

1 Comparaison système planétaire - atome

1. Loi de Newton et loi de Coulomb

L'étude de la mécanique newtonienne implique l'existence de l'interaction gravitationnelle et de l'interaction électrostatique.

- Loi de Newton :

Deux corps ponctuels A et B de masse m_A et m_B exercent l'un sur l'autre des forces gravitationnelles de même valeur (exprimée en N) :

$$F = G \cdot \frac{m_A \cdot m_B}{AB^2},$$

où m_A et m_B s'expriment en kg, AB en m et où $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{kg}^{-2} \cdot \text{m}^2$ (constante de gravitation universelle).

- Ces forces sont toujours attractives :



- Si les deux corps sont à répartition sphérique de masse, la relation reste valable en considérant que A et B sont les centres de gravité des deux corps.

- Loi de Coulomb :

Deux corps ponctuels A et B de charge électrique q_A et q_B exercent l'un sur l'autre des forces électrostatiques de même valeur (exprimée en N) :

$$F' = k \cdot \frac{q_A \cdot q_B}{AB^2},$$

où q_A et q_B s'expriment en C, AB en m et où $k = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{C}^{-2} \cdot \text{m}^2$.

- Ces forces sont attractives si q_A et q_B sont de signes contraires.



- Ces forces sont répulsives si q_A et q_B sont de même signe.



2. Similitudes entre les deux lois

- Elles dépendent toutes les deux de $1/AB^2$: leur portée est donc infinie.
- Le rôle joué par la **masse** dans le cas de la force gravitationnelle est joué par la **charge électrique** dans le cas de la force électrostatique.
- Ces deux forces dérivent d'une énergie potentielle.

3. Différences entre les deux interactions

- La valeur de la force de gravitation est très faible devant celle de la force électrostatique. À l'échelle des particules élémentaires chargées, c'est l'interaction électrostatique qui régit les mouvements. À l'échelle astronomique, la matière étant neutre, c'est l'interaction gravitationnelle qui régit les mouvements des satellites et des planètes par exemple.
- Les systèmes gérés par les forces gravitationnelles, tels que les systèmes solaires, sont d'une diversité infinie. En effet, les planètes peuvent avoir des masses et des tailles d'orbite de n'importe quelle valeur : il n'y a pas deux systèmes identiques. À l'inverse, les systèmes soumis aux forces électrostatiques sont tous d'une ressemblance frappante (pas de diversité) : par exemple, tous les atomes d'hydrogène de l'univers à la même température sont indiscernables entre eux !
- Cette dernière différence est fondamentale et permet d'expliquer pourquoi la valeur de l'énergie d'un atome est quantifiée alors que la valeur de l'énergie d'un système planétaire est continue.

Exemple d'application

1. Calculer la valeur F des forces de gravitation qui s'exercent entre deux électrons distants de $d = 1$ pm.
2. Calculer la valeur F' des forces électrostatiques qui s'exercent entre ces deux électrons distants de $d = 1$ pm.
3. Calculer le rapport $r = F'/F$ et conclure.

Données : $m_{e^-} = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg ; $q_{e^-} = -1,6 \cdot 10^{-19}$ C.

Corrigé commenté

Indication : on rappelle que $1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m}$.

1. Par définition, $F = G \cdot \frac{m_{e^-} \cdot m_{e^-}}{d^2}$. AN : $F \approx 5,5 \cdot 10^{-47}$ N.

2. Par définition, $F' = k \cdot \frac{q_{e^-} \cdot q_{e^-}}{d^2}$. AN : $F' = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2}{(10^{-12})^2} \approx 2,3 \cdot 10^{-4}$ N.

3. Comme $r = \frac{F'}{F}$, on a : $r = \frac{2,3 \cdot 10^{-4}}{5,5 \cdot 10^{-47}} \approx 4 \cdot 10^{42}$.

Les forces de gravitation sont négligeables devant les forces électrostatiques.

2 Spectroscopie : observation et interprétation

1. Étude expérimentale des spectres

- Obtention d'un spectre :

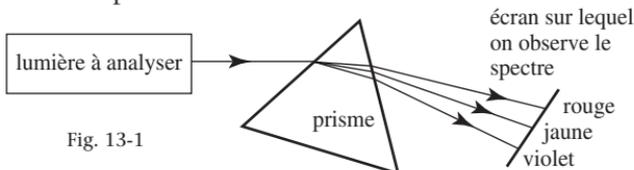


Fig. 13-1

- Un gaz sous haute pression, un liquide ou un solide, lorsqu'on les chauffe, émettent des rayonnements électromagnétiques dont les longueurs d'ondes appartiennent à un intervalle continu.

On parle de **spectre continu d'émission**.

- Par contre, un gaz sous basse pression et à haute température n'émet que certains rayonnements de longueurs d'ondes spécifiques dont l'ensemble est une caractéristique du gaz et constitue en quelque sorte sa signature. On parle de **spectre de raies d'émission**.

- Si on analyse de la lumière blanche passée au travers d'un gaz haute pression, un liquide ou un solide non opaque, on obtient un **spectre d'absorption de bandes** (bandes noires sur un fond composé des couleurs de l'arc-en-ciel) : c'est le complémentaire du spectre d'émission.

- Si enfin on analyse de la lumière blanche passée au travers d'un gaz basse pression à moyenne température, on voit que celui-ci absorbe uniquement les radiations qu'il serait capable d'émettre s'il était chaud. On obtient un **spectre d'absorption de raies** (raies noires sur un fond composé des couleurs de l'arc-en-ciel) : c'est le complémentaire du spectre de raies d'émission.

2. Interprétation de la discontinuité des spectres de raies

- Nous savons que les atomes ne présentent pas une diversité infinie d'états (contrairement aux systèmes planétaires). Ils ne peuvent donc prendre que certaines valeurs d'énergie.

- Pour n'importe quelle valeur d'orbite, un satellite peut être dans un état énergétique stationnaire, c'est-à-dire y rester. En effet, pour chaque énergie potentielle (altitude), il existe une énergie cinétique (vitesse) qui permet

cette stationnarité. Toutes les altitudes, toutes les vitesses et toutes les masses sont envisageables. L'énergie totale des satellites peut donc ainsi prendre n'importe quelle valeur.

● Il n'en va pas de même pour un système (électrons-noyau). Les électrons, en tournant, créent un champ électromagnétique (comme le ferait un courant dans une bobine). L'interaction à prendre en compte n'est donc pas uniquement électrostatique : elle est **électromagnétique**. Une particule chargée, soumise à une accélération, émet de l'énergie ; mais, pour certaines orbites, l'énergie qu'elle envoie à un certain endroit de sa trajectoire est susceptible d'être récupérée à un autre endroit de cette trajectoire quelques instants plus tard. La plupart des mouvements d'un électron autour d'un noyau chargé entraînent donc une perte d'énergie pour le système, sauf pour certaines orbites qui peuvent donc être stationnaires. On parle d'état stationnaire (état dans lequel l'électron peut rester). Tous les autres ne correspondent qu'à des états transitoires : l'électron ne fait qu'y passer à l'occasion d'une perte ou d'un gain d'énergie.

● Les états d'énergie observables dans un atome sont donc quantifiés puisque les autres ne durent jamais assez longtemps pour être observés : on dit que **l'énergie dans un atome est quantifiée**.

● Un atome excité de gaz à basse pression (seul état de la matière où les atomes n'ont aucune interaction entre eux) évacue de l'énergie par à-coups en passant d'une orbite autorisée à l'autre. À chaque fois un rayonnement de longueur d'onde bien précis est émis. Ceci explique l'existence des spectres d'émission de raies.

● De même, si on envoie de la lumière dans un atome peu excité de gaz à basse pression, il n'est susceptible d'absorber que les rayonnements de longueur d'onde apportant l'énergie nécessaire à le faire passer d'un niveau d'énergie au suivant, permettant à un de ses électrons de passer d'une orbite à celle immédiatement supérieure. Ceci explique l'existence des spectres d'absorption de raies et justifie qu'ils soient le complémentaire de ceux d'émission.

3 Variations d'énergie dans un atome

1. Le photon

● Dès 1900, Max Planck postule que l'énergie ne peut s'échanger que par « paquets », ou quanta. À une onde électromagnétique monochromatique de fréquence ν , il associe un quantum d'énergie de valeur : $E = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda}$.

$h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s est la constante de Planck et c , la célérité de la lumière.

● En 1905, Albert Einstein postule que ces quanta d'énergie sont portés par des particules de masse nulle qu'il appelle **photons**. Chaque photon possède donc une énergie $E = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda}$, où ν est la fréquence de l'onde monochromatique associée (en hertz) et λ sa longueur d'onde (en mètre).

2. Postulats de Bohr

● En 1913, Niels Bohr postule que :

- les variations d'énergie de l'atome sont quantifiées ;
- l'atome ne peut exister que dans certains états d'énergie bien identifiés, caractérisés par des niveaux d'énergie ;
- un photon de fréquence $\nu_{n,q}$ est émis lorsque l'atome effectue une transition entre deux niveaux d'énergie de E_n à E_q .

L'énergie du photon est :

$$h \cdot \nu_{n,q} = |E_n - E_q|$$

● L'atome change de niveau d'énergie par à-coups.

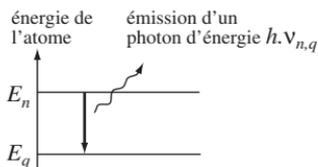


Fig. 13-2

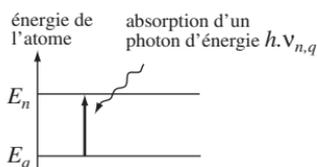


Fig. 13-3

3. Cas de l'atome d'hydrogène

● L'atome d'hydrogène est le plus simple de tous (un seul électron). Il est formé d'un proton autour duquel gravite un électron. Il possède une énergie potentielle E_p qui est choisie conventionnellement nulle lorsque l'électron est à une distance infinie du noyau.

Il possède une énergie cinétique E_c car l'électron est en mouvement. Son énergie totale est $E = (E_p + E_c) \leq 0$.

● On numérote ses niveaux d'énergie par valeurs croissantes E_1, E_2, \dots

Ils sont donnés par la formule générale : $E_n = -\frac{13,6}{n^2}$, avec E_n en eV

(1eV = $1,6 \cdot 10^{-19}$ J) et n le nombre quantique principal, indiquant aussi le numéro de la couche électronique sur laquelle se situe l'électron.

● Si $n = 1$, l'atome est dans son état fondamental : $T = 0$ K, sa structure électronique est K(1).

Si $n > 1$, l'atome est dans un état excité : $T > 0$ K, par exemple sa structure électronique est L(1).

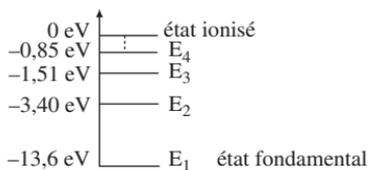


Fig. 13-4

● Un atome excité a tendance à revenir dans son état fondamental en effectuant des transitions par différents niveaux intermédiaires et en émettant à chaque fois un photon d'énergie correspondante.

● Toutes les raies du spectre d'émission d'un atome peuvent être classées en séries. Une série est constituée des raies aboutissant à un même niveau d'énergie (série de Lyman...).

4. Interaction photon-matière

● L'énergie d'ionisation $E_{\text{ionisation}}$ est l'énergie à fournir à un atome dans son état fondamental pour que son électron périphérique arrive à l'infini avec une vitesse nulle. Pour l'hydrogène : $E_{\text{ionisation}} = 13,6$ eV.

● Si on envoie un photon de fréquence $h \cdot \nu$ sur un atome dans son état fondamental, deux cas peuvent se présenter :

a) si $h \cdot \nu < E_{\text{ionisation}}$, alors le photon est absorbé s'il apporte exactement l'énergie correspondant à une transition, sinon il est simplement diffusé ;

b) si $h \cdot \nu \geq E_{\text{ionisation}}$, alors le photon est toujours absorbé, l'atome est ionisé et l'électron périphérique est éjecté avec une énergie cinétique $E_c = E_{\text{ionisation}} - h \cdot \nu$.

5. Généralisation

● Dans les noyaux atomiques l'énergie est aussi quantifiée.

● Alors que les photons intervenant lors des transitions électroniques (accompagnant les réactions chimiques) ont des énergies de l'ordre de l'eV, les photons accompagnant les réactions nucléaires ont des énergies de l'ordre du MeV.