

Vers l'atome quantique

Résumé L'instabilité du modèle de l'atome de Rutherford conduit Bohr à proposer le premier modèle quantique de l'atome : un électron gravite autour du noyau sur une orbite, dite stationnaire, caractérisée par un nombre quantique n , sans émettre d'énergie rayonnante ; puis quand il passe d'une orbite à une autre, il émet une énergie correspondant au quantum élémentaire d'énergie $h\nu$. Ce modèle trouvera sa validation à travers l'analyse des raies spectrales, puis sera modifié par Sommerfeld qui inaugurerait le passage de un à quatre nombres quantiques. La nature matérielle de l'électron se trouve alors transformée en réalisme mathématique et c'est l'énergie qui devient la grandeur physique fondamentale caractérisant l'électron dans l'atome. Avec l'école de Copenhague (Bohr, Heisenberg, Born), finit l'idée d'une représentation imagée de l'atome, la physique théorique ne peut que reproduire le possible et non le réel.

Mots-clés Modèles, atome, quanta, nombres, quantiques, électron, probabilité, orbitales atomiques.

Abstract To the quantum atom

The instability of the Rutherford atom model led Bohr to propose the first quantum model of the atom: an electron gravitates around the nucleus on an orbit, called stationary, characterized by a quantum number n , without emitting radiant energy; it is when it passing from one orbit to another that it emits an energy corresponding to the elemental quantum of energy $h\nu$. This model will find its validation through the analysis of spectral lines; Sommerfeld will later modify this model inaugurating the transition from one to four quantum numbers. The material nature of the electron is then transformed into a mathematical realism and the energy becomes the fundamental physical variable characterizing the electron in the atom. With the Copenhagen school (Bohr, Heisenberg and Born), the idea of a pictorial representation of the atom came to end; theoretical physics can only reproduce the possible and not the real.

Keywords Models, atom, quanta, numbers, quantum, electron, probability, atomic orbitals.

En ce début du XX^e siècle, finit le caractère élémentaire de l'atome, puisque d'autres particules fondamentales (électrons, protons neutrons) ont été trouvées par les physiciens. Ernest Rutherford (1871-1937) représente l'atome comme étant constitué d'un noyau chargé positivement entouré par une distribution d'électrons qui se déplacent rapidement sur des orbites circulaires [1]. Mais la stabilité d'un tel système ne peut s'expliquer dans le cadre de la mécanique classique. De plus, on est passé de l'élément substance de Mendeleïev à l'élément arithmétique, caractérisé par son numéro atomique et dont les propriétés sont liées à des électrons décrits par quatre nombres quantiques. Et, d'après la répartition de ces nombres, on en déduira la répartition des places des électrons dans l'atome et dans la molécule.

L'atome de Bohr

En 1912, un jeune physicien danois, Niels Bohr (1885-1962), est en stage dans le laboratoire de Rutherford. Fortement préoccupé par l'instabilité du modèle de Rutherford, il va s'efforcer de soustraire l'électron aux règles de l'électrodynamique classique et de rendre compte de cette structure commune pour tous les atomes d'un même élément. Pour cela, de retour au Danemark en 1913, Bohr entreprend d'ajuster les différentes pièces du puzzle de la discontinuité :

1. La loi de Max Planck (1858-1945) qui introduit un premier élément fondamental de discontinuité : cette loi, relative au rayonnement du corps noir, précise que la matière ne peut émettre l'énergie radiante que par des quantités finies, multiples entiers d'une quantité élémentaire $h\nu$; la constante h est dénommée par Planck la « *constante élémentaire d'action* » et la quantité $h\nu$ devient le « *quantum élémentaire d'énergie* ».

2. Les réflexions d'Albert Einstein (1879-1955), qui sont fondées sur les idées de Planck et qui l'amènent, en 1905, à formuler son hypothèse corpusculaire de la lumière : cette dernière est composée de particules, les photons, possédant une énergie $h\nu$.

3. Les relations établies pour les raies spectrales d'émission et d'absorption lumineuse par Johann Jacob Balmer (1825-1898) en 1885, Johannes Robert Rydberg (1854-1919) en 1890 et Friedrich Paschen (1865-1947) en 1908, qui constituent un autre élément essentiel en faveur de la discontinuité des phénomènes. En 1908, Walther Ritz (1878-1909) propose la formule suivante pour interpréter le spectre de raie de l'atome d'hydrogène : $1/\lambda = R(1/n^2 - 1/m^2)$, formule où figure R , constante de Rydberg, et dans laquelle n et m sont des nombres entiers, avec $m > n$.

4. Les contradictions des modèles « classiques » de l'atome. Il propose de nouvelles hypothèses permettant de formuler en quelque sorte le premier « *modèle quantique* » de l'atome [2]. D'après ce modèle « révolutionnaire » :

- Un électron gravite sur une orbite sans émettre d'énergie rayonnante ; cette orbite est dite « *stationnaire* » (d'énergie constante).

- Un électron ne peut décrire que certaines orbites de rayons déterminés ; il ne peut sortir de son orbite que sous l'action d'une force étrangère qui le fait passer sur une autre orbite de stabilité.

- Quand un électron passe d'une orbite sur une autre, l'énergie rayonnante $E_1 - E_2$ correspond au « *quantum élémentaire d'énergie $h\nu$* ».

Les orbites introduites ici représentent donc des états d'énergie stationnaires à partir desquels l'atome peut émettre ou absorber de l'énergie. Le noyau de l'atome, chargé

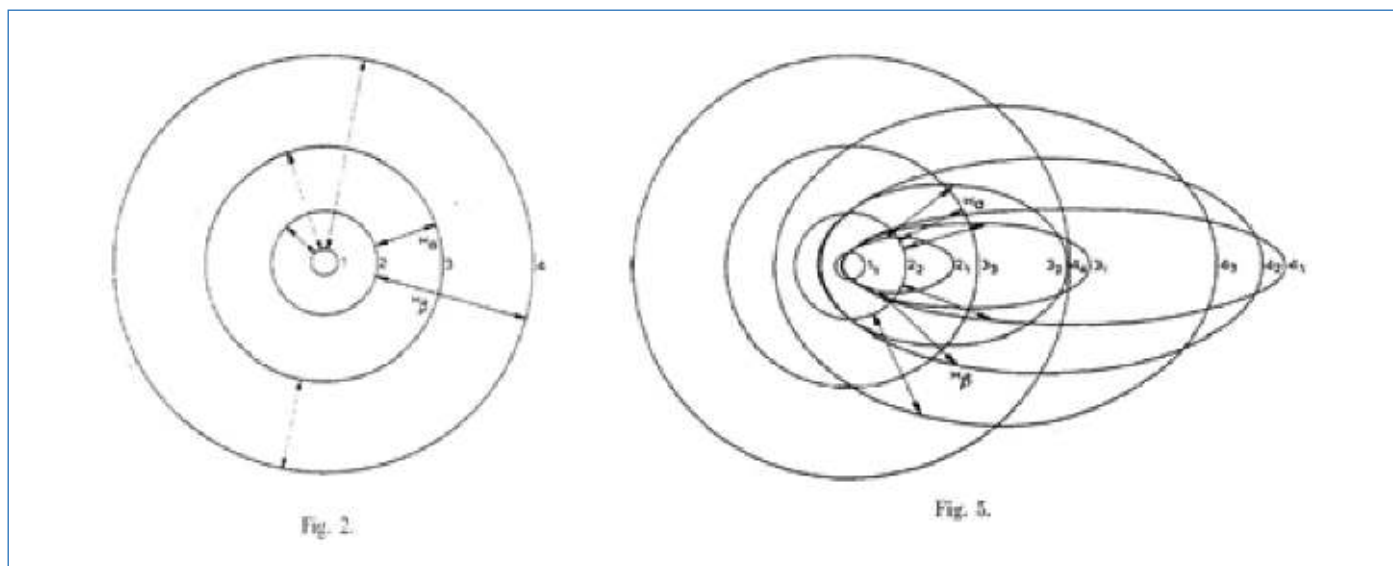


Figure 1 - Représentation donnée par Bohr (Nobel Lecture, 1922) de son modèle pour l'atome d'hydrogène (Fig 2) et des orbites électroniques obtenues en tenant compte de l'hypothèse de Sommerfeld (Fig 5).

positivement, est entouré d'électrons disposés en orbites successives (chacune caractérisée par un nombre quantique distinct appelé initialement τ , puis plus tard n) et susceptibles de « sauter » d'une orbite à l'autre en absorbant ou en émettant un quantum lumineux correspondant à la différence énergétique entre les deux orbites (figure 1).

Dans ce modèle, c'est l'énergie associée au processus de transition qui devient la grandeur fondamentale, reléguant au second plan la nature matérielle des électrons. L'électron n'est plus caractérisé par sa granularité, sa position dans l'espace et l'évolution de celle-ci dans le temps, mais par l'état énergétique dans lequel il se trouve. Ce modèle bien que critiqué, par exemple par Einstein – « *L'avis de Bohr sur le rayonnement m'intéresse fort. Mais [...] l'idée qu'un électron exposé à un rayonnement choisit en toute liberté le moment et la direction où il veut sauter m'est insupportable. S'il en était ainsi, j'aimerais mieux être cordonnier ou même employé dans un tripot que physicien* » [3] –, trouvera une validation à travers l'analyse spectrale des rayons X judicieusement utilisée par Henry Moseley (1887-1915) en 1913. Chaque élément, frappé par des électrons rapides, émet un spectre caractéristique formé de groupes de raies fines, groupes largement séparés dans l'échelle des fréquences. Deux groupes avaient été mis en évidence par Charles Glover Barkla (1877-1944), dont le premier, le plus pénétrant, celui qui correspond aux fréquences les plus élevées a été nommé K et le second L [1]. Les résultats obtenus par Moseley correspondant à la raie dite K_{α} , due à la transition entre la couche L et la couche K, du spectre X émis par chaque élément, sont en accord avec l'hypothèse de Bohr. Ces raies obéissent à une formule analogue à celle de Balmer, soit $\nu = (N - 1) R (3/4)$. Dans cette formule, N est pour Moseley un entier qu'il suppose (en accord avec les travaux de Van den Broek) être le nombre atomique, R étant la constante de Rydberg.

Mais si le modèle de Bohr, caractérisé par un seul nombre quantique, peut permettre aux chimistes de répondre à certaines de leurs interrogations, il se révèle insuffisant pour interpréter la démultiplication des raies du spectre de l'atome d'hydrogène que l'on a pu mettre en évidence en utilisant des spectromètres à haut pouvoir de résolution. De plus, il ne permet pas d'interpréter correctement les spectres d'atomes

à plusieurs électrons. En 1916, Arnold Sommerfeld (1868-1951)⁽¹⁾ introduit un second paramètre, admettant que l'électron peut décrire une ellipse et non un cercle comme le préconisait Bohr (figure 1). Cela revient à dire que le moment cinétique dû au mouvement de l'électron sur son orbite est quantifié. Au nombre quantique principal n de Bohr (relatif à la taille de l'orbite) s'ajoute le nombre quantique azimutal k (qui deviendra l) qui concerne le caractère plus ou moins allongé de l'ellipse et un nombre quantique, dit de latitude, qui détermine l'orientation de l'orbite dans l'espace. Peu de temps après, ce troisième nombre quantique sera remplacé par le nombre quantique magnétique (m) qui quantifie le moment magnétique orbital engendré par la circulation de l'électron, ce qu'Alfred Parson (1889-1970) avait pressenti en 1915. L'introduction de cette triple quantification permet d'interpréter l'effet Zeeman, découvert en 1896 (démultiplication des raies sous l'action d'un champ magnétique), puis l'effet Stark, observé en 1913 (démultiplication des raies sous l'action d'un champ électrique).

Le remplissage des couches électroniques

Entre 1922 et 1924, de nombreux travaux vont être publiés sur le dénombrement des sous-niveaux d'énergie associés aux niveaux d'énergie K, L, M, N... des spectres des rayons X ; on peut signaler les publications de Bohr (en 1922 et 1923) [5], Alfred Landé (1888-1976), Arnold Sommerfeld (1868-1951), Harold Robinson (1889-1955), Louis de Broglie (1892-1987) et Alexandre Dauvillier (1892-1976). L'analyse de ces différents travaux effectuée par Edmund Clifton Stoner (1899-1968) en 1924 l'amène à retenir qu'il existe trois sous-niveaux L voisins, cinq sous-niveaux M et sept sous-niveaux N, chaque sous-niveau étant caractérisé par les nombres quantiques n (principal), k (azimutal) et j (interne) ; k et j étant $\leq n$. Les règles de sélection adoptées et l'hypothèse formulée pour expliquer le dédoublement des raies des métaux alcalins (un seul électron externe), à savoir qu'il y a $2j$ états possibles pour un électron de nombre quantique j (ces $2j$ états résultant de « l'orientation par rapport au champ magnétique » [6]) le conduisent à proposer les distributions électroniques (complètes) suivantes pour les raies K, L, M : (2), (2,2,4) et (2,2,4,4,6).

Tableau - Répartition des électrons dans les couches successives.

n	l	m	Nombre d'électrons	
			par sous-couche	par couche
1	0	0	2	2 (K)
2	0	0	2	8 (L)
	1	+ 1, 0, - 1	6	
3	0	0	2	18 (M)
	1	+ 1, 0, - 1	6	
	2	+ 2, + 1, 0, - 1, - 2	10	
4	0	0	2	32 (N)
	1	+ 1, 0, - 1	6	
	2	+ 2, + 1, 0, - 1, - 2	10	
	3	+ 3, + 2, + 1, 0, - 1, - 2, - 3	14	

On voit apparaître dans le modèle de Stoner la nécessité d'un quatrième nombre quantique. Celui-ci est introduit à la suite des travaux de George Uhlenbeck (1900-1988) et Samuel Abraham Goudsmit (1902-1978) qui montrent que certaines propriétés de l'atome peuvent être expliquées en supposant que les électrons pivotent autour de leur axe. Comme cette rotation (spin) peut être associée à deux sens opposés, une paire de ces électrons pivotant en sens contraires peut compenser de ce point de vue leur influence. Wolfgang Ernst Pauli (1900-1958) propose en 1925, à partir de l'analyse de spectres d'atomes placés dans un champ magnétique, le quatrième nombre quantique s , et présente ce qui deviendra son « principe d'exclusion » : « Deux électrons d'un atome ne peuvent être caractérisés par un ensemble identique de nombres quantiques » [7].

En cette fin du premier quart du XX^e siècle, le développement du modèle de Bohr a donc multiplié les variables quantifiées dont dépend l'état des électrons dans les atomes. Avec les quatre nombres quantiques n , l , m , s , il devient possible d'établir la structure électronique de la totalité des éléments du tableau de Mendeleïev, éléments qui peuvent être décrits en termes de couches, sous-couches et cases quantiques (voir tableau). On est passé de l'élément substance de Mendeleïev, caractérisé par le poids atomique de l'atome et dont l'individualité résulte de ses propriétés spécifiques, à l'élément arithmétique, caractérisé par son numéro atomique et dont les propriétés sont liées à des électrons décrits par quatre nombres quantiques.

L'atome quantique

Comme le fait remarquer Louis de Broglie (1892-1987), « Vers 1923, l'ancienne théorie des quanta semblait avoir atteint les limites de sa puissance explicative » ([8], p. 138). Tout d'abord, elle ne permet pas d'interpréter certains phénomènes spectroscopiques et son caractère hybride reste une difficulté essentielle. Par exemple, les rapports de la physique classique avec l'étrangeté des « sauts quantiques » sont soulignés avec force par de Broglie et Erwin Schrödinger (1887-1961). Leur critique principale peut être résumée par cet extrait tiré d'un ouvrage de de Broglie en 1937 : « Entre les transitions, l'atome est dans un état stable, un des états stationnaire de Bohr, où il semble ignorer le monde extérieur, car il n'y rayonne point d'énergie électromagnétique malgré les prescriptions précises de la théorie électromagnétique ; puis soudain, il saute de cet état stationnaire à un autre en accomplissant une transition

impossible à décrire et à représenter dans l'espèce. Nous voilà maintenant bien loin des conceptions classiques, après les avoir pris comme point de départ » ([9], p. 149-150). L'opposition de Schrödinger est si forte qu'il déclare à Bohr : « Si ces damnés sauts quantiques devaient subsister, je regretterais de m'être jamais occupé de théorie quantique ! » ([10], p. 328).

Dans le but de résoudre ce qu'il appelle « l'énigme de l'atome », Bohr crée en 1921, à Copenhague où il est professeur, un Institut de physique théorique où il fait venir de très nombreux physiciens de divers pays. On parlera par la suite de « l'école de Copenhague ». L'enjeu de ces efforts remarquables est la mise en forme d'une théorie satisfaisante qui doit pouvoir déduire les lois quantiques de principes plus fondamentaux. Deux voies différentes sont utilisées pour tenter d'y arriver : d'une part la mécanique ondulatoire de Schrödinger et de Broglie, et d'autre part la mécanique matricielle d'Heisenberg (1901-1976) avec l'école de Copenhague.

Des mécaniques ondulatoires

Le 25 novembre 1924, Louis de Broglie soutient devant un jury, un peu dubitatif et présidé par Jean Perrin (1870-1942), une thèse intitulée : « Recherche sur la théorie des quanta », dans laquelle il admet que toute particule matérielle en mouvement est toujours associée à une onde. Suggérée par la dualité de la lumière, et par une analogie de forme « entre la dynamique classique des corpuscules et l'optique géométrique », de Broglie prévoit son extension à toute particule, plus précisément à l'électron. Selon l'hypothèse de de Broglie, à tout corpuscule matériel on peut associer une onde dont la longueur d'onde λ est liée à la quantité de mouvement p par la relation $\lambda = h/p$, relation dans laquelle h désigne la constante de Planck. Cette dualité sert de point de départ aux travaux de Schrödinger qui, à la demande de Paul Langevin (1872-1938), a eu à examiner le projet de thèse de de Broglie. En 1926, Schrödinger, qui, nous l'avons vu, était très critique vis-à-vis des sauts quantiques de Bohr, établit sur des bases mathématiques rigoureuses le formalisme de la mécanique ondulatoire (figure 2). On peut lire, dans le début de son mémoire, l'ambition et la signification de sa contribution : « Dans cette communication, je voudrais montrer tout d'abord, sur l'exemple le plus simple possible d'un atome d'hydrogène (sans relativité ni perturbation), que les règles habituelles de quantification peuvent être remplacées par une autre condition, dans laquelle il n'est plus question de "nombres entiers". Ces nombres entiers s'introduisent de la même manière naturelle que le nombre entier des nœuds d'une corde vibrante. Cette nouvelle



Figure 2 - Les créateurs des «mécaniques ondulatoires».

conception est susceptible de généralisation étendue et je crois qu'elle touche de très près la véritable essence des conditions des quanta » [11]. C'est dans cet article qu'apparaît la célèbre équation dite de Schrödinger $\{\Delta\Psi + (8\pi^2m) / h^2 [E-V] \Psi = 0\}$, dans laquelle Δ est l'opérateur laplacien, Ψ la fonction d'onde électronique, E l'énergie totale d'une particule et V son énergie potentielle. Cette équation aux dérivées partielles linéaires du second ordre n'admet de solutions que pour certaines valeurs de E , les «valeurs propres» qui représentent les énergies permises pour l'électron. À chaque valeur de E correspond une ou plusieurs «fonctions propres» décrivant le corpuscule dans cet état énergétique. Pour Schrödinger, «La chose qu'on a toujours nommée particule et qui est encore par la force de l'habitude appelée d'un nom de ce genre, n'est, quoi qu'elle puisse être, certainement pas une entité individuellement identifiable... » ; et il ajoute : «On doit bien entendu abandonner l'idée de l'électron (par exemple) en tant que petit morceau de quelque chose se mouvant à l'intérieur du train d'onde, le long d'une mystérieuse trajectoire inconnaissable » ([12] in [13], p. 25 et 27).

Dans cette conception, l'électron matériel n'est en somme qu'une apparence. Son énergie est de nature ondulatoire et c'est seulement la localisation de cette énergie dans un espace très petit qui la fait considérer comme une particule.

La mécanique matricielle de Heisenberg

En 1925, Werner Heisenberg (1901-1976), élève de Sommerfeld à Munich puis doctorant de Max Born (1882-1870) à Göttingen, utilise une mécanique matricielle de son invention (obscur à plaisir confiera Einstein) pour décrire les états de l'électron. La non-commutation de ces matrices, ces nouveaux opérateurs représentatifs des grandeurs physiques, introduit en 1927 la relation d'incertitude $\Delta q \Delta p \geq h/2\pi$ (2). Le principe d'incertitude énonce qu'il y a une limite intrinsèque à la précision simultanée de deux variables conjuguées, telles que la position et la vitesse d'une particule en mouvement. Plus la mesure de la position est précise, moins celle de la vitesse l'est et vice versa. Cette imprécision n'est pas le fait de l'expérimentateur, mais une conséquence des équations de la mécanique quantique. Le principe d'incertitude est une limitation fondamentale et incontournable à la connaissance du monde. Bien plus, il n'y a plus de causalité absolue. Ceci a contribué à ce que l'on a appelé «l'interprétation de Copenhague de la mécanique quantique» (ou mécanique des

matrices). Selon Heisenberg, Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984), Ernst Pascual Jordan (1902-1980) et Max Born qui collaborèrent avec Bohr, une théorie physique doit introduire uniquement des grandeurs dont la valeur peut être directement observée et éviter toute représentation dont certains éléments seraient inaccessibles à l'expérience. On est donc en présence d'un pur formalisme rejetant toute image du monde microphysique, mais susceptible de rendre compte de tous les phénomènes observables à l'échelle atomique, tels que l'existence de sauts quantiques et de discontinuité à l'intérieur des atomes à l'aide de simples calculs algébriques.

L'interprétation probabiliste de Born et le principe de complémentarité

Une interprétation différente est proposée par Born en 1926. Pour lui, le caractère de l'onde demeure purement statistique, susceptible de décrire des probabilités de localisation de l'état de mouvement dans l'espace et le temps. Le principe de Born s'énonce de la façon suivante : «Le carré du module de la fonction d'onde Ψ mesure en chaque point et à chaque instant la probabilité pour que le corpuscule associé soit observé à ce point » [14]. Le corpuscule et l'onde perdent d'un même coup leur réalité. Comme le précise de Broglie : « Dans cette interprétation, il n'y a plus en physique quantique que des lois de probabilité "pure" sans aucun mécanisme causal sous-jacent et ignoré. L'onde de la mécanique ondulatoire n'est plus aucunement une réalité : elle n'est plus qu'une équation aux dérivées partielles du type classique de l'équation des ondes, solution qui se trouve être l'instrument mathématique approprié pour la représentation de la probabilité du résultat de certaines mesures. Le corpuscule lui aussi prend un aspect fantomatique : il n'a plus ni localisation permanente dans l'espace, ni valeur à chaque instant de son énergie et de sa quantité de mouvement, il est en général présent à l'état potentiel dans toute une région étendue de l'espace et réparti statistiquement entre plusieurs états de mouvement ». Et, ajoute de Broglie : « Pour traduire les apparences corpusculaires et ondulatoires si nettement caractérisées dans le cas de la lumière par l'effet photoélectrique d'une part, par les interférences d'autre part, dans le cas des électrons par les trajectoires visibles dans les chambres de Wilson d'une part, la diffraction par les cristaux d'autre part, Bohr introduit la notion de complémentarité : le corpuscule et l'onde seraient complémentaires de la réalité, d'une réalité qui échapperait à toute description plus intelligible » ([8], p. 142).

Le principe de complémentarité, selon lequel «[...] il existe des couples de grandeurs toutes deux nécessaires à la description complète d'un phénomène atomique, mais dont l'observation et la définition précise de l'un exclut l'observation et la définition précise de l'autre», conduit à considérer que «certaines grandeurs ne sont ainsi pas observables simultanément», émerge entre 1925 et 1927. Ce principe est présenté par Bohr lors de son intervention au congrès international de physique de Côme en septembre 1927. Bernadette Bensaude Vincent relève trois idées essentielles qui apparaissent dans ce principe [15] : l'existence de plusieurs descriptions nécessaires d'un même phénomène ; l'idée qu'il existe des couples de descriptions mutuellement exclusives, qui ne peuvent être appliquées simultanément ; l'idée que ni l'une ni l'autre n'est suffisante pour donner une description exhaustive du phénomène en question ; et que par conséquent, une description exhaustive au sens classique est impossible. Il s'agit donc, dans l'esprit de Bohr, d'une complémentarité des possibilités de définition et d'observation.



Bohr et Einstein (1925)



Eisenberg et Bohr (1934)

Figure 3 - Rencontres entre savants aux congrès Solvay.

La confrontation des points de vue : le V^e congrès Solvay

Le 24 octobre 1927 s'ouvre le V^e Conseil de physique Solvay [4, 16], qui a pour thème « Électrons et photons ». De Broglie se rend à Bruxelles pour présenter sa théorie de l'« onde pilote » selon laquelle le corpuscule est entraîné par une loi bien définie par la propagation même de l'onde. De son côté, Schrödinger entend y défendre sa « mécanique ondulatoire » et son hypothèse du « train d'onde ». Enfin, les groupes de Göttingen (Born, Heisenberg...) et de Copenhague (Bohr...) se présentent soudés, avec la ferme intention de faire adopter le « principe de complémentarité ». Ce V^e congrès Solvay est l'occasion de la première discussion approfondie de l'interprétation de Copenhague. Il revêt un indéniable caractère mythique. La ligne de partage entre les partisans et les adversaires de la nouvelle théorie physique est largement dessinée. L'attitude de Born, soutenu par l'équipe de la jeune génération autour de Bohr, est très assurée. On remarque le silence des autres (Schrödinger, Planck...) et (déjà !) l'obstination assez peu loquace d'Einstein. Une seule fois, et en quelques minutes l'illustre savant prend la parole pour rejeter en termes très simples l'interprétation probabiliste : « Laissons un moment l'incertitude et les probabilités de côté... Dieu ne joue pas aux dés, M. Bohr ! »⁽³⁾.

Des discussions animées de l'hôtel Métropole aux promenades de Bohr avec Einstein dans les rues de Bruxelles, « c'est là, dira Langevin, que la confusion des idées atteint son comble » [4]. Cependant, c'est dans ce débat très intense que la complémentarité commence à cristalliser beaucoup de sa force au sein du savoir savant. De Broglie analysera plus tard (en 1947) le comportement des participants et avouera avoir évolué dans ses idées à la suite de ce congrès : « [...] Les discussions sur ce sujet au Conseil Solvay furent assez vives. Lorentz dans un beau discours inaugural avait soutenu et défini avec une grande précision le point de vue de la physique classique. MM. Born, Heisenberg et Bohr affirmaient la nécessité des conceptions en quelque sorte révolutionnaires qu'entraînaient les relations d'incertitude. M. Schrödinger gardait une orientation assez classique, plutôt favorable encore à l'image des corpuscules trains d'ondes. M. Einstein opposait aux idées nouvelles d'Heisenberg d'habiles objections que M. Bohr réfutait par de subtils raisonnements. [...] Rentré à Paris, je me mis à réfléchir

longuement sur les incertitudes d'Heisenberg ». Et il ajoute : « [...] Invité à faire des conférences à l'Université de Hambourg au printemps de 1928, j'y donnais pour la première fois en public mon adhésion formelle aux idées nouvelles » ([17], p. 188-189).

Dans leur *Histoire de l'atome* (1988), P. Radvayi et M. Bordry soulignent : « Il fallut de longues discussions entre Bohr et Heisenberg, avec la participation de Klein et de Pauli, pour arriver à la conclusion que le principe d'incertitude, qui constitue une relation de limitation réciproque, est un cas particulier du principe général de complémentarité : position et vitesse étaient complémentaires ; de même étaient complémentaires ondes et corpuscules » ([18], p. 103).

Le V^e congrès Solvay n'est pas un aboutissement. Il se présente au contraire comme un moment essentiel d'une « révolution des esprits » (figure 3) qui suscite inévitablement des polémiques pouvant s'exprimer parfois très durement. En démontrant « le lien intime, extrêmement serré » entre la mécanique quantique matricielle de Heisenberg-Born-Jordan et sa propre mécanique ondulatoire, Schrödinger « menace » sans doute la structure même de l'interprétation de l'école de Copenhague. « Les auteurs (de la mécanique de Heisenberg), dit Schrödinger, appellent eux-mêmes leur théorie "la vraie théorie du discontinu". Par contre, la mécanique ondulatoire marque un progrès par rapport à la mécanique classique, en une direction exactement opposée, c'est à dire une théorie du continu » ([19], p. 45), ce continu que les physiciens ont tant de mal à abandonner.

Indéterminisme et causalité

Les interprétations de la mécanique quantique par l'école de Copenhague ont aussi été contestées, dès leur origine, par certains physiciens (et non des moindres ! Einstein est le plus célèbre) car ils ne veulent pas abandonner le principe de causalité et ils s'élèvent contre l'interprétation probabiliste de Born ; cette description ne donne pas, selon Einstein, une description complète de la réalité. C'est aussi l'avis de Schrödinger qui est très insatisfait par cette théorie non intuitive et qui conteste le principe de complémentarité. Suivant Schrödinger (1953), « Il a dû être donné à Louis de Broglie le même coup et la même déception qui me furent donnés à moi-même, lorsque nous apprîmes qu'une sorte d'interprétation transcendante, presque psychique, du phénomène ondulatoire avait été mise en avant, qui fut très vite saluée par la majorité des

maîtres théoriciens comme la seule conforme à l'expérience et qui est devenue désormais le dogme orthodoxe, accepté par presque tous » [20].

L'opposition d'Einstein

Celui qui fut, et est resté, l'opposant le plus déterminé à la mécanique quantique de Bohr est Einstein. Voici la description qu'il donne de la physique quantique en 1938 : « *La lumière est-elle une onde ou une pluie de photons ? Un rayon d'électrons est-il une pluie de particules élémentaires ou une onde ? Ces questions fondamentales sont imposées à la physique par l'expérience. En cherchant à y donner une réponse nous devons renoncer à décrire les événements atomiques comme se passant dans l'espace et le temps, nous devons nous éloigner encore davantage de l'ancienne conception mécanique. La physique quantique formule des lois qui régissent des foules et non des individus. Ce ne sont pas des propriétés, mais des probabilités qui sont décrites : elle ne formule pas des lois qui dévoilent l'avenir des systèmes, mais des lois qui régissent les changements des probabilités dans le temps et se rapportant à de grands ensembles d'individus* » ([21], p. 277). C'est l'aspect indéterministe de cette théorie à caractère essentiellement statistique, c'est le fait qu'il est fondamentalement impossible de connaître tous les paramètres nécessaires à une détermination complète des processus, qu'Einstein ne veut pas admettre. Pour lui, l'état réel d'un système doit pouvoir être décrit par une théorie physique. En 1953, il écrit : « *Ce que je trouve de non satisfaisant dans la théorie se situe ailleurs, dans l'interprétation que l'on donne de la fonction Ψ . En tout cas, ceci est à l'origine de ma conception d'une thèse qui se trouve catégoriquement rejetée par les plus grands théoriciens actuels. Il y a quelque chose comme l'état réel d'un système physique qui existe objectivement, indépendamment de toute observation ou mesure, et qui peut en principe se décrire par les moyens d'expression de la physique* » ([22], p. 7).

Pour Bohr, au contraire, la conception classique d'une réalité physique indépendante de toute observation n'a pas de sens : « *Notre tâche n'est pas de découvrir l'essence des choses, dont nous ignorons de toute manière le sens, mais uniquement de développer des concepts qui nous permettent de parler des phénomènes de la nature d'une façon productive* »⁽⁴⁾. Dans cette citation, le mot phénomène se réfère naturellement à la définition qu'il en donne lui-même et qui englobe d'une façon indissociable l'objet d'étude et les moyens utilisés pour cette étude ; il y a dans le « monde atomique » perturbation de l'objet d'étude par l'observateur, mais nous ne disposons que des relevés des appareils d'observation.

Heisenberg, qui a été un participant actif au débat, fait bien ressortir (1972) la difficulté, on pourrait dire l'obstacle (qui peut être qualifié de déterministe) qu'Einstein n'arrivait pas à franchir : « *Je réalisais à quel point il est difficile pour un physicien d'abandonner les idées qui ont jusque-là constitué la base de sa pensée et son travail scientifique. Pour Einstein, l'œuvre de sa vie avait consisté à analyser ce monde objectif des phénomènes physiques qui se déroulent dans le temps et l'espace, indépendamment de nous, selon des lois fixes. Pour lui, les symboles mathématiques de la physique théorique devaient reproduire ce monde objectif et, par conséquent, rendre possibles des prédictions concernant son comportement futur. Et maintenant, on venait lui affirmer qu'au niveau des atomes un tel monde objectif, dans l'espace et dans le temps, n'existait pas, et que les symboles mathématiques de la physique théorique ne pouvaient reproduire à ce niveau, que le possible et non le réel. Einstein n'était pas*

prêt à accepter qu'on lui enlevât - c'est ce qu'il devait ressentir - le sol sous les pieds » ([23], p. 146).

Avec la mécanique quantique, les atomes (les corpuscules) n'ont pas seulement perdu toutes leurs qualités concrètes pour se réduire à des structures mathématiques ; ils ont également perdu leur identité et sont devenus indiscernables. Le point de vue des anti-atomistes, Ostwald et Duhem, pour qui la physique doit abandonner les images et travailler sur des fonctions mathématiques, triomphe. C'est l'énergie qui devient la grandeur physique fondamentale, reléguant au second plan la nature matérielle de l'électron. Citons à ce propos Heisenberg (1961) : « [...] *Les particules élémentaires en physique moderne ont une masse, au même sens limité dans lequel elles ont d'autres propriétés. Etant donné que masse et énergie, d'après la théorie de la relativité, sont essentiellement le même concept, nous pouvons dire que toutes les particules élémentaires consistent en énergie. Cela pourrait s'interpréter en définissant l'énergie comme la substance primordiale du monde. Elle a en vérité la propriété essentielle qui appartient au mot substance, à savoir qu'elle se conserve* » ([26], p. 66).

[1] Pour plus d'informations, voir [25], p. 127-129, et [26], p. 196-198.

[2] Δq : incertitude sur la position d'une entité ; Δp : incertitude sur la quantité de mouvement.

[3] Cité par C. D'Outremont et M. Solvay (voir [4, 16]).

[4] Cité par [10], p. 370.

[1] A. Dumon, De l'atome particule à l'atome polycorpusculaire, *L'Act. Chim.*, **2022**, 473-474, p. 98-103.

[2] N. Bohr, On the spectrum of hydrogen, Manuscrit adressé à la Société Physique de Copenhague le 20 déc. **1913** ; *Fysisk Tidsskrift*, **12**, p. 97 (webservice.lemoyne.edu/giunta/bohr.html) ; On the structure of atoms and molecules, *Philosophical Magazine*, juil. **1913**, série 6, 26, p. 1-25.

[3] Lettre du 29 avril 1924, in *Correspondance Einstein - Born*, Le Seuil, Paris, **1972**. Cité par [4].

[4] *Les conseils Solvay et les débuts de la physique moderne*, P. Marage, G. Wallenborn (eds), Université libre de Bruxelles, **1995**.

[5] N. Bohr, Atomic structure, *Nature*, **1921**, p. 208-209 (Chemteam.info). Voir également Bohr, The structure of the atom, *Nobel Lecture*, 11 déc. **1922**, (Nobel Foundation).

[6] E.C. Stoner, The distribution of electrons among atomic levels, *Philosophical Magazine*, **1924**, 6^e série, 48, p. 719-736 (chemteam.info).

[7] W.E. Pauli, On the connexion between the completion of electron groups in an atom with the complex structure of spectra, *Zeitschrift für Physik*, **1925**, 765, p. 31 (chemteam.info).

[8] L. de Broglie, La physique atomique et quantique contemporaine, in *Histoire générale des sciences*, R. Taton (dir.), t. 3, vol. 2, Presses Universitaires de France, **1964**.

[9] L. de Broglie, *La physique nouvelle et les quantas*, Flammarion, Paris, **1937**.

[10] B. Pullman, *L'atome dans l'histoire de la pensée humaine*, Fayard, Paris, **1995**.

[11] E. Schrödinger, Quantisierung als Eigenwertproblem, *Annalen der Physik*, **1926**, 79, p. 489-528, et 80, p. 437-491 (Gallica) ; cité par Pullman, p. 339.

[12] E. Schrödinger, La signification de la mécanique ondulatoire, in [13].

[13] *Louis de Broglie, physicien et penseur*, A. Georges (dir.), Albin Michel, **1953**.

[14] M. Born, Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge, *Zeitschrift für Physik*, **1926**, 37, p. 863-867, et 38, p. 803-827 ; cité par B. Vidal, *La liaison chimique : le concept et son histoire*, Vrin, Paris, **1989**, p. 91.

[15] B. Bensaude Vincent, L'évolution de la complémentarité dans les textes de Bohr (1927-1939), *Revue d'histoire des sciences*, **1985**, t. 38, n° 3-4, p. 231-250 (Persée).

[16] Institut international de physique Solvay, *Electrons and photons : rapports et discussions du cinquième Conseil de physique tenu à Bruxelles du 24 au 29 octobre 1927*, Gauthier-Villars, Paris, **1928** (digithèque ULB) ; B. Diu, *Le congrès Solvay de 1927 : petite chronique d'un grand événement*, Bibnum, **2009** (en ligne) ; C. D'Outremont, M. Solvay, *Fantaisies quantiques*, Éditions Saint-Simon, Paris, **2020**.

[17] L. de Broglie, *Physique et microphysique*, Albin Michel, **1947**.

[18] P. Radvai, M. Bordry, *Histoire de l'atome*, Belin, **1988**.

[19] E. Schrödinger, On the relation between the quantum mechanics of Heisenberg, Born and Jordan, and that of Schrödinger, *Annalen der Physik*, **1926**, 79(4), in *Schrödinger collected papers*, **1908**, p. 45 (archive.org).

[20] E. Schrödinger, La signification de la mécanique ondulatoire, **1953**, in [13].

[21] A. Einstein, L. Infeld, *L'évolution des idées en physique*, Flammarion, **1983**.

[22] A. Einstein, Remarques préliminaires sur les concepts fondamentaux, **1953**, in [13].

[23] W. Heisenberg, *La partie et le tout. Le monde de la physique atomique (souvenirs 1920-1965)*, Flammarion, **1972**.

[24] W. Heisenberg, *Physique et philosophie*, Albin Michel, **1961**.

[25] B. Fernandez, *De l'atome au noyau*, Ellipses, Paris, **2006**.

[26] C. Gruber, P.-A. Martin, *De l'atome antique à l'atome quantique*, Presses polytechniques et universitaires romandes, **2013**.

Alain DUMON,
Professeur émérite, ESPE d'Aquitaine.

* alain.dumon@neuf.fr