

Distribution limitée

SC-85/CONF.811/12
PARIS, le 27 novembre 1985
Original français

ORGANISATION DES NATIONS UNIES
POUR L'EDUCATION, LA SCIENCE ET LA CULTURE

Table ronde en commémoration du Centenaire de Niels Bohr

Niels Bohr - Un aperçu de quelques-unes de ses contributions
à la science et à la coopération internationale

Maison de l'Unesco, Salle VIII, 28-29 novembre 1985

NIELS BOHR ET LA STRUCTURE DES ATOMES

par

le Professeur Raymond DAUDEL
Président de l'Académie Européenne des arts
des sciences et des lettres

(Les opinions exprimées par l'auteur ne correspondent pas
nécessairement à la position de l'Unesco.)

NIELS BOHR ET LA STRUCTURE DES ATOMES

par le Professeur Raymond DAUDEL , Président de l'Académie Européenne

L'ATOME AVANT BOHR

On sait que le concept d'atome est né en Grèce, environ cinq siècles avant notre ère, à la faveur semble-t-il d'un conflit d'opinions entre Héraclite et les Eléates.

Pour Parménide d'Elée, l'Etre est immobile, indivisible, inengendré, impérissable. Pour Héraclite d'Ephèse, rien n'est immuable , tout devient.

Vers 460 avant Jésus Christ, Leucippe de Millet, puis Démocrite d'Abdère , tentèrent une synthèse de ces deux formes de pensée apparemment inconciliables. Ils admirèrent que l'Etre était constitué par de petites particules insécables et immuables : les atomes. Leur mouvement, leurs associations, leurs dissociations, expliqueraient le perpétuel devenir , le π ά ν τ α ρ ε ι η héraclitien .

Ce n'est que vers la fin du 19ème siècle que l'on commença à pénétrer l'atome par la pensée en lui donnant une structure précise.

Un des pas les plus décisifs fut la démonstration par Jean Perrin du fait que les rayons cathodiques sont formés de particules négatives : les électrons.

La découverte par Becquerel de la radioactivité permit de faire le second pas. Becquerel montra, en effet, que l'un des rayonnements émis par les substances radioactives est de même nature que le rayonnement cathodique.

C'est pourquoi J.J. Thompson imagina que l'atome était une boule d'électricité positive à l'intérieur de laquelle gravitaient des électrons.

Cependant, dès 1901, Jean Perrin voyait dans l'atome un petit monde planétaire. Il avait sans doute été influencé par les "Pensées" de Blaise Pascal qui, au 17^{ème} siècle avait déjà écrit :

"Je veux déjà lui peindre non seulement l'Univers visible, mais encore tout ce qu'il est capable de concevoir de l'immensité de la nature dans l'enceinte de cet atome imperceptible. Qu'il y voye une infinité de monde dont chacun a son firmament, les planètes, la terre".

Quoiqu'il en soit, en 1901 Jean Perrin publiait dans la Revue Scientifique la phrase prophétique suivante :

"Chaque atome serait constitué, d'une part par une ou plusieurs masses très fortement chargées d'électricité positive, sorte de soleils positifs dont la charge serait très supérieure à celle d'un corpuscule et, d'autre part, par une multitude de corpuscules sorte de petites planètes négatives, l'ensemble de ces masses gravitant sous l'action des forces électriques et la charge négative totale équivalant exactement à la charge positive totale, de sorte que l'atome soit électriquement neutre".

On sait que les expériences de Geiger et Marsden et de Rutherford apportèrent des arguments très solides en faveur du modèle planétaire de Jean Perrin. Ces physiciens observèrent, en effet, que lorsque l'on envoie un faisceau de particules α positives sur une lame mince de métal, la plupart de celles-ci traversent l'obstacle sans être déviées. Quelques-unes cependant subissent des déviations très nettes. Certaines reviennent même en arrière. Ces faits montrent bien que les atomes renferment en leur sein des charges positives à la fois petites et massives capables de faire rebondir des particules α .

L'ATOME DE NIELS BOHR

Les analyses de Rutherford amenèrent donc à adopter le modèle planétaire de Jean Perrin. Rutherford admit que les atomes ne contenaient qu'un centre positif et massif : le noyau.

Mais, cependant, ce modèle planétaire se heurtait à une sérieuse objection. Il était, en effet, difficile de concevoir des charges négatives tournant autour d'un noyau sans admettre que celles-ci rayonnent de l'énergie. Les lois de l'électromagnétisme classique enseignaient, en effet, que toute charge douée d'accélération rayonne. L'atome de Perrin-Rutherford apparaissait donc comme un édifice instable. Perdant sans cesse de l'énergie, les électrons devraient inéluctablement finir par tomber sur le noyau.

En utilisant les principes de la mécanique des quantas de Planck, vers 1913 Niels Bohr stabilisa le modèle planétaire de l'atome.

Pour Planck, en effet, lorsqu'un corpuscule est animé d'un mouvement périodique le travail de sa quantité de mouvement pendant une période doit être égal à un nombre entier (n) de fois une certaine constante h appelée constante de Planck.

Niels Bohr admit que les électrons dans les atomes tournent sur des cercles concentriques au noyau et que le principe de Planck s'applique à ces mouvements périodiques.

Il fit, de plus, l'hypothèse audacieuse que lorsque les électrons tournent ainsi sur ces trajectoires circulaires ils ne rayonnent pas contrairement aux lois de l'électromagnétisme classique.

Un calcul simple montre que dans ces conditions l'énergie E_n de l'électron d'un atome d'hydrogène s'écrit :

$$E_n = \frac{-2 \pi^2 m e^4}{n^2 h^2} \quad \dots (1)$$

où m note la masse de l'électron et e sa charge, n est le nombre entier du principe de Planck et h la constante de Planck.

Sur cette base Niels Bohr construisit alors une remarquable théorie de l'émission et de l'absorption de la lumière par les atomes. Il admit qu'un électron atomique ne rayonne que lorsqu'il change de trajectoire. S'il passe de la trajectoire caractérisée par l'entier n à une trajectoire correspondant à un entier plus petit m , il perd la quantité d'énergie :

$$\Delta E = E_n - E_m \quad \dots (2)$$

Niels Bohr admet que l'atome émet alors un photon d'énergie ΔE .

La formule de Planck nous apprend que la fréquence ν de ce photon est donnée par la formule :

$$\nu = \frac{\Delta E}{h} \quad \dots (3)$$

ou encore :

$$\nu = \frac{E_n - E_m}{h} \quad \dots (4)$$

c'est la célèbre loi des fréquences de Bohr.

En tenant compte de l'expression (1), il vient :

$$\nu = \frac{2 \pi^2 m e^4}{h^3} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad \dots (5)$$

On retrouve ainsi une formule trouvée empiriquement à la fin du 19ème siècle par des physiciens qui avaient mesuré les fréquences des radiations émises par l'hydrogène lorsque ce gaz est parcouru par une effluve électrique.

Cette coïncidence numérique précise entre les calculs théoriques de Niels Bohr et les mesures expérimentales fournit un argument décisif en faveur de la théorie de Bohr et l'on put se faire une image géométrique précise de tous les atomes des corps simples, la règle de Stoner nous enseignant que le cercle de rang n ne peut dans un atome que contenir au plus $2n^2$ électrons.

On prit l'habitude d'appeler couche K les électrons gravitant sur le premier cercle ($n = 1$), couche L les électrons gravitant sur le deuxième cercle ($n = 2$) ... etc.

L'ATOME EN MECANIQUE QUANTIQUE

Mais la science ne sait prononcer que des discours provisoires. En 1923, naissait la mécanique quantique grâce aux travaux de Louis de Broglie. Pour Louis de Broglie, le mouvement d'un corpuscule s'accompagne toujours de la propagation d'une onde. Louis de Broglie admet donc que le mouvement des électrons des atomes entraîne l'existence d'une onde stationnaire et à partir de cette idée démontra le principe des quanta de Planck.

La découverte en 1927 du phénomène de diffraction des faisceaux d'électrons par des métaux, grâce aux travaux de Davisson et Germer, démontra la valeur heuristique de l'hypothèse de Louis de Broglie.

Louis de Broglie avait admis que dans le cadre de l'optique géométrique les trajectoires des corpuscules coïncident avec les rayons des ondes. Mais pour un atome, les conditions de l'optique géométrique ne sont pas satisfaites. On décida dans de tels cas de donner à l'onde le pas sur sur la trajectoire et l'on construisit une mécanique quantique qui exclut la possibilité de connaître la trajectoire des corpuscules dans un atome.

Niels Bohr fut alors conduit à penser que, selon le phénomène, un corpuscule apparaît sous son aspect corpusculaire ou sous son aspect ondulatoire. C'est la base du principe de complémentarité que d'autres

orateurs présenteront sûrement aujourd'hui avec tous les détails utiles.

Je voudrais seulement examiner les conséquences qui en découlent au niveau des atomes.

Renonçant au calcul des trajectoires, la mécanique quantique devient seulement de calculer la probabilité probabiliste. L'onde de de Broglie nous permet de rencontrer à l'instant t un corpuscule dans un volume élémentaire entourant un certain point M de l'espace.

Et les calculs quantiques nous montrent que c'est au noyau d'un atome que l'on a le plus de chance de rencontrer un électron.

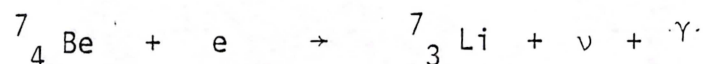
Ce résultat est tout à fait opposé à ce qui se passait dans la théorie initiale de Bohr où les électrons, tournant sur des cercles concentriques au noyau, ne venaient jamais au voisinage de celui-ci.

L'expérience donna raison à la mécanique quantique. En 1935, Yukawa et Sakata pensèrent que, s'il existe une probabilité notable pour un électron du cortège de rencontrer le noyau de l'atome, la réaction :



devrait pouvoir se produire lorsque le bilan énergétique le permet.

Ce phénomène de capture par les noyaux des atomes de l'un de leurs électrons fut découvert par Alvarez en 1937. De nos jours, il est bien connu. Le noyau le plus simple qui donne lieu à ce phénomène est le nuclide ${}^7_4\text{Be}$. Ce noyau de beryllium se transforme spontanément en lithium avec une période d'environ 50 jours selon la réaction :



Autrement dit, si l'on prépare un gramme de béryllium 7, 50 jours plus tard il se sera formé un demi-gramme de lithium.

C'est pourquoi en 1947, en même temps que Segré, j'ai pensé que l'on pourrait mettre à profit ce phénomène pour modifier la période de désintégration du béryllium 7 par un effet chimique. Les calculs quantiques montrent, en effet, que chez le fluorure de béryllium, la probabilité de rencontrer un électron près des noyaux de béryllium est plus faible que celle de trouver un électron près des noyaux du béryllium métallique. J'ai réalisé en 1948 cette expérience avec des collègues de l'Institut du Radium et confirmé l'exactitude de cette prévision.

De nos jours, on sait selon cette voie modifier de nombreuses périodes radioactives sous l'influence d'effets chimiques.

Une autre importante modification de la théorie initiale de Bohr concernant les atomes résulte du principe d'indiscernabilité, base de la mécanique quantique des systèmes de corpuscules. Selon ce principe, les électrons d'un atome ou d'une molécule sont indiscernables. On ne peut donc distinguer entre électrons K, électrons L ... etc, dans un atome. On ne peut distinguer entre les électrons de coeur et les électrons de liaison d'une molécule.

Or, l'essentiel des théories chimiques était fondé sur ces distinctions. Pour sortir de cette impasse, en 1953 j'ai introduit le concept de loge. Considérons l'atome d'hélium dans son premier état excité. Selon la théorie initiale de Bohr, il contiendrait un électron sur l'orbite K et un électron sur l'orbite L. En mécanique quantique, les deux électrons jouent dans l'atome des rôles équivalents. Entourons le noyau de l'atome d'hélium par une sphère de rayon arbitraire R concentrique au noyau. La mécanique quantique permet de calculer la probabilité P de rencontrer un électron et un seulement dans cette sphère. Cette probabilité P est une fonction du rayon R. Elle passe par un maximum valant

0,93 pour $R = 1,7$ unité atomique.

Lorsque l'atome d'hélium est dans son premier état excité, il y a donc une probabilité de 93% de trouver au même instant un seul électron dans cette sphère, l'autre étant alors hors de la sphère.

On dit que la sphère est une loge K et l'extérieur à la sphère une loge L . Il y a une haute probabilité de trouver un électron dans la loge K et l'autre dans la loge L .

Telle est la nouvelle image que la mécanique quantique nous donne de l'atome. Elle n'est pas en contradiction avec le principe d'indiscernabilité, car maintenant nous distinguons des régions de l'espace atomique et non plus des électrons.

La théorie des loges s'étend à tous les atomes et les molécules. Elle met en évidence chez les atomes des couronnes sphériques concentriques avec noyaux où existent de hautes probabilités de rencontrer un certain nombre d'électrons. En divisant le volume d'une loge par le nombre des électrons qu'on y rencontre avec une haute probabilité, on mesure "l'espace vital" v qu'un électron tend à occuper quand il visite une loge. On peut aussi calculer le potentiel électrostatique p moyen qu'il ressent alors.

On montre que :

$$p^{3/2} v = \text{constante}$$

pour toutes les loges de tous les atomes.

Il existe donc une sorte de loi de Boyle-Mariotte entre le volume que tend à occuper un électron et la pression électrique qui s'exerce sur lui.

Dans le cas des molécules, on a pu définir des loges de coeur, des loges de liaison, régions de l'espace moléculaire où le nombre des électrons fluctue peu autour d'un nombre fixe.

La mécanique quantique donne ainsi une nouvelle image des atomes et des molécules , base de la chimie quantique moderne .