

## Ouverture au monde quantique

### I – Les forces newtoniennes

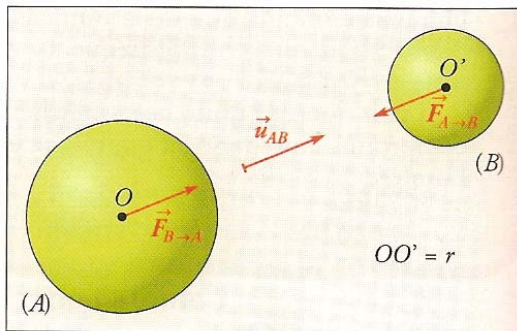
Les forces d'interaction gravitationnelle et électrostatique ont une propriété commune : leur valeur est proportionnelle à  $\frac{1}{r^2}$ , où  $r$  représente la distance séparant les deux corps en interaction. Ce sont des forces newtoniennes.

#### 1) La force gravitationnelle

Newton a énoncé la loi de la gravitation universelle qui régit le mouvement des corps célestes.

Deux corps  $A$  et  $B$ , à répartition sphérique de masse, de masses  $m_A$  et  $m_B$ , dont les centres sont séparés d'une distance  $r$ , exercent l'un sur l'autre des forces toujours

attractives et de même valeur  $F$  :  $F = G \cdot \frac{m_A \cdot m_B}{r^2}$ .



Interaction gravitationnelle :  $\vec{F}_{A \rightarrow B} = -\vec{F}_{B \rightarrow A}$ .

Vectoriellement :  $\vec{F}_{A \rightarrow B} = -G \cdot \frac{m_A \cdot m_B}{r^2} \cdot \vec{u}_{AB}$  et  $\vec{F}_{B \rightarrow A} = -\vec{F}_{A \rightarrow B}$ .

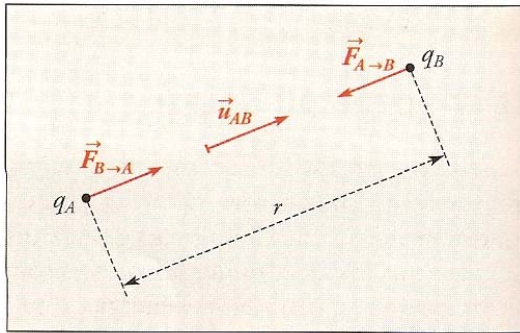
$G$  est la constante de gravitation universelle :  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ .

#### 2) La force électrostatique

Coulomb a énoncé la loi d'interaction entre deux charges électriques ponctuelles.

Deux charges ponctuelles  $q_A$  et  $q_B$ , placées en  $A$  et  $B$  distants de  $r$ , exercent l'une sur l'autre des forces de même valeur  $F$ , répulsives pour des charges de même signe,

attractives pour des charges de signes contraires.  $F$  est donnée par :  $F = k \cdot \frac{|q_A| \cdot |q_B|}{r^2}$ .



Interaction électrostatique.

Ici  $q_A \cdot q_B < 0$ .

On a toujours :  $\vec{F}_{A \rightarrow B} = -\vec{F}_{B \rightarrow A}$ .

Vectoriellement :  $\vec{F}_{A \rightarrow B} = G \cdot \frac{q_A \cdot q_B}{r^2} \vec{u}_{AB}$ , avec  $k = 9 \cdot 10^9$  S.I. pour le vide et l'air.

### 3) Mouvements des corps soumis à ce type de forces

Plaçons-nous dans le cas où un corps,  $A$  par exemple, a une masse très grande devant l'autre :  $m_A \gg m_B$ .

Dans un référentiel lié à  $A$  et considéré comme galiléen, étudions le mouvement de  $B$  par rapport à  $A$ .

On étudie deux exemples :

- $A$  est la Terre et  $B$  un satellite artificiel.
- $A$  est un noyau d'atome d'hydrogène (un proton) et  $B$  un électron.

Dans les deux exemples, la force exercée par  $A$  sur  $B$  est une force newtonienne, attractive, dirigée vers le centre de  $A$ .

Les deux types de forces précédentes conduisent aux mêmes types de mouvements des centres d'inertie d'un corps : elliptiques, circulaires ou hyperboliques.

C'est sur cette constatation que Rutherford élaborait le modèle planétaire de l'atome.

Dans les deux cas, il y a une infinité de trajectoires passant par un point quelconque donné. Si l'on impose des conditions initiales sur la position et le vecteur vitesse du centre d'inertie, le mouvement est alors complètement déterminé.

## II – Les limites de la mécanique Newtonienne

### 1) Energie du système {planète-satellite}

Lorsqu'un satellite est sur une orbite donnée, le système {planète-satellite} possède une énergie mécanique déterminée, d'autant plus grande que le satellite évolue à une plus grande distance de la planète. Comme toutes les altitudes et toutes les vitesses sont *a priori* possibles, toutes les énergies sont possibles : l'énergie d'un tel système peut prendre n'importe quelle valeur et donc varier continûment.

En est-il de même à l'échelle atomique pour le système {proton-électron} modélisant un atome d'hydrogène ?

### 2) Energie du système {proton-électron} de l'atome d'hydrogène

Analysons avec un prisme ou un réseau la lumière émise par une lampe à hydrogène et interprétons le spectre.



Spectre de raies de l'atome d'hydrogène.

On observe un spectre de raies caractéristique de l'hydrogène.

En effet, nous avons vu qu'un spectre permet d'identifier un élément chimique.

Pour obtenir ce spectre, de l'hydrogène est soumis à des décharges électriques dans une ampoule. De l'énergie est fournie aux atomes, ce qui modifie la structure des systèmes {protons-électrons}.

Les atomes possédant un surplus d'énergie sont dans un état excité, donc instable. Ils se désexcitent, pour retrouver une énergie plus basse et donc un état plus stable en émettant de l'énergie lumineuse.

Le fait que l'on observe un spectre de raies, et non un spectre continu, montre que les fréquences des radiations émises ne peuvent prendre que des valeurs particulières. Les fréquences sont quantifiées.

Comment déterminer, à partir des fréquences des radiations émises, l'énergie de l'atome ?

### 3) Le photon est les hypothèses de Bohr

En 1900, Max Planck fut conduit à postuler la quantification de l'énergie transportée par les ondes lumineuses ou, plus généralement, par les ondes électromagnétiques. Ainsi, il conclut que l'énergie électromagnétique ne peut s'échanger que par « paquets », ou quanta d'énergie.

En 1905, Einstein émit l'idée que ces quanta d'énergie sont portés par des particules appelées photons.

Les photons sont des corpuscules de masse nulle, non chargés, se propageant à la vitesse de la lumière,  $c \approx 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$  dans le vide.

Pour une onde de fréquence  $\nu$  et de longueur d'onde dans le vide  $\lambda$ , l'énergie d'un photon est :  $\mathcal{E} = h.\nu = \frac{h.c}{\lambda}$ , où  $h$  est une constante, appelée constante de Planck ;

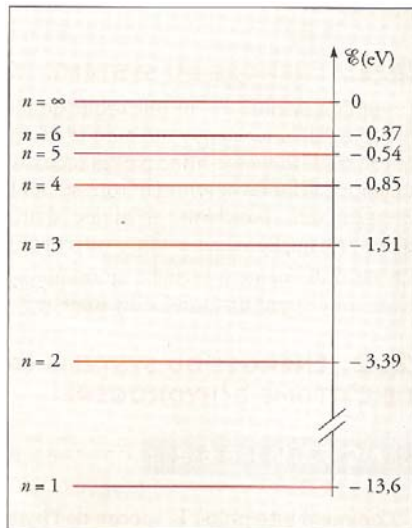
$$h = 6,62.10^{-34} \text{ J.s.}$$

En 1913, Bohr énonça les postulats suivants afin d'interpréter le spectre de l'atome d'hydrogène :

- Les variations d'énergie de l'atome sont quantifiées.
- L'atome ne peut exister que dans certains états d'énergie bien définis, caractérisés par un niveau d'énergie.
- Un photon de fréquence  $\nu$  est émis lorsque l'atome effectue une transition d'un niveau d'énergie  $\mathcal{E}_p$  vers un niveau inférieur  $\mathcal{E}_n$  tel que :  $\mathcal{E}_p - \mathcal{E}_n = h.\nu$ .

Nous avons vu expérimentalement, en étudiant les spectres d'émission de l'atome, que les fréquences  $\nu$  sont discontinues ou quantifiées. D'après la formule de Bohr, on en déduit que les sauts d'énergie  $\mathcal{E}_p - \mathcal{E}_n$  sont quantifiés. Comme le niveau de plus basse énergie (niveau fondamental) est fixé, il en résulte que les énergies de l'atome sont quantifiées. Contrairement à l'énergie du système {planète-satellite}, l'énergie d'un atome d'hydrogène ne peut prendre que certaines valeurs discrètes.

Le modèle planétaire de l'atome est donc à rejeter.



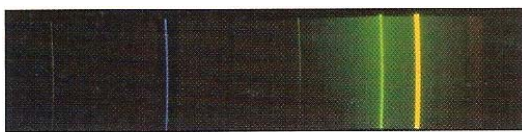
Niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène. Aux transitions qui aboutissent à un même niveau d'énergie correspondent des raies appartenant à une même série (les raies de la série de Balmer aboutissent au niveau  $n = 2$  ; les quatre premières raies de cette série sont visibles).

Le document ci-dessus montre le diagramme énergétique simplifié de l'atome d'hydrogène. Le niveau de référence, pris égal à zéro, correspond à l'état maximal d'excitation : c'est celui de l'atome ionisé (proton et électron immobile, séparés d'une distance infinie).

De ce fait, les énergies des autres niveaux sont négatives : cela n'a aucune importance car on calcule toujours des variations d'énergie.

#### 4) Généralisation

Comme l'atome d'hydrogène, les atomes des autres éléments chimiques ont un spectre caractéristique qui permet de les identifier ; ils possèdent donc également des niveaux d'énergie bien déterminés.



Le positionnement particulier des raies brillantes de ce spectre le caractérise : c'est celui du mercure.

L'énergie d'un atome est quantifiée.

Il en est de même de celle des molécules qui sont des associations d'atomes.

L'énergie d'une molécule est quantifiée.

Lorsqu'un noyau fils, résultant d'une désintégration radioactive, est dans un état excité il y a émission d'un rayonnement électromagnétique  $\gamma$ , donc de photons.

Les énergies de ces photons sont caractéristiques des noyaux émetteurs. Comme pour un atome, le noyau possède des niveaux d'énergie bien déterminés.

L'énergie d'un noyau est quantifiée.

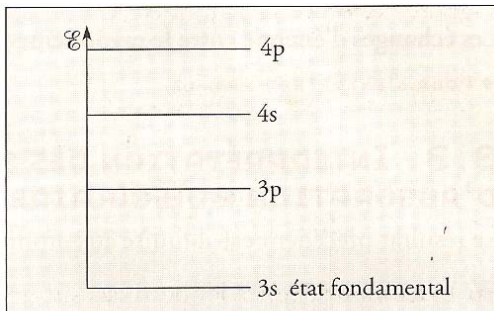
### III – Echange d'énergie au niveau atomique

#### 1) Interprétation des autres spectres d'émission

Les postulats de Bohr se généralisent aux autres atomes.

Lorsqu'un atome se désexcite, passant d'un niveau d'énergie  $\mathcal{E}_p$  vers un niveau inférieur  $\mathcal{E}_n$ , il émet un photon de fréquence  $\nu$  telle que :  $\mathcal{E}_p - \mathcal{E}_n = \Delta\mathcal{E} = h\nu$ .

La longueur d'onde de la raie émise est  $\lambda = \frac{c}{\nu}$ .



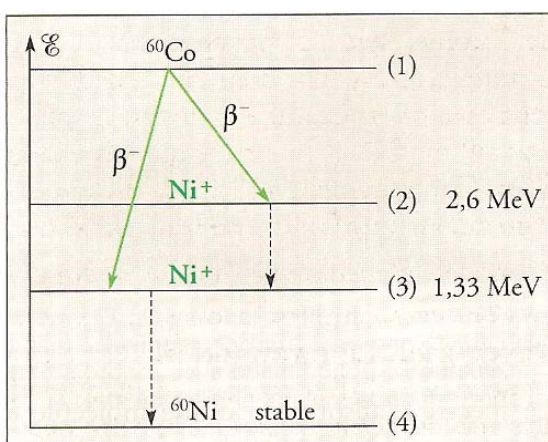
Niveaux d'énergie de l'atome de sodium.

Le document ci-dessus montre une partie du diagramme énergétique de l'atome de sodium. La transition du niveau noté 3p vers le niveau noté 3s correspond à la raie jaune-orangée de longueur d'onde 589 nm.

Les niveaux d'énergie affectant les couches électroniques externes d'un atome sont de l'ordre de l'électronvolt (eV) ; ainsi, les photons émis ont des fréquences qui sont dans les domaines du visible (longueurs d'ondes comprises entre 400 nm et 800 nm, des ultraviolets ou des infrarouges).

Les niveaux d'énergie affectant les couches électroniques internes d'un atome sont de l'ordre du kiloelectronvolt (keV) : les photons émis ont des fréquences qui sont dans le domaine des rayons X.

Ces photons sont invisibles et très énergétiques. Ils sont dangereux pour le corps humain. On les utilise en radiographie.



Lors de la désintégration  $\beta^-$  d'un noyau de cobalt, il se forme un noyau de nickel dans un état excité. Le document montre deux niveaux d'énergie du noyau de cet atome.



Le document ci-dessus montre la désintégration  $\beta^-$  d'un noyau de cobalt.

Le noyau-fils, un noyau de nickel, est dans un état excité. Il se désexcite en émettant un photon  $\gamma$ .

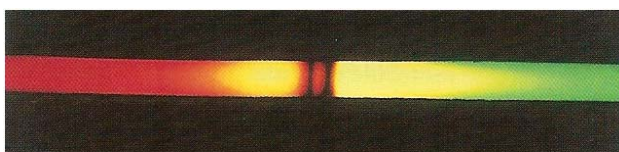
Ce photon  $\gamma$  a une énergie de l'ordre du mégaelectronvolt (MeV) ; il est encore plus dangereux qu'un photon X.

Les niveaux énergétiques d'un noyau sont de l'ordre du MeV.

## 2) Interprétation des spectres d'absorption atomiques

Les spectres d'émission mettent en évidence les transitions entre les niveaux d'énergie des atomes. Il en est de même des spectres d'absorption.

On réalise le spectre d'absorption du sodium : comment mettre en évidence des niveaux d'énergie du sodium ?



Spectre d'absorption du sodium.

On observe une raie noire dans le spectre de la lumière blanche ayant traversé la vapeur de sodium. La longueur d'onde de la radiation manquante est 589 nm ; elle correspond à la longueur d'onde de la radiation jaune-orangé émise par une lampe à vapeur de sodium.

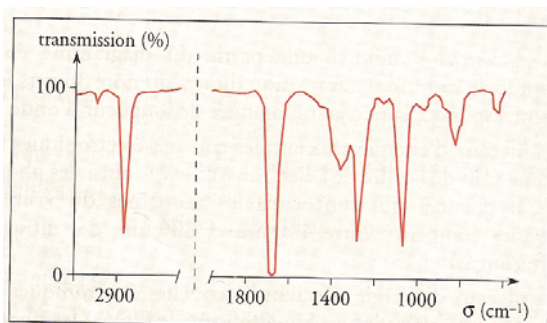
Parmi l'infinité des photons d'énergies différentes correspondant à la lumière blanche (leurs fréquences sont comprises entre  $7,5 \cdot 10^{14}$  Hz ( $\lambda = 400$  nm) et  $3,75 \cdot 10^{14}$  Hz ( $\lambda = 800$  nm)), seuls les photons dont l'énergie correspond à la différence entre les deux niveaux d'énergie 3p et 3s de l'atome de sodium sont absorbés.

Un atome n'absorbe que des photons possédant exactement l'énergie pouvant le faire passer à l'un de ses niveaux d'énergie supérieurs.

Les échanges d'énergie entre le rayonnement et l'atome sont quantifiés.

## 3) Interprétation des spectres d'absorption moléculaire

On réalise le spectre d'absorption de la molécule de butanone. Comment interpréter le spectre d'absorption d'une molécule ?



Spectre d'absorption de la butanone.

En abscisse est porté  $\tau = \frac{1}{\lambda}$  (en  $\text{cm}^{-1}$ ).

Un pic d'absorption à  $2900 \text{ cm}^{-1}$  est caractéristique des liaisons C-H ; celui, vers  $1700 \text{ cm}^{-1}$ , est caractéristique d'une liaison C=O.

Le spectre d'absorption d'une molécule est plus complexe que celui d'un atome. On observe des raies et des bandes d'absorption.

En effet, une molécule est constituée d'atomes. L'interaction entre les atomes, liés entre eux, a pour effet de multiplier et d'élargir les niveaux d'énergie.

Les bandes d'absorption se situent très souvent dans l'infrarouge. L'infrarouge n'étant pas un rayonnement visible, pour analyser le spectre, on doit l'enregistrer en utilisant des détecteurs sensibles à ces variations.

Le spectre d'absorption d'une molécule est un spectre de raies et de bandes.

Les niveaux énergétiques d'une molécule sont quantifiés.

Les échanges d'énergie entre le rayonnement et une molécule sont quantifiés.

#### IV – La mécanique quantique

La structure de l'atome et les spectres atomiques moléculaires ne peuvent pas être interprétés par la mécanique newtonienne.

Une nouvelle théorie a été élaborée, appelée mécanique quantique.

En mécanique quantique, les photons sont un aspect corpusculaire de la lumière permettant des échanges d'énergie avec la matière.

La lumière est-elle ondes ou corpuscules ?

En réalité, elle n'est ni ondes ni corpuscules mais les deux à la fois.

La mécanique quantique est probabiliste et non déterministe, contrairement à la mécanique newtonienne.

En mécanique newtonienne, la connaissance de la force et des conditions initiales permet de prévoir sans ambiguïté le mouvement futur. Ce n'est pas le cas en mécanique quantique, où la notion de trajectoire n'a pas de sens : il est, par exemple, seulement possible de calculer la probabilité de trouver un électron à une certaine distance du noyau.

La mécanique quantique permet d'interpréter :

- Les niveaux d'énergie des atomes et des molécules.
- Les spectres d'émission et d'absorption.
- La dualité onde-corpuscule.

Un faisceau d'électrons rencontrant des atomes est capable, comme des photons, de les exciter, c'est-à-dire de les faire passer sur des niveaux d'énergie supérieurs.

En 1913, les allemands Franck et Hertz ont bombardé des atomes par un faisceau d'électrons homocinétiques (de même vitesse). Ils ont constaté que lorsque les électrons possédaient une énergie suffisante capable de faire passer les atomes dans leurs états supérieurs d'énergie, et seulement dans ce cas, les chocs étaient efficaces.

Il est également possible d'observer les phénomènes de diffraction et d'interférences avec des faisceaux d'électrons.

Ainsi, des faisceaux d'électrons ont un comportement qui rappelle celui d'une onde lumineuse.

Quant à la lumière, qui était considérée comme une onde, elle a aussi un comportement corpusculaire puisqu'elle est constituée de photons.

C'est pour cela qu'on parle de dualité onde-corpuscule.