il est neutre électriquement. Sa structure est lacunaire et toute sa masse est quasiment concentrée dans son noyau.

Modèle atomique planétaire	Caractéristiques principales d'un atome
 <p>noyau ${}^4_2\text{He}$</p> <p>vide</p> <p>Avec</p> <ul style="list-style-type: none"> ● proton ○ neutron • électron <p>Atome d'hélium</p>	<p>Dimensions : $r_{\text{noyau}} \approx 10^{-15} \text{ m}$; $r_{\text{atome}} = 10^{-10} \text{ m}$. Le rayon atomique est environ 100 000 fois plus grand que celui du noyau.</p>
	<p>Symbolisation et composition du noyau :</p> <p>nombre de masse (nombre de nucléons) \rightarrow</p> <p>numéro atomique (nombre de protons) \rightarrow</p> <p>${}^A_Z X$ ← symbole de l'élément</p>
	<p>nombre de neutrons : $N = A - Z$.</p>
	<p>Masse : $m_{\text{atome}} \approx m_{\text{noyau}} = A m_{\text{nucléon}}$.</p>

Remarques

Des isotopes d'un élément sont des atomes possédant le même numéro atomique mais un nombre de masses différent (exemple : ${}^{12}_6\text{C}$ et ${}^{14}_6\text{C}$).

Une molécule est l'association électriquement neutre de plusieurs atomes.

Un ion monoatomique est un atome ayant perdu ou gagné un ou plusieurs électrons sans que son noyau ait été modifié. En particulier, si n désigne un entier naturel non nul ($n = 1, 2, 3, \dots$), alors :

- un cation du type X^{n+} résulte de la perte de n électrons par un atome X
- un anion du type X^{n-} résulte du gain de n électrons par un atome X .

🦋 Exercice d'application 1

L'aluminium, dont le noyau est symbolisé par ${}^{27}_{13}\text{Al}$, est un métal argenté malléable de faible densité très utilisé dans l'industrie agroalimentaire pour fabriquer des canettes recyclables. Son rayon atomique est de 0,15 nm alors que le rayon de son noyau vaut 125 fm.

1. Quelle est la composition de cet atome ?
2. Comparer les tailles respectives de cet atome et de son noyau.
3. Pourquoi la structure de l'atome d'aluminium est-elle qualifiée de lacunaire ?
4. Calculer la masse du noyau et celle du nuage électronique. Quelle conclusion peut-on en tirer ?
5. En déduire le nombre d'atomes d'aluminium présents dans une canette de soda de masse 30 g.
6. L'aluminium peut s'oxyder très lentement en produisant des ions Al^{3+} . Indiquer la composition de cet ion et calculer la valeur de sa charge électrique.

1. Le noyau d'aluminium ${}_{13}^{27}\text{Al}$ est de la forme ${}^A_Z X$.

Il renferme donc **$Z = 13$ protons** et **$N = A - Z = 14$ neutrons**. En outre, l'atome d'aluminium étant électriquement neutre, il contient autant d'électrons que de protons. Son nuage électronique est donc composé de **$Z = 13$ électrons**.

2. Afin de comparer les tailles respectives de l'atome d'aluminium et de son noyau on évalue le rapport suivant :

$$\frac{r(\text{atome})}{r(\text{noyau})} = \frac{0,15 \cdot 10^{-9}}{125 \cdot 10^{-15}} = \mathbf{1,2 \cdot 10^3}$$

Le rayon de cet atome est donc 2 320 fois plus grand que celui du noyau.

3. La structure de l'atome d'aluminium est qualifiée de lacunaire car les particules élémentaires qui le composent sont localisées dans de petites régions de l'espace entourées par du vide.

4. $m(\text{noyau}) = A m_n = 27 \times 1,67 \cdot 10^{-27} = \mathbf{4,51 \cdot 10^{-26} \text{ kg}}$.

$$m(\text{nuage}) = Z m_e = 13 \times 9,11 \cdot 10^{-31} = \mathbf{1,18 \cdot 10^{-29} \text{ kg}}$$

On remarque que : $\frac{m(\text{noyau})}{m(\text{nuage})} = \frac{4,51 \cdot 10^{-26}}{1,18 \cdot 10^{-29}} = \mathbf{3,82 \cdot 10^3}$.

La masse du noyau d'aluminium est donc 3 820 fois plus grande que celle de son nuage électronique. On en déduit donc que :

$$m(\text{atome}) = m(\text{noyau}) + m(\text{nuage})$$

$$\boxed{m(\text{atome}) \approx m(\text{noyau})} = \mathbf{4,51 \cdot 10^{-26} \text{ kg}}$$

La masse de l'atome d'aluminium s'identifie donc quasiment à celle de son noyau. La masse d'un atome est donc concentrée dans son noyau.

5. Le nombre N d'atomes d'aluminium contenu dans une canette de 30 g est :

$$N = \frac{30 \cdot 10^{-3}}{4,51 \cdot 10^{-26}} = \mathbf{6,7 \cdot 10^{23}}$$

6. Les seules particules élémentaires chargées sont les protons et les électrons. Le cation Al^{3+} résulte de la perte de trois électrons par l'atome d'aluminium sans que le noyau de ce dernier ait été modifié. Le noyau de l'ion Al^{3+} comporte $Z = 13$ protons et $N = A - Z = 14$ neutrons. En revanche, son nuage électronique est composé de $13 - 3 = 10$ électrons. La charge totale de l'ion est donc :

$$Q(\text{ion}) = q(\text{noyau}) + q(\text{nuage})$$

Les interactions fondamentales

$$Q(\text{ion}) = 13 \times 1,60 \cdot 10^{-19} + 10 \times (-1,60 \cdot 10^{-19}) = 3 \times 1,60 \cdot 10^{-19}$$

$$Q(\text{ion}) = 4,80 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

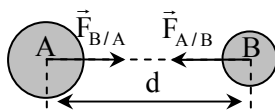
La charge d'un ion est donc un multiple de la charge élémentaire $e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

2. LES INTERACTIONS FONDAMENTALES

2.1. L'interaction gravitationnelle

Deux corps homogènes ou à répartition sphérique de masse, notés A et B, de masses respectives m_A et m_B , dont les centres sont séparés par une distance d , exercent mutuellement l'un sur l'autre une force d'attraction gravitationnelle caractérisée par :

- sa direction : celle de la droite (AB) ;
- son sens : attractif ;
- sa valeur (en newtons, N) :



$$F_{A/B} = F_{B/A} = G \frac{m_A m_B}{d^2} \text{ (Loi de Newton)}$$

avec m_A et m_B en kilogrammes (kg), d en mètres (m) et $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$ (constante de gravitation universelle).

Exercice d'application 2

Dans l'un de ses célèbres romans intitulé *De la Terre à la Lune*, Jules Verne (1828-1905) relate les aventures de trois héros ayant pris place l'intérieur d'un énorme projectile qu'un gigantesque canon, baptisé Colombiad, propulse en direction de la Lune. Lors de ce périple Jules Verne fait allusion à un point neutre situé à 350 000 km du centre de la Terre où les forces gravitationnelles exercées par la Terre et la Lune sur le projectile se compensent exactement. On admettra que le voyage s'effectue en ligne droite.

Données : distance moyenne Terre Lune (centre à centre) $d_{TL} = 384\,000 \text{ km}$
masse et rayon de la Terre $M_T = 5,98 \cdot 10^{24} \text{ kg}$, $R_T = 6\,380 \text{ km}$
masse de la Lune $M_L = 7,35 \cdot 10^{22} \text{ kg}$
masse du projectile : $M_p = 9\,625 \text{ kg}$.

1. Calculer les valeurs des forces d'attraction gravitationnelle qu'exercent respectivement la Terre et la Lune sur le projectile avant son lancement.

2. Comparer les valeurs de ces deux forces. Quelle conclusion peut-on en tirer ?
3. En déduire la valeur de l'intensité de la pesanteur terrestre g à l'endroit du lancement.
4. Montrer que le point neutre auquel fait allusion Jules Verne est nécessairement situé entre la Terre et la Lune sur la droite joignant les centres de ces deux astres.
5. Retrouver la valeur de la distance séparant le centre de la Terre du point neutre annoncé par Jules Verne.

Corrigé

1. A la surface terrestre, la valeur de la force d'attraction gravitationnelle qu'exerce la Terre sur le projectile est :

$$F_{T/P} = G \frac{M_T M_P}{R_T^2}$$

$$\text{A.N. : } F_{T/P} = 6,67 \cdot 10^{-11} \times \frac{(5,98 \cdot 10^{24} \times 9\,625)}{(6\,380 \cdot 10^3)^2} = \mathbf{9,43 \cdot 10^4 \text{ N}}$$

A la surface terrestre, la valeur de la force d'attraction gravitationnelle qu'exerce la Lune sur le projectile est :

$$F_{L/P} = G \frac{M_L M_P}{d^2} \text{ avec } d = d_{TL} - R_T$$

$$\text{A.N. : } F_{L/P} = 6,67 \cdot 10^{-11} \times \frac{(7,35 \cdot 10^{22} \times 9\,625)}{(384\,000 \cdot 10^3 - 6\,380 \cdot 10^3)^2} = \mathbf{3,31 \cdot 10^{-1} \text{ N}}$$

2. Comparons les valeurs de ces deux forces : $\frac{F_{T/P}}{F_{L/P}} = \frac{9,43 \cdot 10^4}{3,31 \cdot 10^{-1}} = \mathbf{2,85 \cdot 10^5}$

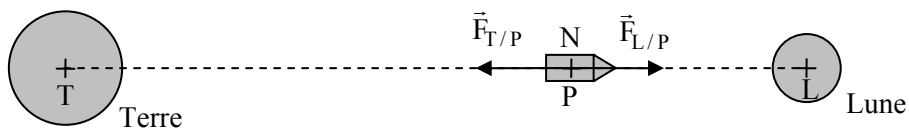
La valeur de la force d'attraction gravitationnelle qu'exerce la Terre sur un objet à sa surface est environ 285 000 fois plus grande que celle qu'exerce la Lune sur ce dernier.

3. Un objet situé au voisinage de la surface terrestre est soumis uniquement à la force d'attraction gravitationnelle que la Terre exerce sur lui (l'influence des autres astres tels que la Lune ou le Soleil étant négligeable). La valeur de la force d'attraction gravitationnelle exercée par la Terre sur le projectile s'identifie donc à la valeur de son poids ce qui se traduit par :

$$F_{T/P} = P \text{ soit } F_{T/P} = M_P g \text{ d'où } \boxed{g = \frac{F_{T/P}}{M_P}}$$

$$\text{A.N. : } g = \frac{9,43 \cdot 10^4}{9\,625} = \mathbf{9,80 \text{ N.kg}^{-1}}$$

4. D'après la définition du point neutre noté N, les deux forces gravitationnelles exercées sur le projectile en ce point, doivent être opposées (même direction, même valeur et sens contraire).



Les trois points T, L et N doivent être alignés, et N doit être situé entre T et L.

5. Au point neutre N on doit avoir :

$$F_{T/P} = F_{L/P} \text{ soit } G \frac{M_T M_P}{TN^2} = G \frac{M_L M_P}{LN^2} \text{ avec } LN = d_{TL} - d$$

Recherchons la distance $d = TN$ à laquelle le point neutre N se trouve de la Terre. D'après l'égalité précédente on a :

$$\begin{aligned} \frac{M_T}{d^2} &= \frac{M_L}{(d_{TL} - d)^2} \Rightarrow \frac{(d_{TL} - d)^2}{d^2} = \frac{M_L}{M_T} \Rightarrow \frac{(d_{TL} - d)}{d} = \sqrt{\frac{M_L}{M_T}} \\ \Rightarrow \frac{d_{TL}}{d} - 1 &= \sqrt{\frac{M_L}{M_T}} \Rightarrow \frac{d_{TL}}{d} = \sqrt{\frac{M_L}{M_T}} + 1 \Rightarrow \frac{d}{d_{TL}} = \frac{1}{\left(\sqrt{\frac{M_L}{M_T}} + 1\right)} \end{aligned}$$

D'où finalement :

$$\boxed{d = \frac{d_{TL}}{\left(\sqrt{\frac{M_L}{M_T}} + 1\right)}}$$

$$\text{A.N. : } d = \frac{384\,000 \cdot 10^3}{\left(\sqrt{\frac{7,35 \cdot 10^{22}}{5,98 \cdot 10^{24}} + 1}\right)} = 3,46 \cdot 10^8 \text{ m} \approx \mathbf{3,5 \cdot 10^5 \text{ km}}$$

Le point neutre est donc situé à environ 350 000 km du centre de la Terre comme annoncé par Jules Verne.

2.2. L'interaction électrique

Conducteur et isolant

Dans un conducteur métallique, les électrons de conduction qui sont peu liés aux noyaux peuvent se déplacer collectivement sur de grandes distances. Dans un isolant tous les électrons sont fortement liés au noyau et ne peuvent donc se déplacer que sur des distances inférieures aux distances atomiques.

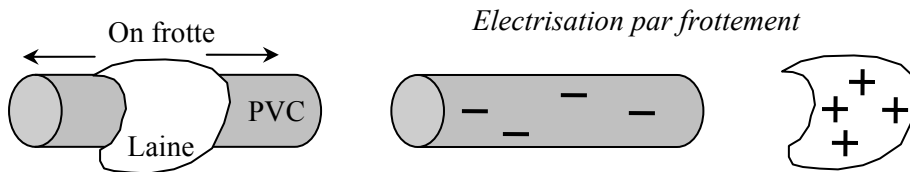
Remarque

Le courant électrique est dû au déplacement de porteurs de charges qui sont :

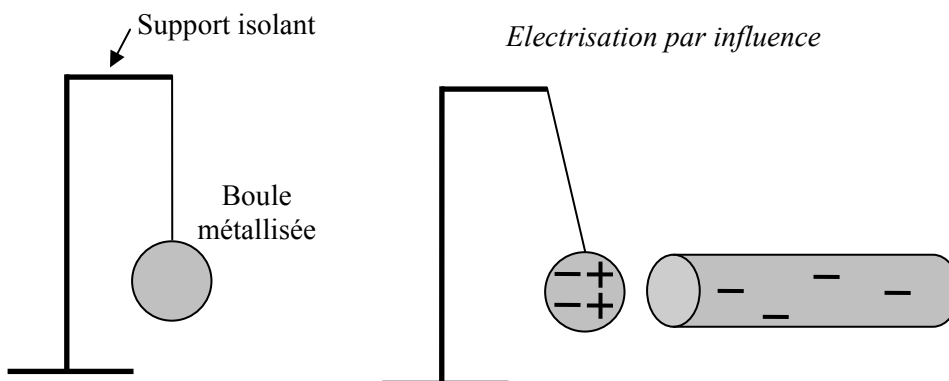
- les électrons dans les matériaux métalliques ;
- les ions dans les solutions.

Le phénomène d'électrisation

Il est possible d'électriser un matériau en déplaçant une partie de ses électrons par frottement, influence ou contact.

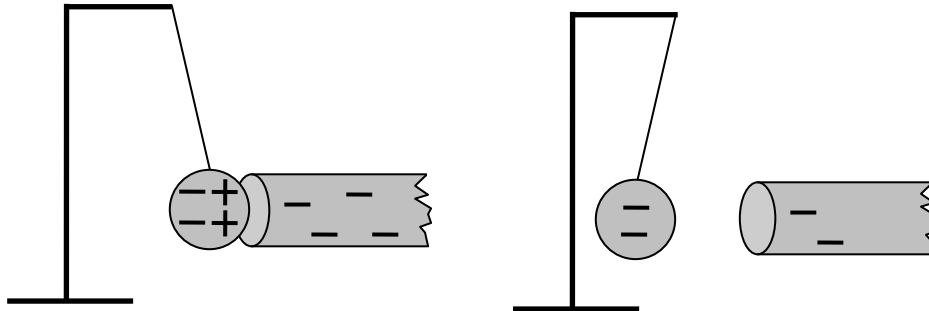


Une tige en PVC, frottée avec un chiffon de laine, arrache des électrons à celui-ci. La tige initialement neutre se charge alors négativement car elle présente un excès d'électrons.



A l'approche de la tige de PVC chargée négativement, la boule métallisée neutre électriquement est le siège d'une redistribution de ses charges : un excès de charges positives (déficit électronique) apparaît alors en face de la tige et la boule est attirée par celle-ci.

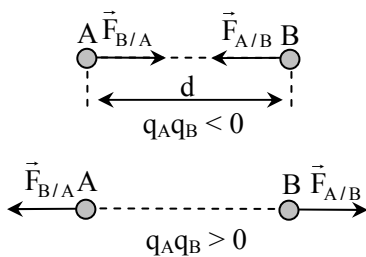
Electrisation par contact



Lors du contact avec la tige de PVC, la boule métallisée se charge négativement par contact (transfert d'électrons de la tige vers la boule). Les charges portées par la boule métallisée et la tige étant de même signe, une répulsion entre les deux objets apparaît.

La loi de Coulomb

Deux objets quasi ponctuels, notés A et B, séparés par une distance d et portant des charges électriques q_A et q_B exercent mutuellement l'un sur l'autre une force électrostatique caractérisée par :



- sa direction : celle de la droite (AB) ;
- son sens : attractif si $q_A q_B < 0$;
répulsif si $q_A q_B > 0$;
- sa valeur (en newtons, N) :

$$F_{A/B} = F_{B/A} = k \frac{|q_A| |q_B|}{d^2} \text{ (Loi de Coulomb)}$$

avec q_A et q_B en coulombs (C), d en mètres (m) et $k = 9,0 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{C}^{-2} \cdot \text{m}^2$.

🔪 Exercice d'application 3 _____

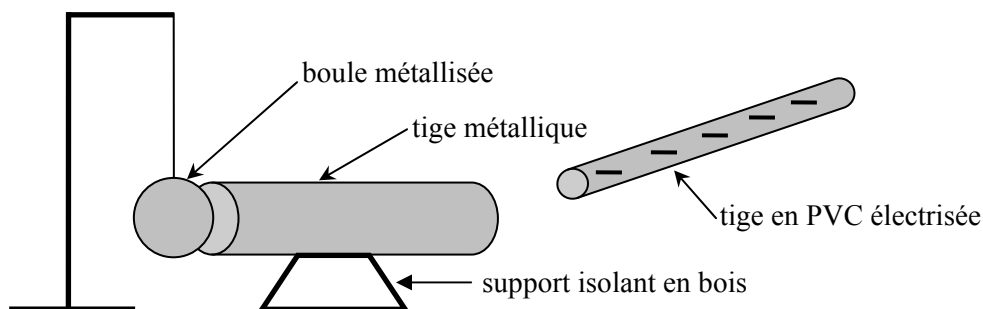
1. Une tige métallique repose sur un support isolant en bois. L'une de ses extrémités est en contact avec la boule métallisée d'un pendule électrostatique. Une tige de PVC est énergiquement frottée avec un chiffon en laine. On la met

en contact avec l'extrémité libre de la tige métallique : la boule métallisée s'écarte alors de la tige.

- a) Interpréter le phénomène.
 - b) Que se passerait-il si on remplaçait la tige métallique par une tige en bois ?
2. On retire la tige métallique et le support en bois. On suppose que suite à l'expérience décrite au début de l'énoncé, la boule métallisée dont la masse est $m_A = 10 \text{ mg}$ porte une charge électrique $q_A = -50 \text{ nC}$ et qu'elle occupe à nouveau sa position d'équilibre. On approche alors une tige en verre préalablement frottée avec un chiffon en laine de la boule métallisée. On observe que la boule métallisée s'approche de la tige en verre.
- a) Caractériser la nature de l'interaction entre la boule métallisée du pendule et la tige en verre. En déduire le signe de la charge électrique portée par cette dernière.
 - b) Expliquer l'action du chiffon en laine sur la tige en verre.
 - c) On suppose que la tige en verre porte une charge électrique $q_B = 100 \text{ nC}$ et qu'elle soit distante de $1,0 \text{ cm}$ de la boule métallisée. Calculer la valeur de la force électrostatique s'exerçant entre les deux objets.
 - d) Calculer la valeur de la force gravitationnelle s'exerçant entre la boule métallisée et la Terre de masse $m_C = 5,97 \cdot 10^{24} \text{ kg}$ et de rayon $R = 6380 \text{ km}$.
 - e) Comparer les valeurs de ces deux forces et justifier l'observation expérimentale.

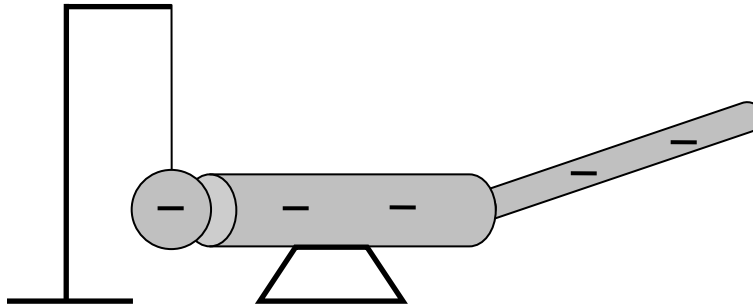
Corrigé

1. a) Des électrons sont arrachés du chiffon en laine par la tige en PVC qui se charge alors négativement : elle présente en excès d'électrons.

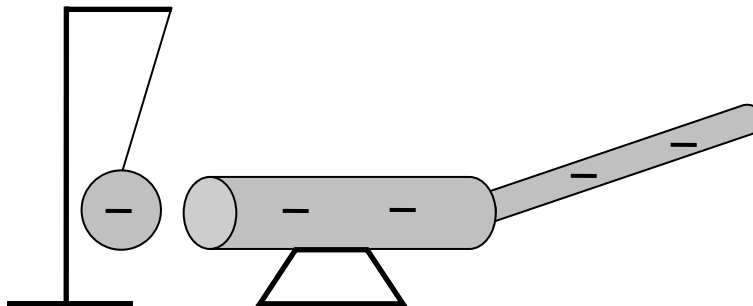


Lors du contact entre la tige en PVC électrisée et la tige métallique, une partie des électrons en excès se propage dans toutes les parties métalliques conductrices de l'électricité (tige métallique et boule métallisée).

Les interactions fondamentales



On observe alors une répulsion électrostatique entre la boule métallisée et la tige métallique qui portent des charges électriques de même signe.



b) Si on remplace la tige métallique par une tige isolante en bois, les électrons en excès sur la tige de verre ne peuvent pas se propager jusqu'à la boule métallisée. Cette dernière demeure neutre électriquement et rien ne se produit.

2. a) La force électrostatique qu'exercent mutuellement l'une sur l'autre la tige en verre électrisée et la boule métallisée est attractive. Cela indique que ces deux objets portent des charges électriques de signes opposés. La boule métallisée étant chargée négativement on peut donc en déduire que la tige en verre est chargée positivement.

b) Si la tige en verre est chargée positivement c'est qu'elle possède un déficit électronique. Celui-ci résulte de l'arrachage d'un certain nombre d'électrons par le chiffon en laine (électrisation par frottement).

c) D'après la loi de Coulomb, la valeur de cette force électrostatique est :

$$F_{B/A} = F_{A/B} = k \frac{|q_A| |q_B|}{d^2}$$

Les interactions fondamentales

$$\text{A.N. : } F_{B/A} = F_{A/B} = 9,0 \cdot 10^9 \times \frac{|-50 \cdot 10^{-9}| |100 \cdot 10^{-9}|}{(1,0 \cdot 10^{-2})^2} = 4,5 \cdot 10^{-1} \text{ N}$$

d) D'après la loi de Newton, la valeur de la force d'attraction gravitationnelle qu'exerce la Terre sur la boule métallisée est :

$$F_{C/A} = F_{A/C} = G \frac{m_A m_C}{R^2}$$

$$\text{A.N. : } F_{C/A} = F_{A/C} = 6,67 \cdot 10^{-11} \times \frac{10 \cdot 10^{-3} \times 5,97 \cdot 10^{24}}{(6,380 \cdot 10^6)^2} = 9,8 \cdot 10^{-2} \text{ N}$$

e) Comparons la valeur de la force électrostatique avec la force gravitationnelle :

$$\frac{F_{B/A}}{F_{C/A}} = \frac{4,5 \cdot 10^{-1}}{9,78 \cdot 10^{-2}} = 4,6$$

La valeur de la force électrostatique est environ 5 fois plus importante que celle de la force gravitationnelle. C'est ce qui explique le déplacement de la boule métallisée vers la règle.

3. LA COHESION DE LA MATIERE

3.1. A l'échelle de l'Univers

L'interaction gravitationnelle, de longue portée, assure la cohésion de la matière à l'échelle de l'Univers.

3.2. A l'échelle atomique et humaine

A l'échelle atomique et humaine, l'interaction électromagnétique dont la force électrostatique est une des manifestations, assure la cohésion de la matière.

3.3. A l'échelle du noyau atomique

A l'échelle du noyau atomique l'interaction forte, de faible portée, assure la cohésion de la matière.

Exercice d'application 4

« L'hélium 4 », dont le noyau est symbolisé par ${}^4_2\text{He}$, est un gaz peu dense servant à remplir l'enveloppe des ballons dirigeables. Dans cet atome, une particule du nuage électronique est distante en moyenne du noyau de 55 pm.

1. Quelles sont les différentes particules élémentaires constituant cet atome ?
2. Les noyaux d'hélium se rencontrent également sous la forme ${}^3_2\text{He}$.
Quel nom donne-t-on aux noyaux ${}^3_2\text{He}$ et ${}^4_2\text{He}$?
3. On s'intéresse dans un premier temps aux forces s'exerçant entre le noyau d'hélium 4 et une particule du nuage électronique.
 - a) Calculer la valeur de la force gravitationnelle s'exerçant entre le noyau et une particule du nuage électronique de l'atome d'hélium.
 - b) Calculer la valeur de la force électrostatique s'exerçant entre le noyau et une particule du nuage électronique.
 - c) Comparer les valeurs de ces deux forces. Quelle conclusion peut-on en tirer ?
4. On considère maintenant les forces s'exerçant entre deux particules chargées à l'intérieur du noyau d'hélium 4. On suppose que la distance entre deux nucléons est en moyenne $1,2 \cdot 10^{-15}$ m.
 - a) Calculer la valeur de la force gravitationnelle s'exerçant entre deux nucléons du noyau.
 - b) Calculer la valeur de la force électrostatique s'exerçant entre deux particules chargées du noyau.
 - c) Comparer les valeurs de ces deux forces. Comment expliquer la cohésion du noyau d'hélium ?

Corrigé

1. Le noyau d'hélium ${}^4_2\text{He}$ est de la forme ${}^A_Z\text{X}$.

Il renferme donc **Z = 2 protons** et **N = A - Z = 2 neutrons**. En outre, l'atome d'hélium étant électriquement neutre, il contient autant d'électrons que de protons. Son nuage électronique est donc composé de **Z = 2 électrons**.

Les interactions fondamentales

2. Les noyaux ${}^3_2\text{He}$ et ${}^4_2\text{He}$ possèdent le même nombre de protons mais pas le même nombre de nucléons. Ils diffèrent par leur nombre de neutrons : ce sont des isotopes de l'élément hélium.

3. a) La valeur de la force gravitationnelle s'exerçant entre le noyau et une particule du nuage électronique de l'atome d'hélium est :

$$F_{\text{grav}} = G \frac{m_{\text{noyau}} m_e}{d^2} \text{ avec } m_{\text{noyau}} = A m_{\text{nucléon}}$$

$$\text{A.N. : } F_{\text{grav}} = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{(4 \times 1,67 \cdot 10^{-27} \times 9,11 \cdot 10^{-31})}{(55 \cdot 10^{-12})^2} = \mathbf{1,3 \cdot 10^{-46} \text{ N}}$$

b) La valeur de la force électrostatique s'exerçant entre le noyau et une particule du nuage électronique est :

$$F_{\text{élec}} = k \frac{|q_{\text{noyau}}| |q_e|}{d^2} \text{ avec } q_{\text{noyau}} = Z q_p$$

En effet seuls les protons participent à la charge électrique du noyau.

$$\text{A.N. : } F_{\text{élec}} = 9,0 \cdot 10^9 \times \frac{|2 \times 1,60 \cdot 10^{-19}| | -1,60 \cdot 10^{-19}|}{(55 \cdot 10^{-12})^2} = \mathbf{1,5 \cdot 10^{-7} \text{ N}}$$

c) Comparons les valeurs de ces deux forces :

$$\frac{F_{\text{élec}}}{F_{\text{grav}}} = \frac{1,5 \cdot 10^{-7}}{1,3 \cdot 10^{-46}} = \mathbf{1,2 \cdot 10^{39}}$$

La force électrostatique est donc environ $1 \cdot 10^{39}$ plus grande que la force gravitationnelle ! A l'échelle atomique, la valeur de la force gravitationnelle est donc négligeable par rapport à celle de la force électrostatique. La cohésion de la matière est donc assurée à cette échelle par la force électrostatique.

4. a) La valeur de la force gravitationnelle s'exerçant entre deux nucléons du noyau est :

$$F'_{\text{grav}} = G \frac{m_{\text{nucléon}} m_{\text{nucléon}}}{d^2}$$

Les interactions fondamentales

$$\text{A.N. : } F'_{\text{grav}} = 6,67 \cdot 10^{-11} \times \frac{(1,67 \cdot 10^{-27} \times 1,67 \cdot 10^{-27})}{(1,2 \cdot 10^{-15})^2} = \mathbf{1,3 \cdot 10^{-34} \text{ N}}$$

b) La valeur de la force électrostatique s'exerçant entre deux particules chargées du noyau a pour expression :

$$F'_{\text{élec}} = k \frac{|q_p| |q_p|}{d^2}$$

$$\text{A.N. : } F'_{\text{élec}} = 9,0 \cdot 10^9 \times \frac{|1,60 \cdot 10^{-19}| |1,60 \cdot 10^{-19}|}{(1,2 \cdot 10^{-15})^2} = \mathbf{1,6 \cdot 10^2 \text{ N}}$$

c) Comparons les valeurs de ces deux forces :

$$\frac{F'_{\text{élec}}}{F'_{\text{grav}}} = \frac{1,6 \cdot 10^2}{1,3 \cdot 10^{-34}} = \mathbf{1,2 \cdot 10^{36}}$$

La force électrostatique est donc environ 10^{36} plus grande que la force gravitationnelle ! A l'échelle du noyau, la force de répulsion électrostatique entre protons est donc beaucoup plus intense que la force d'attraction gravitationnelle qu'ils exercent mutuellement l'un sur l'autre. Le noyau résiste à la forte répulsion électrostatique entre protons grâce à une interaction attractive de courte portée entre nucléons appelée "interaction forte".