



Chapitre 16 : L'atome et la mécanique de Newton : Ouverture au monde quantique

Connaissances et savoir-faire exigibles :

- (1) Connaître les expressions de la force d'interaction gravitationnelle et de la force d'interaction électrostatique.
- (2) Savoir que l'énergie de l'atome est quantifiée et que la mécanique de Newton ne permet pas d'interpréter cette quantification.
- (3) Connaître et exploiter la relation $\Delta E = h\nu$, connaître la signification de chaque terme et leur unité.
- (4) Convertir les joules en eV et réciproquement.
- (5) Interpréter un spectre de raies.
- (6) Dans les échanges d'énergie, associer le MeV au noyau et l'eV au cortège électronique.

TEXTE

Quels problèmes rencontre le modèle atomique de Rutherford ?

Dans le modèle de l'atome tel que l'avait imaginé Rutherford, **les électrons gravitent autour du noyau comme les planètes autour du Soleil, ou comme des satellites autour de la Terre**. Nous savons bien que si une action perturbatrice quelconque s'exerce, par exemple, sur un satellite artificiel (lors d'un choc avec une météorite, ou par l'action d'un moteur de propulsion) son mouvement s'en trouvera modifié. Les lois de Newton expliquent bien les changements de vitesse et de trajectoire qui sont alors observés. Et leur application est à la source des "corrections de trajectoire" couramment effectuées sur les satellites artificiels. Ainsi, nous savons bien **qu'un même objet peut être satellisé sur des trajectoires différentes autour de la Terre** et qu'à chaque trajectoire, circulaire par exemple, correspond une valeur donnée de la vitesse.

A une toute autre échelle, nous savons également que la matière est constituée d'atomes et que ces atomes, dans les solides, les liquides mais aussi dans les gaz interagissent continuellement les uns avec les autres. Si les électrons des atomes se comportaient comme les satellites, l'agitation désordonnée modifierait continuellement leurs trajectoires. La conséquence immédiate serait que **tous les atomes de même nombre d'électrons devraient prendre des tailles différentes** et variables au gré des chocs reçus. Ainsi, en prenant pour exemple les atomes les plus simples, ceux de l'hydrogène, nous devrions, dans une même population donnée de substance hydrogénée, trouver statistiquement des atomes d'hydrogène de tailles fort différentes. **Or, les mesures effectuées sur ces atomes montrent que tous les atomes d'hydrogènes sont semblables** ; il en est de même de tous les atomes d'oxygène, d'hélium ou de n'importe quel autre atome : **à chaque type d'atome, correspond une taille déterminée**.

La conséquence s'impose : ces résultats sont en contradiction avec les lois de Newton bien que les deux lois d'interaction soient en $1/r^2$. Celles-ci ne peuvent donc expliquer complètement le comportement de la matière à l'échelle microscopique.

L'expérience de Franck et Hertz :

Les réflexions préalables :

Si tous les atomes d'une même espèce (l'hélium par exemple) sont identiques, cela signifie que l'énergie interne de chacun d'eux est unique. Mais que se passe-t-il si l'on tente de modifier directement cette énergie ?

James Franck et Gustave Hertz¹ ont montré, en 1914, **qu'en bombardant les atomes d'un gaz avec des électrons d'énergie connue** (de l'ordre de quelques eV), on pouvait **accroître l'énergie interne des atomes et que cela s'effectuait par paliers**. Ils reçurent, pour l'ensemble de leurs travaux, le prix Nobel en 1925.

Quelle était la problématique de cette expérience ?

Lors d'une collision entre un électron et un atome, il doit y avoir un transfert d'énergie de telle sorte que l'énergie interne de l'atome (cinétique des électrons et potentielle interne) doit augmenter au détriment de celle de l'électron-projectile.

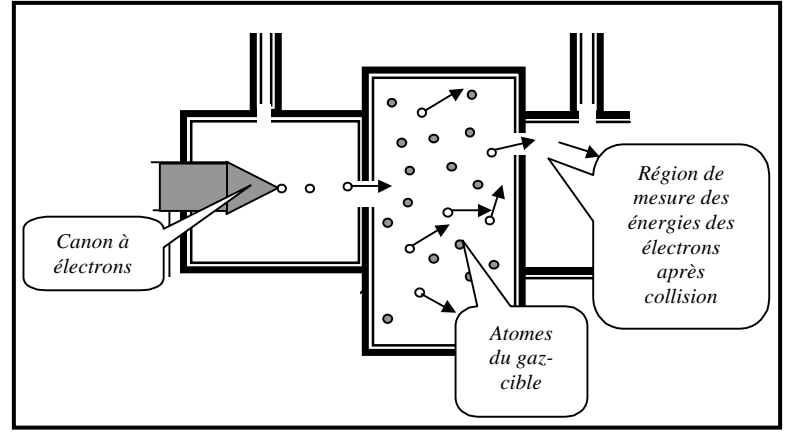
Si, l'hypothèse de Rutherford est bonne, c'est-à-dire si les atomes conçus selon un modèle planétaire obéissent à la mécanique de Newton, **les variations de leur énergie initiale consécutives aux chocs doivent être quelconques**. Dans le même temps, il résulte du principe de conservation de l'énergie que les électrons-projectiles doivent subir des pertes tout aussi quelconques de leur énergie cinétique.

40 **Mais si l'hypothèse de Rutherford est fautive**, et donc si les atomes n'obéissent pas aux lois de Newton alors **l'étude des énergies des électrons après collisions dans le gaz doit nous fournir des renseignements précieux sur la façon dont se sont produits les éventuels transferts d'énergie** entre les électrons-projectiles et les atomes-cibles.

45 Expérience proprement dite et analyse :

La figure ci-contre représente le schéma de principe d'une expérience voisine de celle que réalisèrent Franck et Hertz.

50 Le canon à électron donne aux électrons-projectiles une énergie cinétique réglable E_{in} . En quittant le canon, les électrons pénètrent par une petite ouverture dans une chambre contenant le gaz-cible. La plupart d'entre eux traversent la chambre sans subir de collision. Pour éviter de les détecter, l'ouverture de sortie est légèrement décalée. Les électrons qui se présentent à l'ouverture de sortie ont généralement effectué dans la chambre une collision avec un atome du gaz.



55 Dans cette expérience, on augmente progressivement l'énergie cinétique d'entrée E_{in} . Pour différentes valeurs de E_{in} , on mesure celles des énergies cinétiques E_{out} à la sortie et on compare E_{out} à E_{in} .

Qu'apprend-on de ces mesures ?

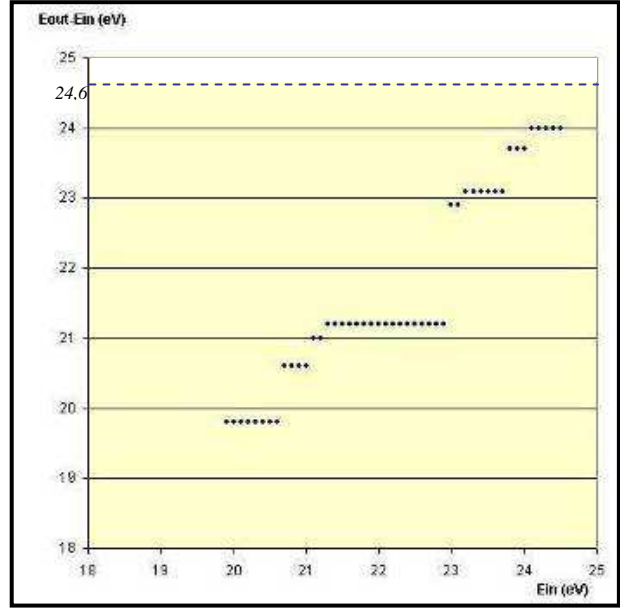
65 Prenons l'exemple précis de l'hélium. **Tant que l'énergie cinétique des électrons injectés est inférieure à 19,8 eV, on constate que celle des électrons à la sortie est pratiquement égale à celle qui leur a été communiquée à l'entrée ($E_{in} = E_{out}$)**. Ce résultat montre que ces électrons ont simplement rebondi sur des atomes d'hélium en conservant pratiquement toute leur énergie cinétique (les atomes d'hélium sont environ 8000 fois plus lourds que les électrons).

70 **Lorsque E_{in} dépasse 19,8 eV, on constate que les valeurs de E_{out} chutent brutalement de ... 19,8 eV ! et cette différence se maintient tant que E_{in} reste inférieure à 20,6 eV**. Autrement dit, **dans cette plage de valeurs de E_{in} , une énergie constante de 19,8 eV a été transférée à chaque atome d'hélium** ayant subi une telle collision.

75 Qu'est devenue l'énergie cinétique ainsi cédée par les électrons-projectiles ? Ici encore il n'y a pas eu accroissement sensible de l'énergie cinétique des atomes-cibles, la température du gaz n'augmentant pratiquement pas. **Le transfert d'énergie de 19,8 eV se fait au bénéfice quasi-intégral de l'énergie interne du système noyau-électrons de l'atome d'hélium bombardé**. On dit que l'atome d'hélium est passé de son état fondamental à un état excité ².

95 **Lorsque la valeur de E_{in} atteint et dépasse 20,6 eV, la différence $E_{out} - E_{in}$ passe brutalement à 20,6 eV et cela se maintient tant que E_{in} reste inférieure à 21 eV etc**. L'énergie interne des atomes bombardés passe alors brutalement à 20,6 eV, autre état excité.

105 Le diagramme ci-contre représente les valeurs trouvées pour la différence $E_{out} - E_{in}$ en fonction de E_{in} . On constate que les énergies transférées à un atome d'hélium lors d'un choc avec un électron ne sont pas quelconques mais qu'elles ne





110 peuvent prendre, au contraire, que des valeurs bien précises et toujours les mêmes pour tous les atomes d'hélium.
On dit qu'il y a quantification des états excités.

Ce résultat est généralisable à tous les atomes avec simplement, des valeurs d'énergie différentes.
Cette quantification de l'énergie interne d'un atome ne peut être expliquée par les lois de la mécanique de Newton. Selon ces dernières, au contraire, lors d'un choc avec un électron, la différence $E_{out} - E_{in}$ devrait pouvoir
115 prendre toute valeur comprise entre 0 et E_{in} !

Peut-on augmenter indéfiniment le nombre des états excités possibles c'est-à-dire les valeurs quantifiées de l'énergie correspondant aux états excités ?
La réponse est négative. **A partir d'une valeur de E_{in} appelée énergie d'ionisation**, le transfert d'énergie suffit à **arracher un électron à l'atome qui devient ion positif**. Dans le cas de l'hélium on obtient un ion He^+ et cela se produit à 24,6 eV.

120 En conclusion, notre expérience a permis d'identifier, pour l'atome d'hélium, les états excités suivants ³ (donnés en eV) : 19,8 20,6 21,0 21,2 22,9 23,1 23,7 et 24,0.
On dit que l'énergie d'un atome est quantifiée.

125 Le même résultat peut être observé avec les autres atomes. Par exemple, les principaux états excités du césium sont : 1,38 et 2,30 eV. L'ionisation du césium a lieu pour 3,87eV. Ceux du mercure sont (en eV) : 4,86 ; 5,44 ; 6,67 ; 7,71 et 8,84. L'ionisation du mercure a lieu pour un transfert d'énergie de 10,4 eV.

¹ : Il s'agit en fait d'une expérience simplifiée, plus difficile à réaliser mais plus facile à interpréter. Pour plus de précision on pourra se reporter à la fiche intitulée « spectroscopie électronique ».
130 ² : Il ne reste pas dans l'état excité et revient ultérieurement, en une ou plusieurs étapes, à l'état fondamental, cédant alors l'énergie interne emmagasinée. C'est la raison pour laquelle on observe corrélativement un spectre optique d'émission.
³ : D'autres états excités de l'atome d'hélium sont possibles et peuvent être identifiés expérimentalement ; les valeurs des énergies d'excitations sont toujours les mêmes, quantifiées et inférieures à 24,6 eV.

QUESTIONS

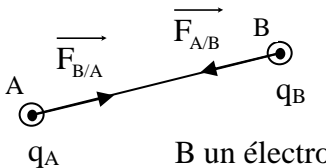
D'après le passage lignes 1 à 23 :

1) Rappelez quelles sont les caractéristiques du modèle de l'atome de Rutherford ? quelle analogie a-t-il fait pour décrire ce modèle ?

Pour Rutherford, le modèle de l'atome était analogue au modèle planétaire :
L'atome possédait un centre, massique, constitué par le noyau de l'atome, qui était analogue au Soleil ou à la Terre.
Autour de ce centre gravitent des électrons, analogues aux planètes qui tournent autour du soleil ou aux satellites gravitant autour de la Terre.

2) Quelles sont les lois en $1/r^2$ qui ont mis Rutherford sur cette piste de l'analogie ? ⁽¹⁾ Donnez l'expression de la force pour chacune d'entre elle, basée sur un schéma précis.

➤ **A l'échelle microscopique**, la cohésion de la matière est régie par l'interaction électrique, elle-même décrite par la **loi de Coulomb** :



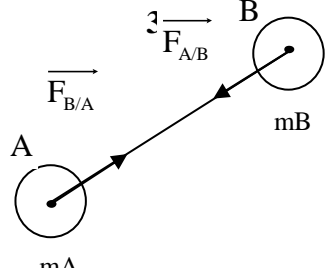
$$F_{A/B} = F_{B/A} = \frac{k * |q_A| * |q_B|}{d^2}$$

}

F : valeur commune des forces (N : newton)
d : distance AB (m)
q_A et q_B : charges de A et B (C)
Par exemple, $k = 9 * 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$, constante coulombienne.

B un électron du cortège électronique.

➤ **A l'échelle astronomique**, la cohésion des systèmes planétaires est régie par l'interaction gravitationnelle, elle-même décrite par la **loi de Newton** :



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

}

F : valeur commune des forces (N : newton)
d : distance AB (m)
m_A et m_B : masse des corps (kg)
G = $6.67 * 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{kg}^{-2} \cdot \text{m}^2$, constante gravitationnelle.



3) Quelle observation est en contradiction avec l'application des lois de Newton au niveau microscopique ? Justifiez votre réponse.

Alors que, si les lois de Newton étaient applicables, tous les atomes de même nombre d'électrons devraient prendre des tailles différentes, on remarque l'identité des rayons atomiques pour tous les atomes d'un même élément.

D'après le passage lignes 24 à 116 :

4) Rappelez en quelques mots en quoi consiste l'expérience de Franck et Hertz.

Ils ont bombardé les atomes d'un gaz avec un faisceau homocinétique d'électrons et comparé l'énergie de ceux-ci à l'entrée de la chambre de gaz et à la sortie.

5) Si le modèle de l'atome de Rutherford est juste, quel(s) résultat(s) l'expérience de Franck et Hertz doit-elle donner ?

On doit observer une variation de l'énergie interne des atomes cibles, qui prendra alors des valeurs quelconques ; de la même manière, les électrons projectiles verront une perte quelconque de leur énergie cinétique.

6) Résumez les résultats expérimentaux obtenus et concluez ⁽²⁾.

- Si $E_{in} < 19.8$ eV, alors les électrons ressortent avec la même énergie que celle avec laquelle ils sont entrés (ils ont rebondi en conservant leur énergie cinétique).
- Si 19.8 eV $< E_{in} < 20.6$ eV, les électrons transmettent une énergie de 19.8 eV aux atomes cibles.
- Si 20.6 eV $< E_{in} < 21$ eV, les électrons transmettent une énergie de 20.6 eV aux atomes cibles.

...

Cl : Le modèle de l'atome décrit par Rutherford est erroné, la mécanique classique ne peut interpréter ce phénomène.

7) Quelles hypothèses ont été émises concernant l'énergie transférée par les électrons projectiles aux atomes cibles ? ⁽²⁾

La température du gaz n'augmentant pas, cette énergie augmente l'énergie interne du système noyau-électrons. Pour le premier palier ($E_{in} > 19.8$ eV), l'atome est passé de son état fondamental à un état excité.

Cl : L'augmentation de l'énergie de l'atome se fait par palier, on dit que l'énergie de l'atome est quantifiée.

D'après le passage lignes 117 à 127 :

8) Que se passe-t-il lorsque l'on augmente trop E_{in} des électrons projectiles pour un type d'atome cible donné ?

A ce moment là, on atteint l'énergie d'ionisation de l'atome, on arrache un électron à celui-ci qui devient alors un ion positif : on ne peut pas multiplier indéfiniment les états excités d'un type d'atome.

D'après le passage lignes 129 à 134 :

9) Que fait un atome après avoir été excité par collision avec un électron projectile ?

Selon l'état d'excitation atteint, il va se désexciter en une ou plusieurs étapes pour revenir à son état fondamental, il va alors émettre un ou plusieurs rayonnements, à l'origine des spectres de raies d'émission.

QUELQUES NOTIONS A CONNAITRE

Spectre de raies d'émission et désexcitation atomique :

D'après ce qui a été dit ci-dessus, le spectre de raies d'émission observé pour un atome rend compte directement de la quantification de l'énergie de cet atome.

Une raie du spectre correspond à une désexcitation de l'atome d'un niveau d'énergie à un autre.

Quantum d'énergie associé à la désexcitation ⁽³⁾ :

En effet, si un atome se désexcite et passe d'un niveau d'énergie E_f à un niveau d'énergie E_i , il émet une radiation monochromatique de fréquence ν qui vérifie :

$$\Delta E = E_f - E_i = h\nu = \frac{h \times c}{\lambda}$$

- ΔE : **quantum d'énergie** correspondant à la désexcitation (J)
- E_i : énergie du niveau excité de **départ** (J)
- E_f : énergie du niveau excité ou fondamental d'**arrivée** (J)
- h** : **constante de Planck** = 6.62×10^{-34} J.s
- ν** : **fréquence de la radiation émise** (Hz)
- λ : longueur d'onde de la radiation (m)
- c : vitesse de la lumière dans le vide = 3.0×10^8 m/s

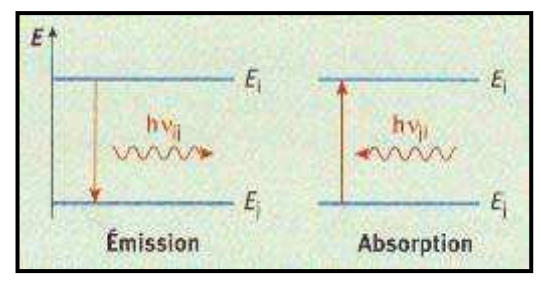
135

En 1905, Einstein postule que **ces quanta d'énergie sont portés par des particules de masse nulle, non chargées se propageant à la vitesse de la lumière $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ dans le vide ; ces particules sont appelées « photon ».**

Rq : Les différents niveaux d'énergie d'un atome sont plutôt donnés en eV qu'en joules, il convient donc de savoir effectuer des conversions entre ces deux unités d'énergie :

$$\boxed{1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}}$$

Rq : De la même manière qu'un atome qui se désexcite émet une radiation monochromatique, on peut faire passer un atome de son état fondamental à un état excité en lui soumettant une radiation monochromatique :



Généralisation

La notion de niveaux d'énergie s'applique à tout système microscopique : noyau, atomes, molécules. La relation $\Delta E = h\nu$ concerne toute transition associée à un rayonnement électromagnétique.

➤ Niveaux d'énergie électroniques :

Un atome possède de **l'énergie du fait de l'interaction des électrons entre eux et avec le noyau**. Cette énergie d'interaction et l'énergie cinétique des électrons constituent l'énergie électronique de l'atome.

$$qq \text{ eV} < \Delta E < qq \text{ keV}$$

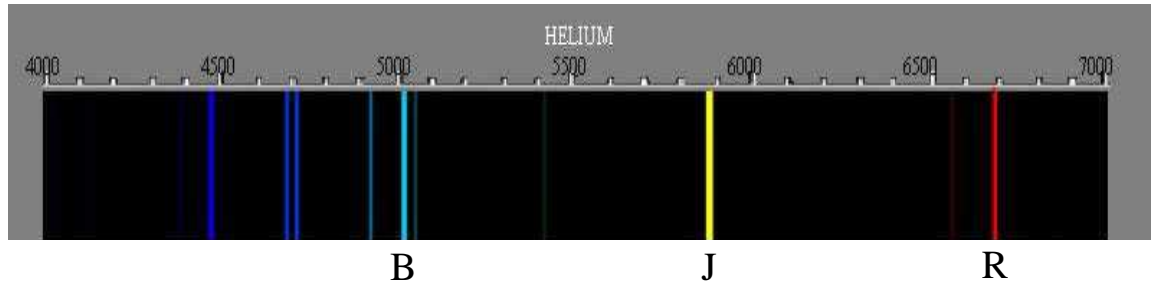
➤ Niveaux d'énergie nucléaire :

Le noyau possède de l'énergie du fait de **l'interaction entre les nucléons (interaction forte)**. Lors d'une désintégration, le noyau fils naît dans un état excité noté Y^* . Il retourne ultérieurement dans un état stable Y en émettant un rayonnement γ . Cette émission correspond à un changement de niveau d'énergie du noyau atomique. Le rayonnement γ présente un spectre de raies : l'énergie du noyau est quantifiée.

$$E_\gamma = h\nu_\gamma = \frac{h \times c}{\lambda_\gamma} = E_{Y^*} - E_Y \qquad \lambda_\gamma \approx 10^{-12} \text{ m donc } E_\gamma \approx \text{MeV}$$

APPLICATION

Voici le spectre de raies d'émission de l'hélium :



On remarque que celui-ci est composé de trois raies intenses :
Une raie bleue (B) de longueur d'onde 502 nm, une raie jaune (J) à 588 nm, et une raie rouge (R) à 668 nm.

1) Retrouvez à partir de ces trois raies, la valeur du quantum d'énergie auxquelles elles correspondent, et remplissez le tableau ci-dessous ⁽⁴⁾ et ⁽⁵⁾ :

On utilise la formule donnée ci-dessus pour trouver ΔE , puis on convertit ensuite l'énergie obtenue en eV. On obtient :

Couleur	λ (en nm)	ΔE (en J)	ΔE (en eV)
Bleu	502	$3,96 \times 10^{-19}$	2,47
Jaune	588	$3,38 \times 10^{-19}$	2,11
Rouge	668	$2,97 \times 10^{-19}$	1,86

2) Nous savons que ces trois émissions correspondent toutes à un état excité initial d'énergie égale à 23,1 eV. Déterminez le niveau final de désexcitation correspondant à chacune des trois raies précédentes du spectre et représentez ces changements d'énergie dans les atomes d'hélium par des flèches (une pour chaque raie) dans le diagramme ci-contre :

