Chapitre 1
Interactions fondamentales

L'essentiel à connaître

Rappels de cours

Constituants fondamentaux de la matière

Trois particules fondamentales permettent la constitution des atomes, entités qui composent notre univers de l'infiniment petit à l'infiniment grand. Les **protons** et **neutrons –** que l'on appelle **nucléons –** constituant le noyau de l'atome, l'**électron** en interaction autour du noyau.

Carte d'identité de ces entités

Particule	proton	neutron	électron
masse (kg)	$1{,}673.10^{-27}$	$1{,}675.10^{-27}$	$9{,}110.10^{-31}$
charge électrique C (Coulomb)	$1{,}602.10^{-19}$	0	$-1{,}602.10^{-19}$

Le noyau de l'atome constitue l'essentiel de sa masse du fait de la différence d'ordre de grandeur entre la masse d'un nucléon et celle de l'électron.

On retiendra : $\frac{m_{proton}}{m_{électron}} = \frac{1{,}673.10^{-27}}{9{,}110.10^{-31}} = 1836$. Le nucléon – proton ou neutron – est ainsi **environ 2000 fois** plus massif que l'électron.

Phénomène d'électrisation et transfert de charges

La matière est électriquement neutre. Il est cependant possible de créer des déséquilibres par transfert de charges d'un corps à un autre. Les entités transférées étant les électrons de charge négative, un corps voyant une perte d'électrons sera chargé positivement tandis qu'un corps voyant un gain d'électrons sera chargé négativement.
Exemples caractéristiques :
• Une tige en PVC frottée avec une fourrure laisse apparaître une charge négative.
• Une tige de verre frottée avec de la laine se charge positivement.

Ainsi, toute charge électrique – qu'elle soit positive ou négative – sera un multiple entier de la valeur du quantum de charge à savoir $e = 1{,}602.10^{-19}$ C
On retiendra pour une charge électrique quelconque :

$\boxed{Q = \pm ne}$ avec n entier

On retiendra deux grands types de matériaux vis-à-vis des charges électriques :
• Les **conducteurs** qui comme leur nom l'indique permettent la libre circulation des électrons en leur sein, circulation assurée par des électrons dits **libres**.
• Les **isolants** qui à l'inverse des conducteurs ne permettent pas la circulation des charges électriques.
(On retiendra également le terme de **semi-conducteur**, matériau qui a des propriétés intermédiaires entre celles d'un conducteur et d'un isolant)

Interactions régissant l'univers

Les interactions fondamentales qui permettent d'expliquer la cohésion de la matière suivant l'échelle à laquelle l'observateur se trouve sont :

L'interaction forte, interaction de très courte portée – quelques femtomètres – à l'échelle du noyau atomique permettant la cohésion des nucléons.

L'interaction électromagnétique à l'échelle des atomes et molécules et de la matière à notre échelle. C'est cette interaction qui est responsable de la cohésion des atomes au sein d'une molécule.

L'interaction gravitationnelle à l'échelle astronomique qui régit le ballet cosmique.

Expression de la force d'interaction électrostatique

La force d'interaction électrostatique est la composante électrique de la force d'interaction électromagnétique. Elle ne se manifeste que si les 2 entités présentent une charge électrique. Le neutron n'est ainsi pas sensible à cette interaction.

Soit ainsi deux charges électriques q_1 et q_2 distantes de la distance d, l'intensité de la force électrostatique que subit chacune de ces charges s'écrit :

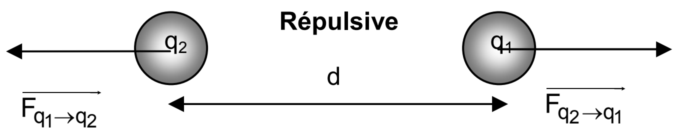
$$\boxed{F = k\frac{q_1 q_2}{d^2}} \text{ (loi de Coulomb)}$$

Où k est une constante et vaut $k = 9{,}0.10^9$ SI

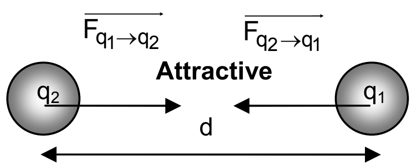
Pour connaître le sens de la force subie par une charge de la part de sa voisine, il faut regarder le signe de ces deux charges. Ainsi on aura une interaction :

- **attractive** si les charges sont de signes opposés,
- **répulsive** si les charges sont de même signe.

Charges de même signe :



Charges de signe différent :



L'essentiel à connaître

Expression de la force d'interaction gravitationnelle

Soit deux masses m_1 et m_2 seules dans l'univers et séparées par la distance d. Chacune de ces deux masses subit une force d'interaction *toujours attractive*, telle que :

$$\boxed{F_{m_1 \to m_2} = F_{m_2 \to m_1} = G\frac{m_1 m_2}{d^2}}$$

Où G est la constante d'interaction gravitationnelle
avec $G = 6{,}67.10^{-11}$ SI

Remarques

A la différence de la force d'interaction électrostatique, la force d'interaction gravitationnelle est **toujours attractive**.
On remarquera la similitude d'écriture entre les deux expressions.

1. Caractériser un transfert de charges

Méthode 1.1

Retenir que la charge transférée est l'électron de charge négative. Le corps électrisé sera alors :

- chargé négativement si celui-ci reçoit des électrons,
- chargé positivement si celui-ci perd des électrons.

Bien caractériser le transfert de charges (gain ou perte d'électrons) pour déterminer en conséquence le signe de la charge électrique du corps électrisé.

Exemple

On reprend les deux exemples donnés dans les rappels de cours :
1. Une tige en PVC frottée avec une fourrure laisse apparaître une charge négative.
2. Une tige de verre frottée avec de la laine se charge positivement. Pour chacun de ces exemples, déterminer le sens du transfert d'électrons.

Solution

1. Si la tige en PVC s'est chargée négativement, c'est qu'elle a reçu des électrons. Ainsi lorsque l'on frotte une tige de PVC avec une fourrure, des électrons sont « arrachés » de la fourrure pour venir s'accumuler sur la tige en PVC.

2. Cette situation est l'inverse de la précédente. Ici les électrons sont arrachés de la tige de verre pour venir s'accumuler sur la laine.

Méthode 1.2

Pour déterminer une charge électrique, chercher tout d'abord le nombre d'électrons concernés, puis multiplier ce nombre par la valeur de la charge d'un électron.

Exemple

Déterminer la charge électrique correspondant à une mole d'électrons.

Solution

Rappelons le nombre d'entités contenues dans une mole d'entités à savoir le nombre d'Avogadro : N_A=6,022.10^{23} mol^{-1}
La charge correspondante s'écrit alors :

$$\boxed{Q=N_A(-e)=6{,}022.10^{23}\times(-1{,}602.10^{-19})=-9{,}650.10^{4}\ \text{C}}$$

2. Utiliser une force d'interaction

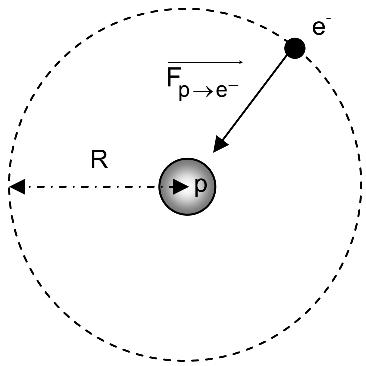
Méthode 2.1

Analyser le système étudié, à savoir le signe – positif ou négatif – des charges en présence.

Ecrire une expression littérale. La transformer pour déterminer le paramètre demandé.

Exemple

Dans le modèle simpliste de l'atome d'hydrogène, l'électron en orbite circulaire autour du proton, subit une force d'interaction électrostatique de la part de ce dernier de valeur F_{ele} = 8,22.10^{-8} N.
1. Schématiser l'atome d'hydrogène et déterminer le sens de la force d'interaction électrostatique subie par l'électron de par le proton.
2. Déterminer le rayon de l'atome d'hydrogène.



1. Le proton et l'électron ayant la même charge en valeur absolue mais des signes opposés, la force subit par l'électron sera donc une force attractive.

2. L'intensité de cette force d'interaction électrostatique s'écrit littéralement si R est la distance recherchée :

$$F_{ele} = k\frac{q_p\left|q_{e^-}\right|}{R^2} \text{ soit } R = \sqrt{\frac{kq_p\left|q_{e^-}\right|}{F}}$$

L'application numérique donne : $\boxed{R = 5{,}30.10^{-11} \text{ m} = 0{,}0530 \text{ nm}}$

(1 nm = 10^{-9} m)

Attention

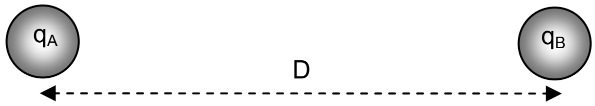
On prend ici la valeur absolue de la charge de l'électron car on ne s'intéresse qu'à l'intensité de la force. Le signe de la charge de l'électron permet de renseigner sur le sens de cette force.

Méthode 2.2

Analyser le signe des charges du système étudié. En déduire la nature répulsive ou attractive des forces appliquées à une charge. Déterminer la position de cette dernière pour que celle-ci reste en équilibre.

Exemple

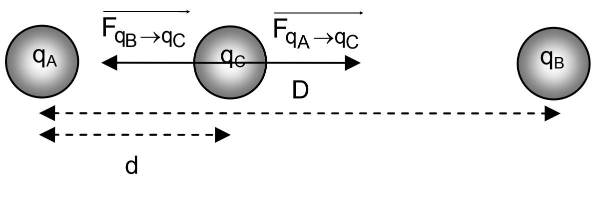
On considère deux charges q_A et q_B *fixes dans l'espace* de valeurs respectives (+e) et (+2e) et séparées par la distance D.



Où doit-on placer une charge q_C de charge (+e) pour que celle-ci soit en équilibre ? On appellera d la distance qui sépare la charge q_A de la charge q_C.

Solution

Toutes les charges en présence sont ici des charges positives, autrement dit des charges de même signe. Toutes les forces en présence sont donc de nature répulsive. En conséquence, l'équilibre de la charge q_C ne peut être réalisé que si celle-ci est disposée entre q_A et q_B.
D'autre part la charge q_B ayant une valeur supérieure à celle de q_A, la charge q_C sera plus proche de q_A que de q_B.
On aura alors la situation suivante :



Ainsi si la charge q_C est en équilibre on vérifie d'après le principe d'inertie :

$$\overrightarrow{F_{q_B \to q_C}} + \overrightarrow{F_{q_A \to q_C}} = \vec{0}$$

Ainsi $F_{q_B \to q_C} = F_{q_A \to q_C}$ ce qui donne $k\dfrac{q_A q_C}{d^2} = k\dfrac{q_B q_A}{(D-d)^2}$

$$\frac{e^2}{d^2} = \frac{2e^2}{(D-d)^2} \text{ soit } \frac{1}{d^2} = \frac{2}{(D-d)^2} \text{ ou encore } \frac{D-d}{d} = \sqrt{2}$$

$$\text{enfin} \quad \boxed{d = \frac{D}{1+\sqrt{2}}}$$

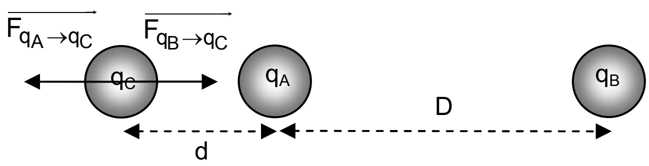
Exemple

On reprend l'exemple précédent en considérant maintenant que la charge q_B a pour valeur (-2e). Même question !

Solution

La charge q_C est maintenant soumise à une force de nature répulsive (de part q_A) et une autre de nature attractive (de part q_B) L'équilibre de la charge q_C ne peut être réalisé que si les deux forces sont opposées.

Cette condition est vérifiée ici si q_C est placée à gauche de q_A ou à droite de q_B. Encore une fois, la charge q_B ayant une valeur supérieure à celle de q_A en valeur absolue, la charge q_C sera disposée à gauche de q_A.



L'écriture de l'égalité de l'intensité des forces donne :

$$\frac{e^2}{d^2} = \frac{2e^2}{(d+D)^2}$$ **qui après résolution conduit à :**

$$\boxed{d = \frac{D}{\sqrt{2}-1}}$$

1.1. Exercice — 5 min

Quelle charge électrique serait-on susceptible de recueillir si l'on pouvait « extraire » complètement l'ensemble des électrons contenus dans un clou en fer de masse $m = 1{,}0$ g. ? On donne le numéro atomique du fer $Z = 26$ ainsi que sa masse molaire $M_{Fe} = 56\ g.mol^{-1}$.

Solution

Le numéro atomique nous informe que chaque atome de fer contient 26 protons, donc 26 électrons du fait de l'électroneutralité de l'atome. Il convient tout d'abord de déterminer le nombre d'atomes de fer contenus dans ce clou.

Le nombre de moles de fer s'écrit $n_{Fe} = \dfrac{m}{M_{Fe}} = \dfrac{1{,}0}{55{,}8} = 1{,}8.10^{-2}$ mol

Soit un nombre d'atome de fer :

$$N_{Fe} = n_{Fe}\,N_A = 1{,}8.10^{-2} \times 6{,}02.10^{23} = 1{,}1.10^{22}$$

N_A étant le nombre d'Avogadro

Le nombre d'électrons vaut alors :

$$N_{e^-} = 26 N_{Fe} = 26 \times 1{,}1.10^{22} = 2{,}9.10^{23}$$

La charge correspondante se calcule alors aisément par :

$$\boxed{Q = N_{e^-}\left(-e\right) = 2{,}9.10^{23} \times \left(-1{,}602.10^{-19}\right) = -4{,}6.10^{4}\ C}$$

1.2. Exercice* — 10 min

On électrise une sphère métallique. Celle-ci porte alors une charge électrique Q = +5,0 pC. Combien a-t-on transféré d'électrons depuis cette sphère ? Préciser le sens de ce transfert.

Solution

Ici on cherche le nombre d'électrons transférés connaissant la charge électrique correspondante. La charge en question est ici positive, on peut donc en conclure que des électrons ont été « arrachés » à cette sphère, à savoir une charge en électrons correspondant à $Q_{e^-} = -5{,}0\,pC$. La seule difficulté est maintenant de bien considérer les unités de la charge à savoir le pico-coulomb : 1pC = 10^{-12} C.

On a donc : $Q_{e^-} = n(-e)$ soit : $\boxed{n = \frac{Q_{e^-}}{(-e)} = \frac{-5{,}0.10^{-12}}{-1{,}602.10^{-19}} = 3{,}1.10^7}$

2.1. Exercice

5 min

Dans l'expression de la force d'interaction électrostatique, déterminer les unités du coefficient k.

Solution

Rappelons que la force F s'exprime en Newton (N), les charges q_1 et q_2 en coulomb (C) et la distance d en mètre (m). La réécriture de la force d'interaction électrostatique donne :

$$F = k\frac{q_1 q_2}{d^2} \quad \text{puis} \quad k = \frac{Fd^2}{q_1\, q_2}$$

Ainsi k s'exprime en $N.m^2.C^{-2}$

$$\boxed{K = 9{,}0.10^9\ N.m^2.C^{-2}}$$

2.2. Exercice

5 min

Reprendre la question précédente en considérant maintenant la force d'interaction gravitationnelle.

Solution

Une démarche similaire conduit à :

$$\boxed{G = 6{,}67.10^{-11}\ N.m^2.kg^{-2}}$$

2.3. Exercice (5 min)

Deux charges identiques q séparées par la distance $a = 20\ \text{nm}$ subissent une force d'intensité $F = 5{,}0\ \mu\text{N}$. Déterminer la valeur numérique de chacune de ces charges.

Solution

Il n'y a ici aucune difficulté particulière. Il faut cependant bien faire attention aux unités de l'énoncé. L'écriture de la loi de Coulomb en utilisant les paramètres de l'énoncé donne :

$$F = k\frac{q^2}{a^2}$$

soit en isolant le paramètre recherché $q = a\sqrt{\frac{F}{k}}$

La conversion des différentes grandeurs dans le système d'unités internationales donne :

$$F = 5{,}0\ \mu\text{N} = 5{,}0.10^{-6}\ \text{N} \quad \text{et} \quad a = 20\ \text{nm} = 2{,}0.10^{-8}\ \text{m}$$

Enfin l'application numérique : $\boxed{q = 4{,}7.10^{-16}\ \text{C}}$

2.4. Exercice* (10 min)

On reprend l'atome d'hydrogène dans sa description la plus simpliste. Déterminer alors l'intensité de la force d'interaction gravitationnelle. La comparer avec celle de l'interaction électrostatique. Conclure.

Solution

Ici on considère les deux masses en interaction. L'application de l'expression de la force d'interaction gravitationnelle donne :

$$F_{gra} = G\frac{m_P\, m_{e^-}}{R^2}$$

Soit : $F_{gra} = 6{,}67.10^{-11} \times \dfrac{1{,}673.10^{-27} \times 9{,}109.10^{-31}}{\left(5{,}30.10^{-11}\right)^2} = 3{,}62.10^{-47}\,\text{N}$