

LA DICHOTOMIE ONDE-CORPUSCULE ET LE PASSAGE DE LA PHYSIQUE CLASSIQUE À LA PHYSIQUE QUANTIQUE¹ : LE BOULEVERSEMENT THÉORIQUE DE L'HYPOTHÈSE DES QUANTA

Mamane DAN IRO TANIMOUNE
Université Abdou Moumouni de Niamey
E-mail : irotanimoune@yahoo.fr

Résumé : Le présent article vise à analyser de quelle manière la découverte de nouveaux faits expérimentaux incompatibles avec la dichotomie onde-corpuscule a entraîné l'émission d'hypothèses nouvelles qui ont conduit au passage de la physique classique à la physique quantique. Il s'agit notamment du problème du corps noir, de l'effet photoélectrique et du problème de la stabilité du modèle atomique d'Ernst Rutherford face auxquels des physiciens comme Max Planck, Albert Einstein et Niels Bohr ont émis l'hypothèse d'une répartition discontinue des rayonnements de l'énergie, de la lumière et du spectre d'émission et d'absorption de l'énergie au sein de l'atome. Lorsqu'on sait que ces rayonnements sont de nature typiquement et exclusivement continue pour la physique classique, des telles hypothèses ne peuvent qu'engendrer des bouleversements théoriques sans précédent dans l'histoire des sciences.

Mots-clés : dichotomie, onde, corpuscule, quanta, continu, discontinu, physique classique, physique quantique.

Introduction

L'avènement de la physique quantique constitue l'une des plus grandes révolutions scientifiques, sinon la plus grande, de l'histoire des sciences. Cela se justifie d'abord par l'envergure des théories physiques

¹ On a préféré pendant longtemps le terme de mécanique quantique à celui de physique quantique. Mais il convient de souligner avec Etienne Klein que « ce terme ne seyait guère à une théorie qui n'a plus rien à voir avec les machines à l'origine de la physique classique. En outre, son formalisme représente les objets physiques d'une façon si inhabituelle que les notions mêmes d'objet et de trajectoire y deviennent problématiques. Mieux vaut donc parler de *physique* quantique » (E. Klein, 2004, p. 13). En effet, c'est la notion de mouvement et subséquemment ses caractéristiques essentielles telles que la position initiale, la position à tout instant qu'on appelle trajectoire, la vitesse et la localisation ponctuelle dans l'espace qui fondent la spécificité de la mécanique. Et dans ces conditions, il n'est plus question de cette appellation dès l'électromagnétisme de Maxwell, *a fortiori* en théorie quantique, où l'existence de ces caractéristiques est fortement éprouvée.

qu'elle détrône, à savoir la mécanique newtonienne et l'électromagnétisme de Maxwell qui sont apparues comme étant le prototype même de sciences et le seuil indépassable dans le cadre desquelles tous les phénomènes physiques sont effectivement pris en charge jusqu'à la fin du XIX^e siècle. Ensuite par le fait qu'elle bouscule les exigences élémentaires de la rationalité scientifique qu'on pensait être l'identité même de la science. Il s'agit notamment du déterminisme, de l'objectivité, et même du réalisme, que d'aucuns comme Einstein considèrent comme étant « l'âme de la physique » (Kumar, 2012, p. 9). Pis encore, la physique quantique défie le bon sens et conduit à des implications si bouleversantes et ahurissantes, situées « au-delà » de la physique, au point où l'on ne sait même plus s'il s'agit bien de physique ou de métaphysique. Certains physiciens célèbres iront d'ailleurs jusqu'à parler de « métaphysique expérimentale », influençant de ce fait, d'autres historiens de la physique comme Ortolí et Pharo (2011) qui n'ont pas trouvé de meilleur titre à leur dernier ouvrage que celui de *Métaphysique quantique*. Sans enfin parler de ses applications techniques fécondes et florissantes qui ont façonné notre monde quotidien, de l'électronique aux transistors, de la bombe atomique au nucléaire en général, des lasers à la cryptographie quantique, en passant par le microscope électronique, les ordinateurs quantiques et les transformations profondes qu'elle induit en spectroscopie, en chimie, en biologie et en médecine, par exemple.

Dans le présent texte, il s'agit d'analyser les conditions d'émergence de cette physique, en mettant en exergue de quelle manière son avènement s'est imposé de l'intérieur même à la physique classique. Puisque comme le note Louis de Broglie, c'est sous la pression des faits expérimentaux que les physiciens ont été contraints d'abandonner certains principes sacro-saints de la physique de la fin du XIX^e siècle, dont en premier lieu celui de la dichotomie onde-corpuscule. En effet, ce processus d'élaboration de la physique quantique se comprend à partir de l'impossibilité d'expliquer certains phénomènes tels que le problème du rayonnement du corps noir, l'effet photoélectrique, et le problème de la stabilité de l'atome de Rutherford qui ont conduit des savants comme Planck, Einstein et Bohr à émettre des hypothèses hardies et insoutenables dans les cadres de la physique classique. Ce bouleversement est d'autant plus surprenant,

lorsqu'on sait qu'il intervient dans un contexte où les physiciens étaient unanimement d'accord sur le fait qu'il n'y a plus rien de nouveau à découvrir dans le ciel serein de leur discipline. Puisque tous estimaient que tout a été dit dans les cadres de la mécanique newtonienne et de l'électromagnétisme de Maxwell et subséquemment de la légendaire dichotomie onde-corpuscule.

En quoi consistent alors cette dichotomie onde-corpuscule et les sentiments d'achèvement de la physique qu'elle induit ? Dans quel sens se comprend l'hypothèse des quanta de Max Planck et quelles en sont les implications théoriques ? En quoi consistent l'hypothèse de grains de lumière d'Albert Einstein et l'idée de quantification de l'énergie de l'atome chez Niels Bohr ? En un mot, en quoi l'hypothèse des quanta est-elle incompatible avec la dichotomie onde-corpuscule au point d'entraîner un bouleversement théorique dans le bel édifice de la physique classique ?

1. La dichotomie onde-corpuscule et les sentiments d'achèvement de la physique : Épilogue d'un long développement et prologue d'une nouvelle époque insondable

1.1. La dichotomie onde-corpuscule comme socle de la physique classique

L'évolution des théories physiques est marquée par une bipolarisation ou encore une bipartition à la fin du XIX^e siècle, à la suite d'une longue lutte acharnée entre mécanique newtonienne et électromagnétisme de James Clerk Maxwell. La mécanique newtonienne explique les phénomènes physiques allant des mouvements des corps à notre échelle aux mouvements des corps célestes en se fondant sur la notion de corpuscule. C'est une théorie corpusculaire en ce sens qu'elle conçoit tout mouvement comme interaction entre particules ou petits corps qui s'attirent en raison directement proportionnelle de leur masse et inversement proportionnelle de la distance qui les sépare. Et si l'on admet l'universalité de la théorie de la gravitation universelle, une telle conception n'épargne aucun objet de l'univers, puisqu'elle postule que tous les corps gravitent mutuellement les uns autour des autres dans les limites de cette proportion :

$$F = G \frac{m \times m'}{r^2}$$

F étant la force d'interaction ; G , une constante universelle, m et m' représentant les masses des deux corps en interaction et r la distance qui les sépare (Maitte, 2015, p. 176).

On comprend dès lors pourquoi l'apparition des phénomènes de la chaleur, et surtout de la lumière, de l'électricité et du magnétisme ont entraîné une longue lutte séculaire entre d'une part, des savants comme Young, Fresnel, Faraday, Maxwell, Mach, Ostwald, et Rankine qui prônent une remise en cause de l'universalité de la mécanique, voire même son dépassement et d'autre part la communauté scientifique majoritairement acquise à la cause de Newton. C'est précisément dans ces conditions que l'électromagnétisme s'est imposé- et on voit bien qu'il ne s'agit pas du tout d'une promenade de santé dans ce combat-, comme seconde théorie physique du XIX^e siècle. Quant à la thermodynamique, elle peut être considérée comme une science intermédiaire entre mécanique et électromagnétisme (Lecourt, 2006, p. 290).

Ainsi donc, cette évolution des théories physiques débouche sur deux conceptions différentes. Puisqu'à l'inverse du paradigme newtonien, l'électromagnétisme explique d'autres phénomènes physiques tels que la lumière, l'électricité, le magnétisme, les ondes radio, les rayons x et la radioactivité en se basant sur le concept d'onde ou de champ électromagnétique. La physique de la fin du XIX^e siècle est essentiellement fondée sur ces deux paradigmes qui servent à expliquer l'ensemble des phénomènes physiques. Ortolini et Pharabod (2007, p. 20) écrivent, à ce propos :

À la fin du siècle dernier, donc, la quasi-totalité des phénomènes relevait de deux types d'explications : soit de la théorie de l'électromagnétisme de Maxwell qui rendait compte des effets magnétiques, des interférences lumineuses, etc. ; soit de la théorie de l'attraction universelle de Newton, base de la mécanique, et plus particulièrement de l'astronomie. Après s'être affrontées, ces deux théories s'étaient finalement partagées les divers domaines de la physique en créant les notions fondamentales d'ondes et de corpuscules.

Cela signifie que toute l'évolution des idées en physique moderne de Galilée à Newton et de Huygens à Maxwell, en passant par Kepler, Descartes, Gassendi, Laplace, Euler, Lagrange, Boltzmann, Ostwald, Young, Fresnel, Coulomb et Faraday trouve son épilogue dans ce « bicéphalisme » qui se matérialise par une ligne de démarcation rigide et

infranchissable entre paradigmes ondulatoires et corpusculaires. Cette différence est si irréductible qu'elle se présente sous forme d'antagonisme, voire même de dichotomie, pour utiliser le terme consacré. C'est ce qui fait dire à Bachelard (2002, p. 95) qu'« Ainsi les deux images corpuscules et ondes n'arrivent pas vraiment à se rejoindre. Elles ne sont claires que si elles sont isolées (...) L'intuition du corpuscule et de ses mouvements a donné la mécanique, l'intuition de l'onde et de sa propagation a donné l'optique physique ».

Pour se faire une petite idée de l'ampleur d'un tel rapport d'exclusion qui est parfaitement conforme aux principes de la logique aristotélicienne, il convient de souligner à propos du corpuscule qu'« Il s'agit d'une idéalité, d'un objet théorique abstrait de l'observation d'objets concrets – cailloux, grains de sable, planètes vues de loin. Le point matériel est un objet sans étendue, mais doté de masse » (Balibar, Lévy-Leblond et Lehoucq, 2014, p. 69). Il est donc à la fois un objet géométrique et physique, puisqu'en fait, il est issu des notions de substance réintroduite par Galilée et de celles de qualités premières systématisées par John Locke qui le fondent et le définissent de bout en bout (Lecourt, 2006, p. 723). En outre, le corpuscule évoque l'image d'un petit corps discret ou d'une bille qui est précisément localisée dans un endroit de l'espace et dont les trajectoires sont bien définies. Comme le note si bien Jean Marc Lévy-Leblond, ce concept de point matériel s'est révélé extrêmement fécond dans toute la mécanique classique, en ce sens qu'il permet notamment de décrire le mouvement de tout objet terrestre et céleste en liaison étroite avec le déterminisme tel qu'il est systématisé par Laplace.

Aux antipodes des corpuscules, les ondes n'ont pas de localisation précise et encore moins de trajectoires, pas plus que n'en a « la houle de l'atlantique venant frapper nos côtes » (Klein, 1996, p. 14). Elles évoluent ou plus précisément se répandent dans tout l'espace. C'est pourquoi « on parle donc de « propagation » plutôt que de « mouvement » (Balibar, Lévy-Leblond et Lehoucq, 2014, p. 74). En fait, l'image typique d'une onde est celle de la propagation des vagues qui ondulent à travers des crêtes et des creux au bord des plages.

Une autre différence encore plus frappante est celle liée au fait que deux ondes de même nature peuvent se superposer lorsqu'elles se

rencontrent pour soit s'annuler, soit s'additionner pour donner une seule onde. On voit donc qu'ici, c'est soit $1+1 = 0$, soit $1+1 = 1$. C'est ce qui fait dire à D'Espagnat et Klein (1993, p. 33) que la lumière, et cela est valable pour toutes les ondes, « interprète d'une bien curieuse manière le signe *plus* de l'arithmétique ». Alors que deux corpuscules (qu'on peut illustrer par deux cailloux, par exemple) ne peuvent pas s'interpénétrer ou se superposer. Les corpuscules sont également discontinus, tant du point de vue de leur quantité (on peut les compter en nombres entiers) que de leur spatialité (ils sont comme les grains de sable). Tandis que les ondes sont continues, tant du point de vue de leur quantité (on ne peut pas les compter et elles peuvent prendre n'importe quelle valeur) que du point de vue de leur spatialité (on a vu qu'elles occupent tout l'espace). On parle également de champ, surtout avec l'émancipation des ondes de leur hypothétique substrat matériel qu'est le fameux éther.

Telle est donc en substance la véritable nature de cette dichotomie onde-corpuscule. Il convient de noter avec Jean Marc Lévy-Leblond que « La physique classique est entièrement fondée sur ces deux notions, corpuscules et champs. Si les premiers représentent les éléments de la matière, les seconds servent de médiateurs à leurs interactions » (Balibar, Lévy-Leblond et Lehoucq, 2014, p. 72). C'est dans ce sens que l'on parle de mouvement de la matière pour les corpuscules et de mouvement dans la matière pour le champ. Puisque dans la propagation du champ qui ne transmet que de l'énergie, il n'y a pas de substrat matériel. Il en résulte alors une remise en cause des notions de substance et de qualités premières qui ont été pendant longtemps considérées comme l'essence même de la conception de la matière.

Or cette irréductibilité de l'opposition entre les deux concepts est précisément le problème fondamental à partir duquel est née la difficulté insurmontable dans le cadre de la physique classique. À propos de cette difficulté, Ortolí et Pharabod (2007, p. 23) écrivent : « Bien assise sur cette dichotomie, la physique dite « classique » (par opposition à ce qui deviendra la physique « quantique ») fonctionnait à la satisfaction générale, à quelques rares détails près. Or, c'est justement un de ces détails qui allait provoquer la première fissure dans le bel édifice de la physique traditionnelle ». Cette fissure est d'autant plus inattendue lorsqu'on sait que pour bon nombre de

physiciens, il n'y aura plus rien de nouveau qui ne soit inexplicable dans les cadres des paradigmes existants. En effet, ils estiment, dans leur grande majorité, que la physique est définitivement close.

1.2. Les sentiments d'achèvement de la physique : une physique des décimales ?

Pour la plupart des physiciens de la fin du XIX^e siècle, la physique est définitivement achevée dans ses grandes lignes dans le cadre de ces deux théories qui constituent les meilleures synthèses des phénomènes physiques que l'histoire des sciences n'ait jamais connues. Pratiquement, tous considéraient les problèmes non encore résolus comme des détails insignifiants qui n'allaient pas tarder à être réglés. Pour William Thomson, alias Lord Kelvin, qui ne faisait que refléter cette opinion, il est certes déplorable que « La beauté et la clarté de la théorie » fussent assombries par « deux nuages » (cité par Baker, 2015, p. 43). Mais il estime que ces deux gros nuages qui planent dans le ciel serein de la physique classique n'entament en rien leur confiance. Paraphrasant Lord Kelvin, Albert Michelson estime que « Tout ce qu'il nous reste est de compléter son calcul jusqu'à la 6^e place après la virgule » (cité par McEvoy et Zarate, 2014, p. 7). La physique est donc complète à quelques décimales près (soit 0,12345...).

Et pourtant, l'existence de ces « deux points noirs », les polémiques lancinantes sur la sempiternelle question de l'existence ou de l'inexistence des atomes, et la floraison des nouvelles découvertes telles que celle de l'électron, des rayons x, de la radioactivité, de plusieurs dizaines nouveaux éléments chimiques contrastent d'avec ce sentiment d'achèvement de la physique. En effet, contrairement à ce que pensaient les physiciens, les solutions à ces problèmes n'allaient être trouvées que sur les ruines de la physique classique. Puisque les résultats négatifs de l'expérience de Michelson et Morley relative à l'invariance de la vitesse de la lumière conduisent Albert Einstein à la théorie de la relativité restreinte en 1905. Quant au problème du corps noir, il conduit Max Planck à poser les jalons de ce qui sera appelé physique quantique.

2. Le problème du corps noir et l'hypothèse des quanta : le drame de l'identité des contraires

2.1. Le rayonnement du corps noir et les échecs des différentes tentatives d'explication dans les cadres de la physique classique

Tout objet métallique chauffé, par exemple une barre de fer, absorbe non seulement de l'énergie, mais aussi en restitue une partie sous forme de rayonnement électromagnétique. Comme le montrent si bien Ortoli et Pharabod (2007, p. 23), les physiciens remarquent que sa longueur d'onde, c'est-à-dire sa couleur, varie en fonction de sa température. Selon Bernard Maitte (2015, p. 328-329), elle passe respectivement de l'infrarouge où elle est invisible à l'œil nu (aux basses températures), au rouge (autour de 700°C), avant de « devenir rouge vif, orange, puis jaune, blanche vers 3000°C, bleu pâle enfin. Lorsque le fer est porté à une température de 6000°C, nous ne percevons plus de lumière ». À cette température extrême, c'est l'ultraviolet, également invisible, qui domine. C'est « La détermination précise de ces propriétés thermophysiques des radiations électromagnétiques » que permet de réaliser l'appareil de laboratoire appelé « corps noir » (idem).

Disons que le terme « corps noir » a été introduit par Kirchhoff en 1862. Il s'agit d'un instrument de laboratoire, une petite boîte métallique hermétiquement fermée, à l'exception d'un petit orifice. Le comportement de la porte d'un four est, par exemple, parfaitement identique à celle du corps noir. Sa fonction consiste à reproduire les conditions expérimentales de la distribution de l'énergie sur un corps chauffé qui est impossible à réaliser « lorsqu'on se contente de regarder un métal chauffé à l'air libre » (Lecourt, 2006, p. 290). Selon Manjit Kumar (2012, p. 15-16), le problème que pose ce corps noir est le suivant : « quelle était la relation entre la température, la gamme des couleurs et l'intensité de la lumière émise par un tisonnier brûlant » ? On le voit bien, ce problème semble insignifiant par rapport aux mystères des rayons x et de la radioactivité. Et si son étude a préoccupé les physiciens, Kumar soutient que c'est parce qu'il revêt un intérêt pratique pour l'industrie de l'éclairage allemand.

Balibar (Lecourt, 2006, p. 289-290) estime qu'au contraire, l'intérêt que présente son étude est d'ordre purement spéculatif, puisqu'il s'agit pour les physiciens d'établir des liens entre électromagnétisme et thermodynamique. Dans la même optique, Jean-Claude Boudenot et Gilles

Cohen-Tanoudji (2001, p. 29) soutiennent que l'une des raisons essentielles qui poussent Max Planck à étudier le corps noir est celle de savoir « comment interpréter l'irréversibilité de phénomènes macroscopiques à partir de lois microscopiques réversibles ? Planck pensait que l'origine de cette irréversibilité est liée à l'interaction de la matière avec le rayonnement ». Ils estiment l'objectif qu'il poursuit est la construction d'« une démonstration du second principe sur des bases mécaniques et non statistiques ».

C'est donc dans cette interaction entre matière et lumière que se pose l'aporie fondamentale qui fait éclater la physique classique de l'intérieur même, c'est-à-dire du propre point de vue de ses principes sacro-saints. Car si l'on s'en tient à la clé de répartition des compétences propre à la physique classique, le rayonnement de l'énergie devrait se répartir de façon continue, c'est-à-dire conformément à la théorie électromagnétique de Maxwell. C'est dans une telle perspective qu'une première loi est formulée par Wilhelm Wien selon laquelle « la longueur d'onde de la lumière dont la puissance dans le rayonnement émis par un corps noir est la plus grande est inversement proportionnelle à la température. On a d'abord l'infrarouge, puis le rouge, etc., jusqu'à l'ultraviolet et au-delà ». Lord John Rayleigh complète cette loi en disant que « le rayonnement thermique est d'autant plus intense que la longueur d'onde est plus courte » (Ortoli et Pharabod, 2007, p. 23).

Mais ainsi que le montrent Baneh Hoffman et Michel Paty (1975, p. 29), le problème qui se pose est notamment le fait que la formule de Wien qui offre une description satisfaisante des basses fréquences n'est pas conforme à l'expérience pour les hautes fréquences. Tandis que celle de Rayleigh qui décrit les hautes fréquences est inadéquate aux basses fréquences. Nous avons donc « Deux formules, chacune bonne à moitié seulement ». En tout état de cause, l'expérience est en contradiction flagrante avec la théorie du rayonnement du corps noir, puisqu'elle prévoit des valeurs infinies pour les très courtes longueurs d'onde, c'est-à-dire les hautes fréquences ou encore les hautes températures. Le physicien autrichien Paul Ehrenfest désigne ce premier grand déboire de la physique classique par le terme « catastrophe ultraviolette ». Pour Ortoli et Pharabod (2007, p. 24), « le terme est certes outrancier, mais il signifie

clairement que, pour la première, l'un des articles de foi de la physique classique, à savoir la théorie du rayonnement, est pris en flagrant délit d'erreur ». C'est dans ces conditions qu'après plusieurs vaines tentatives, Planck émet une bien curieuse hypothèse.

2.2. Planck et l'hypothèse des quanta : un révolutionnaire malgré lui ?

L'hypothèse émise par Planck pour mettre la théorie en accord avec l'expérience est pour le moins ahurissante. Puisqu'il suppose que le rayonnement électromagnétique de l'énergie ne peut se répartir que de façon discrète ou discontinue, selon certaines proportions bien précises. Par exemple, « Si E représente l'énergie d'une vibration et ν sa fréquence... il existe une certaine constante h telle que E/ν est toujours h , ou deux fois h , ou trois fois h , ou un autre multiple entier de h . Il ne se produit pas de vibration pour d'autres quantités d'énergie » (Ortoli et Pharabod, 2007, p. 24-25).

En d'autres termes, chaque vibration de l'énergie est directement proportionnelle à sa fréquence ν et à h , selon la nouvelle formule introduite par Planck : $E = h\nu$, h étant la nouvelle constante appelée depuis lors constante de Planck. Il faut dire qu'en réalité, c'est elle qui constitue la pierre angulaire de son travail. La valeur très minime qu'il lui a attribuée, n'est pas qualitativement différente de celle retenue aujourd'hui encore par les physiciens : $6,55 \times 10^{-27} \text{ erg.s}$ contre $6,62 \times 10^{-34} \text{ erg.s}$. Comme le notent Mcevoy et Zarate (2014, p. 42), certes, « ce nombre est petit » puisque ça donne $h = 0,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,006\,626$, « mais ce n'est pas zéro ! Sinon nous ne pourrions jamais nous installer devant un feu. En réalité, c'est tout l'univers qui serait différent. Soyons reconnaissants pour les petites choses ».

C'est précisément parce que cette constante est si infime qu'elle a causé tant de problèmes et que les physiciens ont eu tant de peine à déceler sa présence dans leurs investigations des phénomènes de la nature. Mais comme le souligne si bien Gribbin (2009, p. 62), l'aspect surprenant par rapport à h est plutôt lié aux « unités qui servent à la mesurer, l'énergie (erg) multipliée par le temps (secondes). Des telles unités sont appelées « actions », et n'étaient pas des caractéristiques courantes de la mécanique classique ».

En effet, les lois de conservation connues à l'époque étaient principalement celle de la masse et de l'énergie, mais on ne connaissait même pas le concept d'« action », *a fortiori* une loi de sa conservation. Toutefois, selon l'auteur du *Chat de Schrödinger*, une telle unité de mesure a des caractéristiques singulièrement importantes, en l'occurrence dans ses liens avec l'entropie. Le sens profond qu'elle a n'a aucune place en physique classique puisqu'« Il s'agit d'une constante quadridimensionnelle, dont la signification ne devint apparente que lorsqu'Einstein eût publié sa théorie de la relativité »² (Gribbin, 2009, p. 62).

C'est donc seulement en théorie de la relativité qu'on peut parler de loi de conservation de l'action au même titre que l'on parle de loi de conservation de la masse ou de l'énergie en physique classique. On comprend dès lors pourquoi la constante de Planck, découverte près de cinq ans avant la théorie de la relativité, ne pouvait apparaître que comme quelque chose de bizarre et mystérieux.

Au demeurant, l'hypothèse de Planck signifie que le rayonnement ne peut être émis ou absorbé par la matière de façon continue, mais uniquement selon certaines valeurs bien précises qui ne sont autres que des petites quantités ou éléments discrets ou encore paquets d'énergie. Planck baptise chaque élément discret ou paquet individuel d'énergie « *quantum* ». Il s'agit d'un terme latin qui signifie « combien » et dont le pluriel est « *quanta* ». C'est de lui que dérive le mot « quantique », pour ainsi désigner toute théorie physique qui emprunte à Planck l'idée des « *quanta* ». Klein (2004, p. 13) écrit, à ce propos, que « L'adjectif « quantique », d'abord, vient du mot latin *quantum* qui signifie « combien » et que l'on retrouve dans *quantité*. Nous verrons que la physique quantique fait intervenir des quantités élémentaires (ou « discrètes », selon le vocabulaire du physicien) pour décrire les interactions, entre la lumière et la matière, par exemple ».

Ainsi donc, comme le soulignent Ortoli et Pharabod (2007, p. 25), il s'agit d'une

² Il convient de souligner ici que la théorie de la relativité restreinte fait du temps une quatrième dimension de l'espace en plus des trois que lui reconnaissait la physique classique, à savoir la longueur, la largeur et la profondeur. C'est pourquoi on parle plutôt de « continuum espace-temps » chez Einstein.

Hypothèse proprement révolutionnaire, car, pour la première fois, l'idée de discontinuité est introduite dans le domaine du rayonnement, c'est-à-dire des ondes. Pour prendre une image, au lieu de considérer que les échanges d'énergie entre l'objet chauffé et le rayonnement qu'il émet se font de façon continue, à la manière d'un liquide s'écoulant d'un récipient dans un autre, Max Planck imagine qu'ils se font de façon discontinue, par morceau, comme si, en lieu et place de liquide, le récipient verseur contenait des billes. Ces billes, d'ailleurs, ne sont pas toutes de la même taille : à mesure que la fréquence s'élève (de l'infrarouge à l'ultraviolet), elles sont de plus en plus grosses.

Autrement dit, l'hypothèse de Planck revient à affirmer, par exemple, que les vagues se propageraient de façon discontinue à l'image de petits cailloux qu'on lance, alors même que nous savons déjà qu'elles sont de nature continue. D'ailleurs, dans l'esprit des physiciens du début du XX^e siècle qui est formaté par la rigidité de la dichotomie onde-corpuscule, même un liquide comme l'eau peut couler de façon discontinue, puisqu'il « pouvait bien tomber goutte à goutte d'un robinet, mais l'énergie ne s'échangeait pas sous forme de gouttelettes de taille variable » (Kumar, 2012, p. 11). Mais non seulement l'énergie se répartit de façon discontinue, mais en outre cette idée de discontinuité obéit à une certaine mesure précise, comme si par exemple on dit qu'un homme ne peut pas marcher n'importe comment, mais seulement selon des pas d'au moins 20 cm ou 20 cm x n, avec n = un entier naturel quelconque (c'est-à-dire 2, 3, 4, ou 5 fois cette mesure). C'est précisément dans ce sens que l'on parle de quantification, pour signifier le fait que « la segmentation » se fait en fonction de certaines quantités bien précises.

Or il s'agit là d'un tournant décisif qui sème la déperdition et « le désarroi » dans les rangs des physiciens, y compris chez Planck lui-même. Puisqu'en découvrant que la distribution du rayonnement de l'énergie se fait de façon discontinue et non continue, il remet en cause la légendaire dichotomie onde-corpuscule qui constitue le fondement même de cette physique. Le caractère continu de ce rayonnement est, en effet, l'un des piliers essentiels de la physique de l'aube du XX^e siècle. C'est ce qui fait dire à Yoav Ben-Dov (1995, p. 178) qu'il s'agit là d'une contradiction flagrante dans ce qui paraît définitivement achevé. Puisqu'« En d'autres termes, le champ électromagnétique du corps noir se conduit comme s'il était discret,

et non continu. C'était la première indication de la présence d'une contradiction capitale dans les fondements de la physique classique ».

Toutefois, il convient de souligner que, contrairement à ce que l'on pourrait penser, Planck n'était pas du tout conscient de sa découverte. Les quanta d'énergie n'étaient pour lui qu'un simple artifice de calcul, une hypothèse qu'il introduit provisoirement juste pour trouver la bonne formule conforme à l'expérience, ce qui du reste donne l'avantage de surmonter l'obstacle de la catastrophe ultraviolette. Si donc il parvient à régler la contradiction entre les lois classiques de Rayleigh-Wien et l'expérience, il se retrouve avec une loi qui est conforme à cette expérience, mais qui est contradiction flagrante avec la physique classique. Et le véritable drame réside justement dans le fait que cette loi n'a aucune base physique, puisqu'on ne sait plus à quelle théorie la rattacher.

On comprend dès lors pourquoi, en bon physicien classique, Planck a lutté farouchement, la main sur la conscience pourrait-on dire, contre les quanta plusieurs années après les avoir découverts. Son objectif était de sauver les principes « sacro-saints » de la physique classique en éliminant cette hypothèse absurde, tout en conservant ses résultats. Ortolini et Pharabod (2007, p. 25) écrivent, à ce propos, que

De longues années durant, il va tenter de modifier sa théorie pour en conserver le résultat (la suppression de la catastrophe ultraviolette), tout en éliminant les quanta. Finalement, il capitulera, reconnaissant qu'« il est absolument impossible, en dépit des plus grands efforts, de faire rentrer [son] hypothèse dans le cadre d'une théorie classique quelle qu'elle fût ».

Dans son *autobiographie scientifique*, Planck (1993, p. 93) fait cas de toutes ses vaines tentatives de rattacher « le quantum d'action h au cadre de la théorie classique ». Il souligne notamment qu'« à chacun de ses essais », « la constante se révélait encombrante et récalcitrante ». Il était finalement parvenu à la conclusion selon laquelle ce *quantum* d'action annonce l'avènement d'une ère nouvelle en physique.

En particulier depuis le calcul infinitésimal et le *natura non facit saltus* de Leibniz³, les savants étaient unanimes que « la nature ne fait pas de saut » et toute la physique s'est construite sur l'hypothèse d'une nature régie par la continuité. **C'est justement ce qui fait dire à Boudenot et Cohen-**

³ Il s'agit des célèbres propos de Leibniz : « La nature ne fait pas de saut ».

Tannoudji (2001, p. 44) qu'avec cette hypothèse de Planck, « c'est l'essence de la représentation du monde par le calcul différentiel, en un mot toute la physique newtonienne et ses prolongements qui vacilleront ».

À la question de savoir par quel moyen il a pu introduire une chose aussi curieuse que la théorie des quanta, il répondit que « Toute cette affaire peut se résumer en trois mots : un acte de désespoir. Car je me suis éloigné de la nature en toute conscience » (Planck, 1993, p. 93). Planck ajoute que « Pendant six ans, je m'étais battu avec la théorie du corps noir. Je devais trouver une explication théorique à n'importe quel prix, sauf en renonçant au caractère intangible des deux principes de la thermodynamique » (cité par Segré, 1984, p. 107). Ce n'est que plus tard vers la fin de sa vie que Planck (1993, p. 99), tout en soulignant les échecs des différentes tentatives de conciliation de son hypothèse avec la théorie classique, reconnaît son originalité et son caractère irréductibilité :

Mes vaines tentatives pour concilier tant soit peu la théorie quantique élémentaire et la théorie classique se poursuivirent pendant des années et me coûtèrent de grands efforts. Plusieurs de mes collègues y voyaient presque un drame, mais j'envisageais les choses différemment, car la profonde clarification de la pensée que j'en tirais eut une grande valeur pour moi. À présent, je sais avec certitude que le quantum d'action a une signification beaucoup plus profonde que je ne l'avais d'abord pensé.

C'est plutôt à Einstein que revient le mérite de tirer toutes les conséquences de ce drame, en mettant clairement en exergue les contradictions entre le champ continu des équations de Maxwell et les paquets d'énergie discrets, cinq ans après Planck. En l'occurrence, il généralise l'hypothèse des grains d'énergie à la lumière dans l'étude de l'« effet photoélectrique ».

3. La généralisation de l'hypothèse des quanta aux problèmes de l'effet photoélectrique et de la stabilité de l'atome

3.1. L'effet photoélectrique et la quantification du rayonnement lumineux

L'effet photoélectrique est l'un de ces nouveaux phénomènes bizarres découverts à la fin du XIX^e siècle. Selon Maitte (2015, p. 322), c'est Heinrich Hertz qui le découvre par hasard en 1887, au moment même où il cherchait à mettre en évidence les ondes radio qui ont, comme par ironie du sort, **constituées** la confirmation éclatante de la théorie ondulatoire de

Maxwell. Comme le montre Gribbin (2009, p. 66), ce phénomène a été mis en évidence dix ans plus tard par Philip Lenard et J. J. Thomson indépendamment l'un de l'autre. Selon l'auteur du *Chat de Schrödinger*, c'est précisément pour ses travaux sur les rayons cathodiques que Lenard a reçu le prix Nobel de physique en 1905 : « Il avait notamment prouvé en 1899 que les rayons cathodiques (électrons) pouvaient être produits par une lumière éclairant une surface métallique dans un vide d'air. D'une manière ou d'une autre, l'énergie de la lumière amenait les électrons à s'échapper du métal ».

Ceci revient à dire que l'effet photoélectrique consiste à arracher des électrons à la surface d'une plaque métallique en l'éclairant suffisamment. L'intensité de la lumière doit, en conséquence, être relativement élevée. C'est comme le montre Olivero (2014, p. 22), « l'émission d'électrons sous l'effet d'un flux lumineux ». On trouve une illustration parfaite d'un tel phénomène chez Einstein et Infeld (1983, p. 241-242) qui le caractérisent de la façon suivante :

Une lumière homogène, par exemple violette, qui a, comme l'on sait, une longueur d'onde définie, frappe une surface métallique et lui arrache des électrons. Une pluie de ces derniers se déplace avec une certaine vitesse. Conformément au principe de conservation de l'énergie, nous pouvons dire : l'énergie de la lumière est partiellement transformée en l'énergie cinétique des électrons arrachés... Cet arrachement d'électron par la lumière est appelé *effet photoélectrique*.

Au demeurant, ce qui retient particulièrement notre attention par rapport à ce phénomène, c'est le fait qu'en l'étudiant les physiciens soient parvenus à certains constats que Maitte appelle « lois empiriques » et que la théorie classique du rayonnement électromagnétique ne permet pas d'expliquer :

D'abord le fait qu'il existe un seuil en deçà duquel, quelle qu'en soit son intensité, le faisceau lumineux ne peut provoquer l'émission d'électron. Par exemple, le phénomène ne peut se produire avec un faisceau de fréquence rouge ou les grandes longueurs d'onde. C'est surtout la lumière monochromatique⁴ violette qui est de très haute fréquence et donc de courte

⁴Une lumière monochromatique est une lumière composée d'une seule fréquence ou couleur et qui a subséquemment une certaine fréquence inversement proportionnelle à sa longueur d'onde. Toutes ses ondes sont d'une même fréquence. Par exemple, la lumière de couleur

longueur d'onde qui est considérée comme la fréquence minimale ou le seuil à partir duquel nous avons une production automatique de l'effet photoélectrique. Mcevoy et Zarate (2014, p. 46) notent à ce propos que ce fait « qu'il existe une fréquence de seuil en dessous duquel aucun photoélectron n'est éjecté, et ce indépendamment de l'intensité des rayons lumineux » est « un constat très étrange et une véritable source d'embarras pour les physiciens classiques ». En d'autres termes, la physique classique ne permet de répondre à la question de savoir comment expliquer le fait que, quelle qu'en soit la durée pendant laquelle on éclaire la plaque métallique et, quelle qu'en soit l'énergie du rayonnement lumineux, les électrons ne soient arrachés que si et seulement si le seuil minimal est dépassé.

Ensuite, la deuxième contradiction entre la théorie électromagnétique et l'expérience est liée au fait que la théorie de Maxwell prévoit que c'est l'intensité du rayonnement lumineux en œuvre qui détermine l'énergie des électrons arrachés. Il est d'ailleurs bien connu de tous que selon cette théorie, c'est uniquement l'intensité d'une onde électromagnétique qui détermine son énergie. Or tel n'est pas le cas dans l'observation des faits. Puisqu'en lieu et place de l'énergie, « c'est le *nombre* des électrons émis qui dépend de l'intensité, leur énergie ne dépend que de la longueur d'onde incidente... alors que celle-ci ne devrait pas intervenir selon la théorie électromagnétique » (Maitte, 2015, p. 333).

En effet, lorsqu'on s'en tient aux prédictions de la théorie électromagnétique, en augmentant l'intensité d'un faisceau lumineux de mêmes longueurs d'onde à partir de sa source, comme lorsqu'on rapproche le faisceau lumineux de la plaque métallique, on devrait obtenir une augmentation de l'énergie cinétique des électrons, c'est-à-dire de leur vitesse. Mais l'expérience est en contradiction flagrante avec ces prédictions de la théorie classique. Einstein et Infeld (1983, p. 242) écrivent à ce propos que « Le résultat expérimental réel est, du point de vue de la théorie ondulatoire, surprenant. Les électrons observés ont tous la même vitesse, la même énergie, qui ne varie pas avec l'accroissement de l'intensité de la lumière ». Il est, de toute évidence, impossible de déduire l'indépendance de

rouge est une lumière monochromatique qui est de fréquence relativement basse et donc de grande longueur d'onde.

l'énergie des électrons à l'égard de l'intensité du faisceau lumineux. Par conséquent, un tel résultat impose un dépassement de la théorie ondulatoire.

En tout état de cause, force est de constater, avec Ortolì et Pharabod (2007, p. 26), que « L'effet photoélectrique, comme la catastrophe ultraviolette, faisait partie de ces « petits détails obscurs » que les physiciens de la fin du XIX^e siècle espéraient expliquer promptement dans le cadre des théories classiques de Newton et de Maxwell ». Ce blocage est précisément lié au fait que personne n'a osé remettre en cause l'explication fondée sur l'hypothèse d'une nature ondulatoire de la lumière, en dépit des hypothèses ingénieuses de Planck. Or, comme le souligne Gribbin (p. 66), « Il existe une manière très simple d'expliquer ce phénomène, pourvu que vous acceptiez d'abandonner les idées de la physique classique et que vous considériez que les équations de Planck sont significatives d'un point de vue physique ». Ce pas décisif, c'est Einstein qui le franchit, non seulement en clarifiant l'hypothèse de Planck, mais aussi en introduisant, dans la même foulée, son hypothèse miraculeuse de l'existence de grains de lumière pour interpréter correctement le problème de l'effet photoélectrique.

Selon Maitte, Einstein montre que la représentation que nous avons des objets de la physique, en particulier la matière et la lumière, est fondée sur une certaine dichotomie onde-corpuscule, alors que les nouveaux processus physiques en question, dont entre autres celui du corps noir et de l'effet photoélectrique, mettent en jeu une interaction entre la lumière (ondes) et la matière (corpuscules). En conséquence, il souligne que la dichotomie onde-corpuscule ne peut tenir que dans une contradiction. Ce qui revient à dire que les théories de Maxwell et de Newton qui ne prévoient aucune possibilité de joindre les deux paradigmes ne peuvent que conduire à des contradictions physiquement insurmontables et philosophiquement insolubles dans l'étude de ces « phénomènes de création et de conversion » de faisceaux lumineux. Cet imbroglio théorique est justement, selon Einstein, celui qui caractérise le problème « du rayonnement des corps noirs, de la photoluminescence, de la production du rayonnement cathodique par la lumière ultraviolette et d'autres phénomènes faisant intervenir l'émission de la lumière » (Maitte, 2015, p. 334).

En tout état de cause, l'auteur de *L'évolution des idées en physique* tire les leçons d'une telle impasse qui le conduit à émettre l'hypothèse audacieuse de l'existence de grains de lumière et à défendre l'impérieuse nécessité d'une nouvelle perspective admettant le fait que la lumière se comporte également comme corpuscule. En d'autres termes, Einstein soutient sans ambages, en partant de l'idée de grains d'énergie de Planck, que l'effet photoélectrique tout comme le problème du corps noir ne peut être expliqué que si nous considérons que la lumière est constituée de *quanta* ou de grains de lumière. Ce qui revient à dire que l'énergie de la lumière ne peut prendre que des valeurs discrètes ou discontinues et non plus continues comme le soutient la théorie ondulatoire de Maxwell. Avec cette hypothèse, les contradictions entre l'expérience et la théorie classique sont surmontées comme dans le cas du problème du corps noir.

En dépit de toutes les hostilités qu'elle a rencontrées, cette idée de quanta lumineux d'Einstein a été expérimentalement prouvée par Robert Millikan en 1916, avant d'être officiellement baptisée « photon » en 1923. C'est précisément grâce à cette découverte et non pour ses célèbres travaux sur la relativité qu'Einstein reçoit le Prix Nobel de Physique en 1922. C'est le même problème d'inadéquation entre la théorie classique et les nouveaux faits expérimentaux qui se pose suite à la découverte de l'atome et aux différentes tentatives de représentation de sa structure. Ce phénomène est connu sous le nom du problème de la stabilité de l'atome.

3.2. Le problème de la stabilité de la matière et la quantification des spectres d'émission et d'absorption de l'énergie au sein de l'atome

La découverte de l'électron et du noyau atomique va de pair avec la nécessité de se les représenter. C'est dans cette optique qu'après les modèles atomiques de Thomson et de Perrin, Rutherford propose un troisième modèle issu de celui de Perrin et qui représente l'électron en mouvement orbital autour du noyau, à l'image de la terre qui tourne autour du soleil. Il représente donc « l'infiniment petit à l'image de l'infiniment grand », comme une « sorte de système solaire miniature ». C'est d'ailleurs pour cela qu'on appelle ce modèle atomique le modèle planétaire. Ce modèle qui a suscité l'adhésion unanime des savants oriente encore les idées modernes sur la structure de l'atome.

Mais, aussi séduisant qu'il puisse paraître, le modèle planétaire présente un certain nombre de difficultés, dont particulièrement celle liée à la stabilité même de la matière. Puisqu'à la différence de la terre qui tourne paisiblement autour du soleil, l'électron de Rutherford est une charge en mouvement circulaire. De ce fait, il perd de l'énergie conformément aux équations de Maxwell. Lurçat (2001, p. 81) souligne que c'est précisément de l'accélération et du rayonnement que découle une telle perte. Et puisque c'est cette énergie qui permet justement le mouvement, l'électron devrait donc s'écraser sur le noyau en un temps extrêmement bref. On le voit bien, cette catastrophe de l'électron de Rutherford dénote d'une contradiction entre les théories classiques et les nouveaux faits expérimentaux, comme dans le cas du problème du corps noir et de l'effet photoélectrique. C'est qui conduit Niels Bohr à émettre des hypothèses pour le moins stupéfiantes. Maitte (2015, p. 337) note, à ce propos, que :

Le positivisme de Planck relayé par le réalisme einsteinien vient d'amener en physique une situation nouvelle : la « maladie quantique » s'étend du problème du corps noir à la lumière. Cette « maladie » gagne encore du terrain lorsque, en 1913, Niels Bohr cherche à concilier le modèle de l'atome proposé par Perrin et Rutherford avec les conditions de sa stabilité. Pour cela, il a l'idée de rapprocher structure de l'atome et quanta d'énergie.

Autrement dit, Niels Bohr fait recours à la notion de discontinuité pour expliquer les phénomènes d'émission et d'absorption de la lumière par les électrons. Car si le modèle de Rutherford est inadéquation avec les faits expérimentaux, c'est précisément parce qu'il est fondé sur le modèle classique en l'occurrence sur le modèle newtonien lorsqu'il représente l'électron comme quelque chose qui gravite autour du noyau et sur le modèle maxwellien lorsqu'il s'en tient aux valeurs continues des rayonnements émis par l'électron dans son mouvement orbital⁵.

La solution ingénieuse que propose Bohr consiste à dire qu'un électron ne rayonne pas de lumière lorsqu'il est dans son orbite. C'est ce qui a autorisé l'introduction du concept « d'état stationnaire ». Ce faisant, Bohr sauve la matière de l'instabilité chronique qui la guète, avant de lui assigner

⁵ Cette terminologie qui consiste à parler de « mouvement de l'électron autour du noyau » est plutôt une façon de poser le problème de la stabilité de la matière en partant des concepts de la physique classique. Or comme le montre si bien Heisenberg (1990), elle n'est pas conforme à une description de l'évolution du concept de matière en physique quantique. Elle est donc fautive en réalité.

ses propres règles de jeu en remplacement des règles maxwelliennes. Cette première règle restrictive servant « d'épine dorsale » à la conception de Bohr se comprend à partir des notions d'orbites interdites et d'orbites permises. Autrement dit, cela revient à interdire certaines orbites pour n'en autoriser que d'autres, bien précises, pour l'électron. Dans ce clivage entre orbites permises et orbites interdites, Klein (2015, p. 17) note que chaque orbite permise se caractérise fondamentalement par un niveau d'énergie qui lui est spécifique de telle sorte qu'« Un électron dans un atome ne peut donc avoir n'importe quelle énergie : son énergie est « quantifiée ». C'est une telle limitation qu'Ortoli et Pharabod (2007, p. 29) interprètent en soulignant que Bohr

(...) postule que le rayon de l'orbite circulaire ne peut varier de façon continue, mais qu'il faut au contraire lui assigner des valeurs déterminées dans lesquelles intervient la constante de Planck. En clair, cela signifie que les électrons gravitant autour du noyau ne peuvent le faire que sur des orbites bien précises, et qu'en particulier, il leur est impossible de descendre au-dessous d'une orbite dite « fondamentale ». Donc, il ne risque pas de s'écrouler sur le noyau.

Cette idée de transposition de l'hypothèse des quanta de Planck transparait encore dans l'interprétation de Ben-Dov (1995, p. 180) lorsqu'il montre que dans cette hypothèse de Bohr, l'« électron se meut uniquement sur une famille discrète d'orbites, à savoir celles sur lesquelles la quantité de mouvement de l'électron (c'est-à-dire le produit de sa masse par sa vitesse) multipliée par la circonférence de son orbite est un multiple entier de la constante de Planck ».

Cependant, en dépit de ses succès fulgurants et vertigineux, la théorie de Bohr souffre d'un manque de cohérence criard. L'espoir qu'elle a tant suscité a fait place aux réserves et autres désenchantements, surtout lorsqu'il s'est avéré par la suite (dans les années 1920), que ni l'idée de trajectoire ni celle d'orbite ne sied aux électrons au sens strict du terme. **Ainsi que le montre** Klein (2015, p. 18), à partir de cette période, « les physiciens ne conserveront finalement du modèle de Bohr qu'une idée : les électrons d'un atome ne peuvent se trouver que dans certains états particuliers ; ces états sont caractérisés par leur énergie, et non par une trajectoire au sens classique du terme ».

Conclusion

Au vu de tout ce qui précède, il ressort que des problèmes du corps noir, à celui du mouvement de l'électron au sein de l'atome, en passant par le problème de l'effet photoélectrique, la conception classique de la matière a révélé toutes ses limites. Il convient de rappeler que la crise engendrée par ces problèmes qui mettent en jeu des interactions entre matière et lumière est liée de façon générale à une remise en cause de la dichotomie onde-corpuscule. En l'occurrence, celle-ci qui constitue le fondement de la physique classique est devenue inopérante pour décrire cette interaction lorsqu'on sait déjà qu'à la continuité caractérisant la description électromagnétique de ces phénomènes, se substitue la discontinuité qui est pourtant l'apanage de la mécanique newtonienne. Ce qui revient à dire que ces problèmes conduisent inéluctablement à une nouvelle conception de la matière comprise dans le sens de l'irruption de la discontinuité dans la continuité caractérisant les rayonnements de l'énergie, de la lumière et du spectre d'émission et d'absorption de celle-ci au sein des atomes.

Mais d'une part, il n'y a pas encore d'alternative crédible à cette légendaire dichotomie, la dualité en germes dans les conceptions de Planck, d'Einstein et de Bohr n'étant pas encore conceptualisée pour devenir un principe de la physique, a *fortiori* se substituer à la dichotomie. Il faut dire qu'en vérité, c'est même le sens de cette nouvelle conception de la matière qui n'est pas clairement perçu par les acteurs. D'autres parts, l'ensemble de ces conceptions quantiques étaient loin d'être systématiques. Nous avons donc une théorie classique inapte quant à la description de ces phénomènes nouveaux et des théories quantiques opératoires qui culminent dans celle de Bohr, mais qui manquent pour l'ensemble de cohérence et de formalisme.

En conséquence, cette nouvelle compréhension de la matière en gestation dans les théories de Planck, d'Einstein et de Bohr impose la nécessité d'un dépassement de la dichotomie ondes-corpuscules et l'élaboration d'un nouveau formalisme. C'est précisément dans ce cadre que s'inscrit la dualité onde-corpuscule de Louis de Broglie, ainsi que son idée d'onde de matière sur laquelle s'est basé Erwin Schrödinger pour fonder la mécanique ondulatoire. Tandis que Werner Heisenberg part des notions de discontinuité comme celles d'orbites discrètes et de sauts quantiques de Bohr pour fonder la mécanique matricielle. C'est véritablement avec la synthèse de ces deux mécaniques, au départ diamétralement opposées

comme l'onde (Schrödinger) et le corpuscule (Heisenberg), qu'on peut parler de la naissance de la physique quantique.

Références bibliographiques

- BACHELARD Gaston, *Le nouvel esprit scientifique*, Paris, PUF, 2013.
- BAKER Joane, *50 clés pour comprendre la physique*, trad. de Julien Randon-Furling, Paris, Dunod, 2015.
- BALIBAR Françoise, LEVY-LEBLOND Jean-Marc et LEHOUCQ Roland, *Qu'est-ce que la matière?*, Paris, Le Pommier, 2014.
- BEN-DOV Yaov, *Invitation à la physique*, Paris, Seuil, 1995.
- BOUDENOT Jean-Claude et COHEN-TANNOUDJI Gilles, *Max Planck et les quanta*, Paris, Ellipses, 2001.
- D'ESPAGNAT Bernard et KLEIN Etienne, *Regards sur la matière. Des quanta et des choses*, Paris, Fayard, 1993.
- DE BROGLIE Louis, *Ondes, Corpuscules, mécanique ondulatoire*, Paris, Albin Michel, 1935.
- EINSTEIN Albert et INFELD Léopold, *L'évolution des idées en physique, des premiers concepts aux théories de la relativité et des quanta*, trad. de Maurice Solovine, Paris, Flammarion, 1983.
- GRIBBIN John, *Le chat de Schrödinger. Physique quantique et réalité*, trad. de Christel Rollinat, Paris, Flammarion, 2009.
- HEISENBERG Werner, *La partie et le tout. Le monde de la physique atomique (Souvenirs, 1920-1965)*, trad. de Paul Kessler, Paris, Flammarion, 1990.
- HOFFMAN Banesh et PATY Michel, *L'étrange histoire des quanta*, Paris, Seuil, 1981.
- KLEIN Etienne, *La physique quantique*, Paris, Flammarion, 1996.
- KLEIN Etienne, *Petit voyage dans le monde des quanta*, Paris, Flammarion, 2004.
- KLEIN Etienne, *Les secrets de la matière*, Paris, Edition J'ai Lu (E. J. L.), 2015.
- KUMAR Manjit, *Le Grand Roman de la physique quantique. Einstein, Bohr... et le débat sur la nature de la réalité*, trad. de Bernard Sigaud, Paris, Flammarion, 2012.

- LECOURT Dominique (Dir), *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences*, Paris, PUF, 2006.
- LURÇAT Françoise, *Niels Bohr et la physique quantique*, Paris, Seuil, 2001.
- MAITTE Bernard, *Une Histoire de la lumière. De Platon au photon*, Paris, Seuil, 2015.
- MCEVOY J-P. et ZARATE Oscar, *La théorie quantique en images*, Paris, EDP Sciences, 2014.
- OLIVERO Charles, *25 points clés pour comprendre la physique quantique*, Paris, ESI, 2014.
- ORTOLI Sven et Pharabod Jean-Pierre, *Métaphysique quantique*, Paris, La Découverte, 2011.
- ORTOLI Sven et Pharabod Jean-Pierre, *Le Cantique des quantiques : le monde existe-t-il ?*, Paris, La Découverte, 2007.
- PLANCK Max, *Initiation à la physique*, trad. de J. du Plessis de Grenédan, Paris, Flammarion, 1993.
- PLANCK Max, *Autobiographie scientifique et derniers écrits*, Introduction, trad. et notes d'André George, Paris, Albin Michel, 1960.
- SEGRÉ Emilio, *Les physiciens modernes et leurs découvertes. Des rayons X aux quarks*, trad. de Patric Leroux Hugon, Paris, Fayard, 1984.