

L'atome et la mécanique de Newton

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 et de l'énergie du système satellite-Terre.

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 dans l'état fondamental.

La conséquence s'impose : ces résultats sont en contradiction avec les lois de Newton car les deux lois d'interaction sont en $1/r^2$. La mécanique de Newton ne peut donc expliquer complètement le comportement de la matière à l'échelle microscopique.

Les expériences de Franck et Hertz

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 Hertz 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 ?

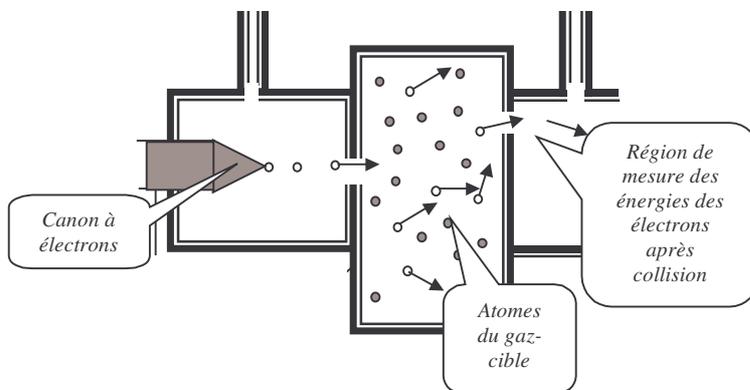
Lors d'une collision entre un électron et un atome, il doit y avoir un transfert d'énergie de telle sorte que l'énergie interne de l'atome (cinétique des électrons et potentielle interne) doit augmenter au détriment de celle de l'électron-projectile.

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 pouvoir prendre n'importe quelle valeur. 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.

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.

La figure ci-contre représente le schéma de principe d'une expérience voisine de celle que réalisèrent Franck et Hertz¹.

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.



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 ?

Prenons l'exemple précis de l'hélium.

1° 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).

2° 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.

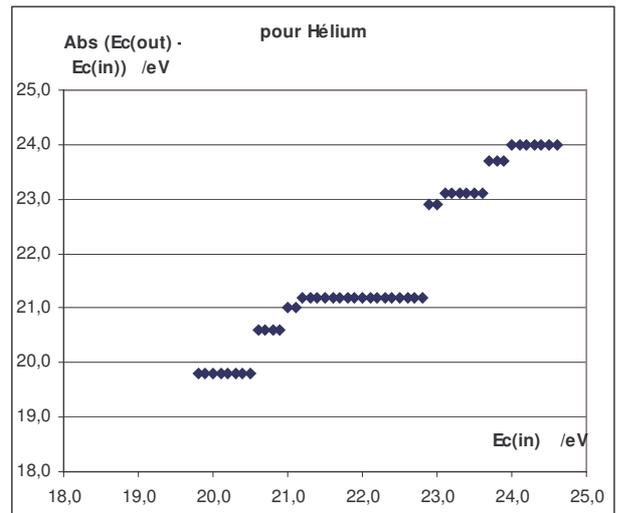
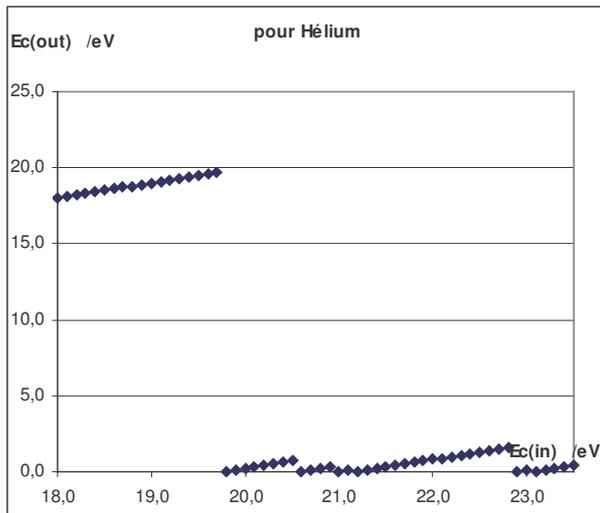
Qu'est devenue l'énergie cinétique ainsi cédée par les électrons-projectiles ?

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.

3° 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.

¹ Il s'agit en fait d'une expérience simplifiée, plus difficile à réaliser mais plus facile à interpréter.

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.



Le diagrammes ci-dessus représentent,
 pour le premier : valeurs de $E_c(\text{out})$ des énergies des électrons à la sortie du détecteur ;
 pour le second : valeurs trouvées pour la différence $|E_{\text{out}} - E_{\text{in}}|$ 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 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 $E_{\text{out}} - E_{\text{in}}$ devrait pouvoir 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.

En conclusion, notre expérience a permis d'identifier, pour l'atome d'hélium, les états excités suivants³ (donnés en eV) : 19,8 20,6 21,0 21,2 22,9 23,1 23,7 et 24,0. (Il existe d'autres valeurs)

On dit que l'énergie d'un atome est **quantifiée**.

Le même résultat peut être observé avec les autres atomes.

Questions

1. Dans le premier graphe, $E_{c,\text{out}} = f(E_{c,\text{in}})$ quelle est la pente du premier segment de droite ?
2. Que représentent les points tracés dans le diagramme de droite ci-dessus ? Pourquoi n'y a-t-il pas de points avant l'abscisse 19,8 eV ?
3. Un tel diagramme, tracé pour d'autres atomes que ceux de l'hélium serait-il identique ou similaire à celui-ci, et, dans ce dernier cas, en quoi consisteraient, selon vous, les différences et les similarités ?
4. Commentez la phrase "Ici encore n'y a pas eu accroissement sensible de l'énergie cinétique des atomes-cibles, la température du gaz n'augmentant pratiquement pas"

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.