

Examen de seconde session

Histoire et Méthode des Sciences

Licence L₂ MPM

Mercredi 12 Septembre 2007

Notes de cours autorisées, aussi, les réponses ne sont pas uniquement dans le texte !

Questions

1. Rappelez en quoi consiste « le problème des spectres » en 1913. (2 points)

Le problème des spectres se résume à la justification aux lois de Balmer et de Rydberg précisant la localisation de certaines raies spectrales de l'hydrogène.

2. Donnez les grandes lignes du modèle de Bohr. (2 points)

Le modèle de Bohr consiste en

- un modèle planétaire où le noyau joue le rôle de soleil et les électrons celui de planètes ;
- les trajectoires possibles des électrons sont supposées être circulaires et de moments angulaires quantifiés via la constante de Planck ;
- seules les transitions d'une orbite à l'autre sont associées à l'émission de photons d'énergie $h\nu = E_2 - E_1$.

3. Explicitez les « trois étages de Whewell » dans le cadre de la théorie de l'atome (selon Lakatos). (3 points)

Les trois étages de Whewell, disséquant l'ascension inductive de Bacon sont :

- (a) la confusion (le chaos) parmi les phénomènes observés ;
- (b) l'obtention d'une loi empirique qui décrit sans expliquer ;
- (c) l'explication théorique qui vient justifier la loi empirique.

4. D'après ce qui a été vu en cours, est-ce que l'atome de Bohr résulte uniquement du problème des spectres ? (2 points)

Le modèle de Bohr résulte avant tout de la tentative de décrire de la structure atomique — en fait, surtout la structure électronique — pour l'explication de la loi périodique de Mendeleïev, l'effet photo-électrique, l'électricité, l'électrolyse, l'affinité chimique et les spectres. Tous ces sujets ont été abordés par les prédécesseurs de Bohr.

5. Parmi les cinq noms cités par Lakatos à propos des « spéculations hardies », un n'a jamais vraiment considéré le problème des spectres. Lequel ? Citez ensuite trois scientifiques qui « devraient » se trouver parmi cette liste. (2 points)

Rutherford n'a jamais contribué au problème des spectres. Par contre, il manque au moins trois noms qui aurait dû être cités et qui, comme par hasard, n'appartiennent pas à l'« école Rutherford » : Thomson, Nagaoka et Nicholson.

6. Préciser quel est le problème de « la stabilité paradoxale de l'atome de Rutherford » ? Est-ce que le problème en question est correctement désigné ? (2 points)

La « stabilité paradoxale de l'atome de Rutherford » désigne incorrectement les difficultés rencontrées par Nagaoka, mais aussi par Thomson pour expliquer l'étonnante stabilité d'un électron en orbite autour du noyau. En effet, les électrons alors supposés rayonner alors qu'ils tournaient sur leurs orbites : la perte d'énergie qui devait en découler impliquait nécessairement la chute de l'électron sur le noyau. C'est Nicholson qui le premier imposa une « quantification » des orbites électroniques afin d'éviter cette difficulté mais c'est Bohr qui émit l'hypothèse utilisée encore aujourd'hui que le rayonnement n'est produit que lors des changements d'orbites. Rutherford n'a jamais considéré la structure électronique du noyau et, par conséquent, n'a jamais considéré ce problème de la stabilité.

7. Que révèle sur le fonctionnement des sciences l'explication « plausible » mais erronée de Fowler à propos de l'origine de la série qu'il observa en 1912 ? (2 points)

L'explication « plausible » mais erronée de Fowler provient des limitations des techniques expérimentales utilisées, le gaz étudié par Fowler contenant d'autres éléments que l'hydrogène. La confusion vient du fait qu'il y a superposition d'une série de l'hydrogène avec une série de l'hélium. Il est « facile » de confondre... La « science » ne propose donc pas nécessairement la bonne interprétation, surtout dans le cadre des toutes premières tentatives.

8. En adaptant successivement sa théorie aux différentes expériences réalisées par Fowler, quelle capacité de sa théorie est révélée par Bohr ? En quoi, est-ce que le signe d'une théorie « valide » et plein d'avenir ? (3 points)

Le modèle de Bohr se révèle suffisamment riche pour présenter une capacité à s'adapter aux observations nouvelles. ceci est considéré, tant par Lakatos que par Popper, comme la caractéristique d'une « bonne » théorie car elle sera capable d'absorber de nouvelles évidences expérimentales.

9. Dans son article de 1914, Fowler écrit

- Bohr's formula for this series is identical, in a first approximation, with that for hydrogen, except that the Rydberg constant N ($=109,675$ for Rowland's scale) has four times its usual value.
- The new measurements also showed that the eight observed lines could be united in a single series of the new type suggested by the work by Dr. Bohr.
- The close numerical relations indicated by Rydberg's calculations are therefore not significant, and, in view of the experimental evidence, it must be concluded that the "4686" series is not due to hydrogen but helium, as first suggested by Dr. Bohr from theoretical considerations.

A la lecture du texte de Lakatos et de ces citations, qu'en concluez-vous sur les relations entre théorie et expérience ? (2 points)

Les citations de Fowler révèlent qu'il y a des aller-retours (inextricables) entre théorie et expériences et qu'il ne peut y avoir une théorie précise sans validation expérimentale mais également, qu'il ne peut y avoir d'interprétations expérimentales sans théorie.

Histoire et méthodologie des sciences

IMRE LAKATOS

Revenons maintenant à la logique de la découverte de la première théorie quantique et occupons-nous particulièrement de son heuristique ¹ positive. Le plan de Bohr consistait à élaborer d'abord la théorie de l'atome d'hydrogène. Son premier modèle devait être fondé sur un proton-noyau fixe avec un électron décrivant une orbite circulaire ; dans son second modèle, il se proposait de calculer une orbite elliptique dans un plan fixe ; il avait ensuite l'intention de se passer des restrictions visiblement artificielles du noyau fixe et du plan fixe ; après quoi il pensait prendre en compte le spin possible de l'électron ², puis il espérait étendre son programme à la structure d'atomes et de molécules complexes et aux effets des champs électromagnétiques sur ceux-ci, etc. Tout ceci fut planifié dès le début : l'analogie entre les atomes et des systèmes planétaires inspira un programme long et difficile, mais optimiste, elle indiquait clairement quelle était sa politique de recherche ³. « On pouvait croire à cette époque — en 1913 — qu'on avait enfin trouvé l'authentique clé [du problème] des spectres et qu'avec du temps et de la patience on résoudrait complètement leurs énigmes ⁴ ».

Le célèbre article de Bohr ⁵ contenait l'étape initiale du programme de recherche. Il comportait son premier modèle (je l'appellerai M_1) qui déjà prédisait des faits qu'aucune autre théorie n'avait encore prédits : les longueurs d'ondes des raies d'émission de l'hydrogène. Bien qu'on eût connu certaines de ces longueurs d'onde avant 1913 — la série de Balmer (1885) et celle de Paschen (1908) —, la théorie de Bohr prédisait beaucoup plus que ces deux séries. Et leurs mises à l'épreuve vinrent bientôt corroborer ce contenu nouveau : une série de Balmer supplémentaire fut découverte par Lyman en 1914, une autre par Brackett en 1922, puis encore une autre par Pfund en 1924.

Puisque la série de Balmer et celle de Paschen étaient connues avant 1913, certains historiens présentent cette histoire comme un exemple de l'« ascension inductive » baconienne, avec 1°) le chaos des raies spectrales, 2°) une « loi empirique » (Balmer ⁶), 3°) l'explication théorique (Bohr). Cela ressemble certainement beaucoup aux trois « étages » de Whewell ⁷. Mais les progrès de la science auraient à peine été retardés s'il nous avait manqué le travail méritoire par essais et erreurs de l'ingénieur maître de l'école suisse : le courant dominant spéculatif de la science, entraîné par les spéculations hardies de Planck, Rutherford, Einstein et Bohr, aurait produit par déduction les résultats de Balmer, comme énoncés de mise à l'épreuve de leurs théories, sans le prétendu « travail de pionnier » de Balmer. Dans la reconstruction rationnelle des sciences, les découvreurs de « conjectures naïves » ne sont guères récompensés de leurs peines.

¹Heuristique ; qui sert à la découverte.

²Il s'agit d'une reconstruction rationnelle. En fait Bohr, n'a accepté cette idée qu'en 1926 : G. E. Uhlenbeck & S. Goudsmit, Spinning electrons and the structure of spectra, *Nature*, **117**, 264-265, 1926.

³En dehors de cette analogie, l'heuristique positive de Bohr comportait une autre idée fondamentale : le « principe de correspondance ». Il l'avait mentionnée dès 1913 mais il ne la développa que plus tard, quand il l'utilisa comme principe directeur pour résoudre certains problèmes posés par des modèles ultérieurs, plus raffinés (comme les intensités et les états de polarisation). La deuxième partie de son heuristique positive avait ceci de singulier que Bohr ne croyait pas à sa version métaphysique : il pensait que c'était une règle provisoire, qui durerait jusqu'à ce que l'électromagnétisme (et peut-être la mécanique) classique soit remplacé.

⁴C. J. Davison, *The discovery of electron waves*, Nobel Lectures, 1937. En 1748, MacLaurin avait ressenti une euphorie comparable quant au programme de Newton : « la philosophie [de Newton], étant fondée sur l'expérimentation et la démonstration, ne peut échouer avant que la raison ou la nature des choses ne soit transformée... [Newton] n'a guère plus laissé comme tâche à la postérité que d'observer les ciels et de calculer selon ses modèles ». in C. MacLaurin, *An account of Sir Isaac Newton's philosophy*, 1748.

⁵N. Bohr, On the constitution of atoms and molecules, *Philosophical Magazine*, **26**, 1-25, 476-502, 857-875, 1913.

⁶Johann Jakob Balmer (1825-1898), physicien et mathématicien suisse.

⁷William Whewell (1794-1866) enseigna les mathématiques, la minéralogie et la philosophie à l'Université de Cambridge. En outre, il publia deux ouvrages relatifs à la philosophie des sciences : *History of the inductive sciences* (1837) et *Philosophy on the inductive sciences* (1840). Il insista sur l'importance dans les sciences aussi bien des concepts et des idées, que des facteurs empiriques. Selon lui, il y a trois étapes dans l'induction : 1°) l'explication des conceptions, 2°) la colligation (synthèse) des faits au moyen d'une conception et 3°) la vérification.

A vrai dire, le problème que se posait Bohr, c'était de rendre compte non des séries de Balmer et de Paschen, mais de la stabilité paradoxale de l'atome de Rutherford. Bien plus, Bohr n'avait pas même entendu parler de ces formules avant d'écrire la première version de son article ⁸.

Le contenu inédit du premier modèle M_1 ne fut pas corroboré en son entier ; par exemple, Bohr prétendait prédire avec M_1 toutes les raies du spectre d'émission de l'hydrogène. Mais il existait un témoignage expérimental de l'existence d'une série de l'hydrogène là où, selon M_1 , il n'aurait pas dû y en avoir. Cette série anormale est la série ultra-violette de Pickering-Fowler.

Pickering avait découvert cette série en 1896 dans le spectre de l'étoile ζ Puppis. Fowler, après avoir lui aussi découvert la première raie dans le soleil en 1898, produisit la série toute entière dans un tube à décharge contenant de l'hydrogène et de l'hélium. On pouvait à vrai dire prétendre que les raies monstrueuses n'avaient rien à voir avec l'hydrogène : après tout, le soleil et ζ Puppis comportent de nombreux gaz et le tube à décharge [de Fowler] contenait aussi de l'hélium. De fait, la raie ne pouvait *pas* être produite dans un tube contenant de l'hydrogène pur. Mais la « technique expérimentale » de Pickering et de Fowler, qui conduisit à une hypothèse falsificatrice de la loi de Balmer, avait une base théorique plausible, quoique n'ayant jamais été rigoureusement mise à l'épreuve : 1°) leur série avait le même point de convergence que celle de Balmer, elle fut donc prise pour une série d'hydrogène ; 2°) Fowler expliqua de façon plausible pourquoi l'hélium ne pouvait pas être responsable de la production de la série ⁹.

Mais Bohr ne fut pas très impressionné par l'autorité des expérimentateurs. Il ne mit en doute ni leur « précision expérimentale » ni la « fiabilité de leurs observations », mais il discuta leur théorie d'observation. En fait, il proposa une autre voie. D'abord, il élaborait un nouveau modèle (M_2) de son programme de recherche : celui de l'hélium ionisé, avec un double proton autour duquel un électron décrit une orbite. Or ce modèle prédit la présence d'une série ultraviolette dans le spectre de l'hélium ionisé, laquelle coïncide avec la série de Pickering-Fowler. Voilà qui constituait une théorie rivale. Puis il suggéra une « expérience cruciale » : il prédit qu'on pourrait produire la série de Fowler, peut-être même avec des raies plus intenses, dans un tube rempli d'un mélange d'hélium et de chlore. En outre, Bohr expliqua aux expérimentateurs, sans même regarder leur appareillage, le rôle catalytique de l'hydrogène dans l'expérience de Fowler et du chlore dans l'expérience qu'il proposait ¹⁰. Et il eut raison. C'est ainsi que la première défaite apparente de son programme de recherche se transforma en victoire retentissante.

Pourtant la victoire fut aussitôt remise en question. Fowler reconnut que sa série n'était pas une série de l'hydrogène, mais une série de l'hélium. Mais il fit remarquer que l'adaptation de monstres faite par Bohr ¹¹ était encore un échec : les longueurs d'onde dans la série de Fowler diffèrent de façon significative des valeurs prédites par M_2 . Ainsi, la série, quoiqu'elle ne réfute pas M_1 , persiste à réfuter M_2 , et, à cause de l'étroite connexion entre M_1 et M_2 , elle sape M_1 ¹² !

Bohr balaya l'argument de Fowler : il n'avait jamais voulu, *bien entendu*, qu'on prît M_2 trop au sérieux. Ses valeurs étaient le résultat d'un calcul grossier fondé sur l'électron décrivant une orbite autour d'un noyau fixe ; mais, *bien entendu*, l'électron tourne autour de leur centre de gravité commun ; *bien entendu*, comme on le fait quand on traite des problèmes de deux corps, à la masse

⁸M. Jammer, *The conceptual development of quantum mechanics*, McGraw-Hill, 1966.

⁹W. A. Fowler, Observations of the principal and other series of lines in the spectrum of hydrogen, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **73**, 62-71, 1912.

¹⁰N. Bohr, Lettre à Rutherford datée du 6 Mars 1913 in *On the constitution of atoms and molecules*, Benjamin, 1963.

¹¹Adaptation de monstres : transformation, à la lumière d'une certaine théorie nouvelle, d'un contre-exemple en exemple. Mais « l'adaptation de monstres » faite par Bohr était empiriquement « progressive » : elle prédisait un fait nouveau (l'apparition de la raie 4686 Å dans des tubes qui ne contenaient pas d'hydrogène).

¹²W. A. Fowler, The spectra of Helium and Hydrogen, *Nature*, **92**, 95, 1913.

on doit substituer la masse réduite ¹³ :

$$m'_e = \frac{m_e}{1 + \left(\frac{m_e}{m_n}\right)}.$$

Tel est le modèle modifié M₃ de Bohr. Et Fowler lui-même dut admettre que Bohr avait une fois de plus raison ¹⁴.

La réfutation apparente de M₂ se transformait en une victoire de M₃ ; et on voyait clairement que M₂ et M₃ — et peut-être même M₁₇ ou M₂₀ — se seraient développés à l'intérieur du programme de recherche sans aucune stimulation venant de l'observation ou de l'expérimentation. C'est à cette étape qu'Einstein dit de la théorie de Bohr que « c'est l'une des plus grandes découvertes que l'on ait faite »¹⁵.

Le programme de recherche de Bohr se poursuivit alors comme prévu. L'étape suivante consistait à calculer des orbites elliptiques. Sommerfeld le fit en 1915, mais avec ce résultat (inattendu) que le nombre accru d'orbites n'entraînait pas un nombre accru de niveaux d'énergie possibles, de sorte qu'il ne semblait pas y avoir de possibilité d'expérimentation cruciale pour départager la théorie des orbites elliptiques de celle des orbites circulaires...

¹³N. Bohr, The spectra of Helium and Hydrogen, *Nature*, **92**, 231-232, 1913. Cette adaptation de monstres était aussi « progressive » : Bohr prédisait que les observations de Fowler devaient être légèrement imprécises et la « constante » de Rydberg avoir une structure fine.

¹⁴W. A. Fowler, The spectra of Helium and Hydrogen, *Nature*, **92**, 232, 1913. Mais sceptique, Fowler remarquait que le programme de Bohr n'avait pas encore expliqué les raies du spectre de l'hélium ordinaire, *non ionisé*. Cependant, il abandonna bientôt son attitude sceptique pour collaborer au programme de recherche de Bohr : W. A. Fowler, Series lines in spark spectra, *Proceedings of the Royal Society of London A*, **90**, 426-430, 1914.

¹⁵G. von Hevesy, Lettre à Rutherford datée du 14 Octobre 1913, citée in N. Bohr, On the constitution of atoms and molecules, Benjamin, p. 42, 1963. « Quand je lui parlai encore du spectre de Fowler, les grands yeux d'Einstein me parurent s'agrandir encore et il me dit : "Alors, c'est l'une des plus grandes découvertes que l'on ait jamais faites." »