

# Le modèle atomique de Bohr, un exemple de programme de recherche

Nicolae Sfetcu

29.12.2019

Sfetcu, Nicolae, « Le modèle atomique de Bohr, un exemple de programme de recherche », SetThings (29 décembre 2019), URL = <https://www.setthings.com/fr/le-modele-atomique-de-bohr-un-exemple-de-programme-de-recherche/>

Email: [nicolae@sfetcu.com](mailto:nicolae@sfetcu.com)



Cet article est sous licence Creative Commons Attribution-NoDerivatives 4.0 International. Pour voir une copie de cette licence, visitez <http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>.

Une traduction partielle de :

Sfetcu, Nicolae, « Imre Lakatos: Euristica și toleranța metodologică », SetThings (11 februarie 2019), MultiMedia Publishing (ed.), DOI: 10.13140/RG.2.2.35405.28649, URL = <https://www.setthings.com/ro/e-books/imre-lakatos-euristica-si-toleranta-metodologica/>

Le modèle atomique de Bohr a été l'un des exemples les plus brillants de la méthodologie des programmes de recherche d'Imre Lakatos. (Lakatos 1978) Les grandes lignes du programme de recherche de Bohr (Bohr 1913) peuvent être caractérisées par :

1. Le problème initial ;
2. Ses heuristiques négatives et positives ;
3. Les problèmes qu'il a tenté de résoudre au cours du développement ;
4. Son point de dégénérescence (point de saturation) et, enfin,
5. Le programme par lequel il a été remplacé.

Nicolae Sfetcu : Le modèle atomique de Bohr, un exemple de programme de recherche

Le problème sous-jacent était de savoir comment les atomes de Rutherford (comme systèmes planétaires avec des électrons circulant autour d'un noyau positif) pouvaient rester stables, car, selon la théorie de l'électromagnétisme de Maxwell-Lorentz, ils devraient s'effondrer. La théorie de Rutherford était bien étayée. La suggestion de Bohr était d'ignorer l'incohérence pour le moment et de développer alternativement un programme de recherche dont les versions « réfutables » seraient incompatibles avec la théorie de Maxwell-Lorentz. Il a proposé cinq postulats comme *noyau dur* de son programme :

1. Le rayonnement énergétique [à l'intérieur de l'atome] n'est pas émis (ou absorbé) en continu comme dans l'électrodynamique ordinaire, mais seulement pendant la transition des systèmes entre différents états « stationnaires ».
2. L'équilibre dynamique des systèmes dans les états stationnaires est régi par les lois habituelles de la mécanique, tandis que ces lois ne restent pas valables lorsque les systèmes passent entre les différents états.
3. Le rayonnement émis lors de la transition d'un système entre deux états stationnaires est homogène et la relation entre la fréquence  $\nu$  et la quantité totale d'énergie émise  $E$  est donnée par  $E = h\nu$ , où  $h$  est la constante de Planck.
4. Différents états stationnaires d'un système simple sont déterminés par la condition que le rapport de l'énergie totale émise pendant la formation de la configuration à la fréquence de rotation de l'électron est un multiple entier de  $h$ . En supposant que l'orbite de l'électron est circulaire, cette hypothèse équivaut à l'hypothèse que le moment angulaire de l'électron autour du noyau est égal à un multiple entier de  $h/2\pi$ .

Nicolae Sfetcu : Le modèle atomique de Bohr, un exemple de programme de recherche

5. L'état « permanent » de tout système atomique, c'est-à-dire l'état où l'énergie émise est maximale, est déterminé par la condition que le moment angulaire de chaque électron autour du centre de l'orbite soit égal à  $h/2\pi$ . (Bohr 1913)

Le *principe de correspondance* de Bohr a joué un double rôle intéressant dans son programme. D'une part, il a fonctionné comme un principe heuristique important qui a suggéré de nombreuses nouvelles hypothèses scientifiques qui, à leur tour, ont conduit à de nouveaux faits dans le domaine de l'intensité du spectre. D'autre part, il a également fonctionné comme un mécanisme de défense qui « a essayé de tirer le meilleur parti des concepts des théories classiques de la mécanique et de l'électrodynamique, malgré le contraste entre ces théories et la quantification de l'action », plutôt que de souligner l'urgence d'un programme unifié. Dans ce deuxième rôle, il a réduit le niveau de problème du programme.

Le plan de Bohr était de développer d'abord la théorie de l'atome d'hydrogène. Son premier modèle devait être basé sur un noyau avec un proton fixe avec un électron sur une orbite circulaire ; dans le deuxième modèle, il voulait calculer une orbite elliptique dans un plan fixe; puis il avait l'intention d'éliminer clairement les restrictions artificielles du noyau; d'autant plus qu'il envisageait la rotation possible de l'électron, puis espérait étendre son programme à la structure d'atomes et de molécules complexes et à l'effet des champs électromagnétiques sur eux, etc. Cette voie a été prévue dès le départ : l'idée que les atomes sont analogues aux systèmes planétaires a prolongé un programme long, difficile mais optimiste et a clairement indiqué la politique de recherche.

Le premier document de Bohr de 1913 contenait la première étape du programme de recherche. Il contenait son premier modèle ( $M_1$ ), qui avait déjà prédit des faits jusqu'alors imprévus par aucune théorie antérieure : les longueurs d'onde du spectre d'émission de la raie hydrogène.

Nicolae Sfetcu : Le modèle atomique de Bohr, un exemple de programme de recherche

Bien que certaines de ces longueurs d'onde soient connues avant 1913, la théorie de Bohr prédit beaucoup plus que ces deux séries connues. Les tests reprennent bientôt leur contenu romanesque : une série supplémentaire est reprise par Lyman en 1914, une autre par Brackett en 1922 et une autre par Pfund en 1924.

Parce que les séries Balmer et Paschen étaient connues avant 1913, certains historiens présentent l'histoire comme un exemple baconien « en ascension inductive »: (1) le chaos des raies spectrales, (2) une « loi empirique » (Balmer), (3) une explication théorique (Bohr).

En fait, le problème de Bohr n'était pas d'expliquer les séries de Balmer et Paschen, mais d'expliquer la stabilité paradoxale de l'atome de Rutherford. De plus, Bohr n'a même pas entendu parler de ces formules avant d'écrire la première version de son travail.

Tout le contenu romanesque du premier modèle  $M_1$  de Bohr n'a pas été corroboré. Par exemple, le  $M_1$  de Bohr prétendait prédire toutes les raies du spectre d'émission d'hydrogène. Mais il y avait des preuves expérimentales pour un certain nombre de lignes qui, selon Bohr dans  $M_1$ , n'en auraient pas été. La série anormale était la série ultraviolette de Pickering-Fowler.

Bohr n'était cependant pas très impressionné par les physiciens expérimentaux « autoritaires ». Il n'a pas remis en question leur « expérience » ou « la fiabilité de leurs observations », mais a remis en question leur théorie de l'observation. En effet, il a proposé une alternative. Il a d'abord développé un nouveau modèle ( $M_2$ ) de son programme de recherche : le modèle de l'hélium ionisé, avec un double proton en orbite autour d'un électron. Maintenant, ce modèle prédit une série d'ultraviolets dans le spectre de l'hélium ionisé qui coïncide avec la série de Pickering-Fowler. C'était une théorie rivale. Il a ensuite suggéré une « expérience cruciale »: il a prédit que la série de Fowler pourrait être produite, peut-être même avec des lignes plus fortes, dans un tube rempli d'un mélange d'hélium et de chlore. De plus, Bohr a expliqué aux expérimentateurs, sans même

Nicolae Sfetcu : Le modèle atomique de Bohr, un exemple de programme de recherche regarder leur appareil, le rôle catalytique de l'hydrogène dans l'expérience de Fowler et du chlore dans l'expérience qu'il a suggérée. En effet, il avait raison. Ainsi, la première défaite apparente du programme de recherche s'est transformée en une victoire retentissante.

La victoire, cependant, a été immédiatement interrogée. Fowler a admis que sa série n'était pas de l'hydrogène, mais une série d'hélium. Mais il a souligné que le programme de Bohr n'a pas encore réussi : les longueurs d'onde de la série Fowler diffèrent considérablement des valeurs prédites par  $M_2$ . Ainsi, le programme, tout en ne rejetant pas  $M_1$ , rejette toujours  $M_2$ , et en raison de la connexion étroite entre  $M_1$  et  $M_2$ , il sape  $M_1$ .

Bohr a rejeté l'argument de Fowler : bien sûr, il n'a jamais dit que  $M_2$  était pris au sérieux. Ses valeurs étaient basées sur un calcul brut basé sur l'orbite des électrons autour d'un noyau fixe ; mais, bien sûr, ils tournent autour du centre de gravité commun. Ce modèle modifié était le modèle  $M_3$  de Bohr. Et Fowler lui-même devait admettre que Bohr avait encore raison.

L'apparente réfutation de  $M_2$  s'est transformée en victoire pour  $M_3$ ; et il était clair que  $M_2$  et  $M_3$  auraient pu être développés dans le cadre du programme de recherche - peut-être jusqu'à  $M_{17}$  ou  $M_{20}$  - sans aucune incitation d'observation ou d'expérimentation. À ce stade, Einstein a déclaré à propos de la théorie de Bohr : « C'est l'une des plus grandes découvertes. »

Le programme de recherche de Bohr s'est poursuivi comme prévu. L'étape suivante consistait à calculer les orbites elliptiques. La transition vers ce nouveau modèle relativiste a nécessité beaucoup plus de capacités et de talents mathématiques que le développement des premiers modèles.

Moseley a souligné immédiatement après la première publication de Bohr qu'il « ne tient pas compte de la deuxième ligne plus faible trouvée dans chaque spectre ». Bohr n'était pas fâché : il était convaincu que l'heuristique positive de son programme de recherche expliquerait et même

Nicolae Sfetcu : Le modèle atomique de Bohr, un exemple de programme de recherche corrigerait les remarques de Michelson. Et il en fut ainsi. De nombreuses défaites des premiers modèles de Bohr ont été transformées par Sommerfeld et l'école de Munich en victoires pour le programme de recherche de Bohr.

Ce croquis montre comment un changement progressif peut donner crédibilité - et raison - à un programme incohérent. La simple introduction de quantités dans l'action ne signifie pas encore qu'une véritable théorie quantique ait été établie. Les difficultés ont progressivement augmenté, plutôt que diminué ; et bien que la recherche ait résolu certains d'entre eux entre-temps, les différences qui restaient en théorie étaient stressantes. En fait, ce qui, dans la théorie de Bohr, servait de base aux lois de l'action consistait en certaines hypothèses que, il y a une génération, tout physicien aurait sans aucun doute rejetées. Bien qu'au départ, il s'agissait d'installer le moins possible un élément nouveau et étrange dans un système existant, qui était généralement considéré comme établi, l'intrus, après avoir acquis une position sûre, a maintenant pris l'offensive ; et maintenant il semble certain que l'ancien système est sur le point d'exploser à un moment donné. La seule question était de savoir quand et dans quelle mesure cela se produira.

Dans le programme de Bohr, tous les développements du programme n'étaient pas prévus et planifiés lorsque la première heuristique positive a été tirée. Lorsque de curieuses lacunes sont apparues dans les modèles sophistiqués de Sommerfeld (certaines lignes de prévision ne sont jamais apparues), Pauli a proposé une hypothèse supplémentaire profonde (le « principe d'exclusion »), qui non seulement reflétait les lacunes connues, mais reformulait la théorie de la coquille du système d'éléments périodiques et a anticipé des faits auparavant inconnus.

Ainsi, ce programme a atteint un point où sa puissance heuristique a diminué. Les hypothèses *ad hoc* se sont multipliées et n'ont pas pu être remplacées par des explications qui augmentent le contenu. Le programme est resté derrière la découverte des « faits ». Des anomalies

Nicolae Sfetcu : Le modèle atomique de Bohr, un exemple de programme de recherche non digérées ont inondé le programme. Avec des incohérences de plus en plus stériles et des hypothèses *ad hoc* plus profondes, dans la phase de dégénérescence, le programme de recherche a commencé à perdre son caractère empirique. Bientôt un programme de recherche rival est apparu : la mécanique ondulante. Non seulement le nouveau programme, même dans sa première version, expliquait les conditions quantiques de Planck et Bohr, mais il a également conduit à des faits intéressants. Dans ses versions ultérieures, de plus en plus sophistiquées, il a proposé des solutions à des problèmes qui étaient complètement inaccessibles au programme de recherche de Bohr et a expliqué les théories *ad hoc* ultérieures du programme de Bohr à travers des théories satisfaisant des normes méthodologiques élevées. La mécanique ondulante a été acceptée bientôt le dessus, a vaincu et a remplacé le programme de Bohr.

Le programme de recherche de la théorie quantique dans son ensemble était un programme « greffé », et donc pas accepté par les physiciens avec des vues profondément conservatrices comme Planck. Il existe deux positions extrêmes et tout aussi irrationnelles concernant un programme de greffe.

*La position conservatrice* est d'arrêter le nouveau programme jusqu'à ce que l'incohérence de base avec l'ancien programme soit en quelque sorte réparée : il est irrationnel de travailler sur des bases incohérentes. Les « conservateurs » s'attacheront à éliminer les incohérences en expliquant (de manière approfondie) les postulats du nouveau programme par rapport à l'ancien programme : ils jugent irrationnel de poursuivre le nouveau programme sans réduction réussie. Planck lui-même a choisi cela. Il n'a pas réussi, malgré la décennie de dur labeur qu'il y a investie en lui.

*La position anarchiste* sur les programmes de greffe est d'étendre l'anarchie dans la fondation comme une vertu et de considérer l'incohérence [faible] soit comme une propriété

Nicolae Sfetcu : Le modèle atomique de Bohr, un exemple de programme de recherche fondamentale de la nature soit comme une limitation finale de la connaissance humaine, comme l'ont fait certains des successeurs de Bohr.

*La position rationnelle* est mieux caractérisée par Newton, qui fait face à une situation qui dans une certaine mesure était similaire à celle discutée. La mécanique cartésienne de type push, sur laquelle le programme de Newton a été initialement greffé, était (faiblement) incompatible avec la théorie de la gravité de Newton. Newton a travaillé sur son programme heuristique (réussi) et réductionniste (échoué), et a été désapprouvé par les cartésiens qui, comme Huyghens, pensaient qu'il ne valait pas la peine de perdre du temps avec un programme « inintelligible », ainsi que par certains de ses disciples qui, comme Cotes, pensaient que l'incohérence n'était pas un problème.

La position rationnelle concernant les programmes « greffés » est d'exploiter leur pouvoir heuristique sans se résigner au chaos fondamental qui grandit. Dans l'ensemble, cette attitude dominait l'ancienne théorie quantique avant 1925. Dans la nouvelle théorie post-1925, la position « anarchiste » est devenue dominante et la physique quantique moderne, dans son interprétation de Copenhague, est devenue l'un des principaux porte-étendards de l'obscurantisme philosophique. Dans la nouvelle théorie, le « principe de complémentarité » notoire de Bohr incorporait l'incohérence [faible] en tant que caractéristique fondamentale de la nature et combinait le positivisme subjectiviste et la philosophie dialectique ancienne et même le langage ordinaire dans une alliance malsaine. En 1925, Bohr et ses associés ont introduit une nouvelle réduction sans précédent des normes critiques pour les théories scientifiques. Cela a conduit à une défaite de la raison dans la physique moderne et à un culte anarchiste d'un chaos incompréhensible.

Planck lui-même donne une description dramatique de ces années : « Mes tentatives inutiles pour quantifier l'élément d'action dans la théorie classique se sont poursuivies pendant



Nicolae Sfetcu : Le modèle atomique de Bohr, un exemple de programme de recherche plusieurs années et m'ont coûté beaucoup d'efforts. Beaucoup de mes collègues ont vu ces tentatives comme quelque chose qui est proche d'une tragédie. » (Whittaker 1960, 103–4)

Einstein et ses alliés n'ont pas gagné le combat. Les deux points de vue, le quantum et le champ électromagnétique, sont complémentaires au sens de Bohr. Cette complémentarité est l'une des grandes réalisations de la philosophie naturelle, dans laquelle

### **Bibliographie**

- Bohr, Niels. 1913. "On the Constitution of Atoms and Molecules, Part I." *Philosophical Magazine* 26: 1–25.
- Lakatos, Imre. 1978. "The Methodology of Scientific Research Programmes." Cambridge Core. 1978. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511621123>.
- Whittaker, Edmund Taylor. 1960. *A History of the Theories of Aether and Electricity*. Harper.