

# L'ÉVOLUTION DE L'ÉLECTRON

par M. Louis de BROGLIE,

Membre de l'Académie des Sciences, Professeur à la Sorbonne.

---

Mon intention est d'exposer dans cette étude l'évolution qu'a subie la notion d'électron, et plus généralement celle de corpuscule élémentaire, depuis une cinquantaine d'années. Au cours de cet exposé, nous constaterons maintes et maintes fois combien les notions fondamentales de la Science de l'Electricité, ces notions qui furent conquises l'une après l'autre au début du siècle passé par les efforts des pionniers de cette science, jouent un rôle essentiel dans nos idées actuelles sur la constitution de la matière et sur la structure des entités élémentaires qui la composent. Ainsi, nous nous associerons implicitement, par cette constatation même, à l'hommage ici rendu à l'illustre mémoire d'André-Marie Ampère car, sans lui, il n'y aurait eu ni théorie électromagnétique, ni théorie de l'électron et tous les progrès admirables de la Physique contemporaine en eussent été empêchés ou tout au moins retardés.

★  
★★

C'est une comparaison bien connue et devenue même un peu banale que de rapprocher l'écoulement de l'électricité à travers les conducteurs de celui d'un liquide dans une conduite. Cette comparaison, qui se montre souvent fructueuse pour la compréhension des lois régissant les courants électriques, suggère presque inévitablement la question suivante : le fluide électrique a-t-il

une structure continue ou une structure discontinue? C'est qu'en effet le succès de la théorie atomique de la matière appuyé sur de nombreuses preuves expérimentales nous a appris que les fluides matériels, auxquels nous comparons le fluide électrique, ont une structure discontinue et la question se pose ainsi tout naturellement de savoir s'il n'existe pas des grains élémentaires d'électricité. Cette idée se trouve fortifiée dès l'instant où l'on réfléchit aux lois de l'électrolyse connues depuis Faraday. Ces lois, interprétées à la lumière de la théorie atomique de la matière, signifient en effet que chaque ion transporte toujours une charge électrique égale à un multiple entier d'une charge élémentaire. Non seulement, ce fait indique l'existence d'une telle charge électrique élémentaire, mais il permet même d'en calculer la valeur quand on connaît par d'autres méthodes la valeur du nombre d'Avogadro, c'est-à-dire du nombre, le même pour tous les corps, des molécules contenues dans une molécule-gramme. Néanmoins, cette preuve, apportée par les lois de l'électrolyse, d'une discontinuité dans la structure de l'électricité était un peu indirecte et pendant longtemps la connaissance du nombre d'Avogadro (sur lequel cependant la théorie cinétique avait fourni quelques indications) était restée insuffisante pour permettre un calcul précis de la valeur de la charge élémentaire : ce calcul n'est devenu vraiment réalisable qu'à

l'époque des célèbres expériences de M. Jean Perrin. Pour établir réellement la structure discontinue de l'électricité, il fallait parvenir à isoler et à étudier le grain élémentaire d'électricité. C'est ce qu'une série de mémorables recherches expérimentales sont parvenues à faire dans les dernières années du XIX<sup>e</sup> siècle, du moins en ce qui concerne l'électricité négative.

Je n'ai pas à rappeler ici en détails les étapes de cette « conquête de l'électron » à laquelle restent attachés les noms de J. J. Thomson, de Lénard, de Villard, de Jean Perrin, pour ne citer que ceux dont les noms se présentent les premiers à ma mémoire. Peu à peu, il est apparu de plus en plus nettement que, dans certaines circonstances, les corps matériels sont susceptibles d'expulser des granules d'électricité qui voyagent ensuite librement jusqu'au moment où, à nouveau, ils s'ensevelissent dans le sein de la matière. Tantôt ils apparaissent dans les tubes à décharges (tubes de Crookes) sous la forme de rayons cathodiques, tantôt on les trouve parmi les produits de désintégration des corps radioactifs sous la forme de rayons  $\beta$ . Tantôt enfin, on les voit surgir des corps portés à une température élevée ou soumis à une irradiation de lumière ou de rayons X et l'on parle alors d'effets thermioniques ou d'effets photoélectriques. Mais ce qui est essentiel, c'est que les grains d'électricité obtenus par toutes ces méthodes diverses se montrent toujours identiques les uns aux autres. Ils portent tous la même quantité d'électricité négative et leurs propriétés sont bien définies et toujours les mêmes. On les a nommés « électrons ».

Les propriétés de l'électron que l'on a pu mettre en évidence pendant les premières années après sa découverte, pouvaient se résumer en disant que l'électron se comportait toujours comme un corpuscule de dimen-

sions négligeables, doué d'une masse et d'une charge électrique, toutes deux très petites et bien définies. Ceci veut dire que l'électron marquait son passage par des effets bien localisés en un point de l'espace, du moins à l'échelle de nos observations, et que, de plus, en présence ou en l'absence de champs électromagnétiques, il se déplace toujours comme doit le faire, d'après la Mécanique classique, un corpuscule ponctuel de masse très petite, mais bien définie, portant une petite charge électrique négative et toujours la même. La déviation éprouvée par l'électron en présence de champs électriques et magnétiques connus permet de mesurer le rapport de sa charge à sa masse. La connaissance du nombre d'Avogadro permet de calculer sa charge que les belles expériences de Millikan ont permis d'obtenir directement. On peut donc trouver les valeurs de la charge et de la masse de l'électron qui sont extrêmement petites.

L'étude plus approfondie des propriétés mécaniques des électrons de grande vitesse a montré, depuis, que la masse de l'électron varie avec sa vitesse exactement suivant la loi prévue par la théorie de relativité. On sait en effet que le développement des belles idées d'Einstein sur la relativité des phénomènes physiques conduit à adopter une dynamique qui pour les vitesses élevées (c'est-à-dire pour les vitesses approchant de la vitesse de la lumière dans le vide) s'écarte de la dynamique classique de Newton. Cet écart peut s'exprimer en disant que la masse d'un corpuscule, au lieu d'être toujours constante, comme le supposait la Dynamique Newtonienne, se met à croître d'une façon sensible avec la vitesse quand la vitesse devient voisine de celle de la lumière : elle tend même vers l'infini quand la vitesse tend vers celle de la lumière et ceci montre qu'aucun fragment de matière ne peut, si les idées

d'Einstein sont exactes, se déplacer aussi vite, et a fortiori plus vite, qu'une radiation dans le vide. Toute une série d'expériences dont les plus notoires sont celles de MM. Guye et Lavanchy, ont prouvé l'existence pour les électrons rapides de cette variation de la masse avec la vitesse. Cette belle vérification des idées relativistes, si elle est très importante du point de vue de la physique théorique générale, n'a d'ailleurs rien apporté d'essentiellement nouveau en ce qui concerne le concept d'électron. Après ces vérifications comme avant, l'électron devait être considéré comme un corpuscule ponctuel ou de très petites dimensions ayant une certaine charge électrique négative et possédant, quand il est au repos, une certaine masse bien déterminée. Le seul fait nouveau, c'est que la masse apparente augmente si l'électron est mis en mouvement rapide. Le développement de nos connaissances a amené, depuis, des changements bien plus importants dans notre conception de l'électron comme nous le verrons plus loin.

L'électron joue le rôle de grain élémentaire d'électricité négative. Existe-t-il des grains d'électricité positive ? On a été quelque temps après la découverte de l'électron sans en avoir la preuve certaine. Mais, depuis, on a acquis la certitude que l'électricité positive est, elle aussi, divisée en grains. Le grain élémentaire d'électricité positive a été identifié avec le proton ou noyau de l'atome d'hydrogène. Aujourd'hui, la découverte encore toute récente de l'électron positif nous oblige à nous demander si le proton a bien droit au titre de grain élémentaire d'électricité positive. Mais, pendant de longues années, la chose n'a pas paru douteuse et nous nous en tiendrons pour l'instant à ce point de vue.

L'étude des propriétés du proton a conduit à le considérer comme un corpuscule ponc-

tuel, ou du moins de très petites dimensions, analogue à l'électron ; mais ce corpuscule porte une charge électrique qui s'est montrée positive et exactement égale en valeur absolue à celle de l'électron. Quant à sa masse, au repos, elle est beaucoup plus grande que celle de l'électron au repos, environ 2.000 fois plus grande, et cette différence établit une dissymétrie curieuse entre les deux sortes d'électricités.

En résumé, les recherches expérimentales effectuées avant 1920 permettaient de considérer l'électricité comme formée de corpuscules élémentaires ponctuels ou quasi-ponctuels portant une charge électrique bien déterminée et possédant une masse au repos également bien définie. Nous allons maintenant expliquer comment les physiciens ont cherché à se représenter la structure de la matière en admettant qu'elle est formée par des agrégats de grains élémentaires d'électricité et comment cette tentative, en nous introduisant dans l'architecture interne de la matière, nous a fait voir que les grains d'électricité possédaient des propriétés étranges et très différentes de celles qu'on pouvait attendre d'un simple corpuscule ponctuel. Ainsi serons-nous préparés à mieux comprendre l'évolution récente de notre conception des corpuscules élémentaires.

★  
★★

Dès que l'expérience eut commencé à indiquer la nature discontinue du fluide électrique, les théoriciens s'emparèrent de cette idée et cherchèrent à construire des explications fondées sur elle. Sir J. J. Thomson fut un des premiers à s'avancer dans cette voie ; mais ce fut surtout H. A. Lorentz qui chercha à reconstruire toute la théorie électromagnétique en y introduisant systématiquement les électrons. Nous ne rappellerons pas ici en

détail tous les succès de la théorie de Lorentz. Le plus brillant fut la prévision des triplets et des doublets de l'effet Zeeman normal dont la découverte expérimentale (1896), confirmant les idées de Lorentz, apporta la preuve que la matière contient des électrons négatifs et permit même une première évaluation du rapport de leur charge à leur masse. Mais là ne se borna pas l'apport de la théorie des électrons : elle permit de retrouver les lois de la dispersion et de la diffusion, de prévoir un nombre important de phénomènes électro-optiques et magnéto-optiques, d'interpréter plusieurs propriétés électriques et calorifiques des métaux, etc... Par la théorie de l'onde d'accélération, elle paraissait même nous montrer clairement comment les radiations naissent du mouvement des charges électriques contenues dans la matière.

Quelques ombres cependant ne tardèrent pas à se profiler sur le tableau des succès de la théorie électronique. La plus inquiétante surgit de l'étude théorique du rayonnement d'équilibre thermique. La théorie des électrons permettait en effet de calculer quelle doit être la répartition des énergies entre les fréquences dans le rayonnement qui existe normalement à l'intérieur d'une enceinte maintenue à température constante et uniforme. Si l'on analyse à l'aide de la théorie électronique la façon dont s'opèrent les échanges d'énergies entre matière et rayonnement dans l'enceinte en question, on parvient à prévoir une certaine loi de répartition spectrale des énergies dans le rayonnement d'équilibre. Malheureusement cette loi, la loi de Rayleigh-Jeans, n'est pas d'accord avec l'expérience : représentant convenablement les faits dans le domaine des basses fréquences et des hautes températures, elle se montre tout à fait inexacte pour les hautes fréquences et les basses températures. Cet échec de la théorie électronique était très

grave car la loi de Rayleigh-Jeans était la conséquence inéluctable de l'ensemble des idées alors admises sur la nature ondulatoire des radiations et sur la structure discontinue de la matière et de l'électricité. Pour parvenir à une formule différente de celle de Rayleigh-Jeans et représentant bien le résultat des recherches expérimentales, M. Planck a été obligé d'introduire sa célèbre hypothèse des quanta suivant laquelle les électrons contenus dans la matière ne peuvent prendre que certains états de mouvement. Ces états de mouvement particuliers, les états quantifiés, M. Planck les a déterminés à l'aide de règles dans l'énoncé desquelles il a introduit la célèbre constante universelle ayant les dimensions d'une action qui depuis porte le nom de constante de Planck. Nous ne pouvons aucunement exposer ici les grandes lignes de la théorie des quanta telle qu'elle s'est développée à la suite des travaux de Planck, mais nous voulons insister sur l'idée essentielle suivante : en montrant que les électrons contenus dans la matière se comportent très différemment des points matériels conçus par la Mécanique classique (ou même par la Mécanique relativiste), la théorie des quanta a indiqué, dès ses débuts, que, pour représenter la totalité des propriétés de l'électron, on ne pouvait se contenter de l'image un peu simpliste du corpuscule ponctuel ou quasi-ponctuel, caractérisé uniquement par sa masse et sa charge électrique. Les conditions de stabilité quantique imposées par Planck et ses continuateurs aux mouvements électroniques à petite échelle font intervenir l'ensemble de la trajectoire décrite par l'électron comme si celui-ci se trouvait simultanément présent en tous les points de cette trajectoire. Mais les conséquences de ce fait important ne sont apparues que peu à peu à l'esprit des physiciens et longtemps les théoriciens des quanta se sont contentés d'employer à la

fois l'image de l'électron conçu comme un point matériel et les conditions de stabilité quantique qui entraînaient implicitement l'insuffisance d'une telle image. Cet emploi simultané de conceptions quelque peu contradictoires a servi de base au développement de nos connaissances sur la structure de l'atome et en particulier à la célèbre théorie à laquelle reste attaché le nom de M. Bohr.

On sait que, dans les premières années du XX<sup>e</sup> siècle, ayant acquis la certitude que les corps matériels sont formés d'atomes, les physiciens ont cherché à se représenter la structure des atomes des différents corps simples. L'aisance avec laquelle on avait pu extraire de la matière dans des conditions très variées des flots d'électrons, les conduisaient à penser que l'électron doit être une des pièces essentielles de l'architecture atomique. Déjà quelques tentatives avaient été faites pour obtenir des « modèles » permettant de représenter les propriétés des atomes quand les mémorables expériences de lord Rutherford et de ses collaborateurs sur la déviation des rayons  $\alpha$  lors de leur passage à travers la matière vinrent apporter la preuve qu'il existe au centre de l'atome un noyau chargé positivement et de très petites dimensions par rapport à l'ensemble de l'édifice atomique. Reprenant alors une ancienne suggestion de M. Jean Perrin, lord Rutherford proposait d'assimiler les atomes à de petits systèmes solaires, en miniature, dont le soleil central porterait une charge d'électricité positive égale et de signe contraire à un multiple entier de la charge électronique et autour duquel graviteraient des électrons-planètes, l'ensemble formant à l'état normal un système électriquement neutre. En passant d'un élément chimique au suivant, la charge du noyau augmente d'une unité et d'une unité également croît le nombre des électrons-planètes. Ce modèle d'atomes permettait d'in-

terpréter d'une façon satisfaisante quelques-unes des caractéristiques des atomes réels, mais il se heurtait ainsi à de graves difficultés. Les électrons intra-atomiques décrivant des orbites planétaires autour du soleil positif central sous l'action de la force de Coulomb auraient dû, d'après la Mécanique classique, pouvoir posséder une infinité de mouvements différents et de plus, d'après les résultats généraux de la théorie des électrons, ils auraient dû rayonner constamment de l'énergie sous forme de radiations à fréquences continuellement variables.

Les atomes seraient alors instables et la matière s'annihilerait rapidement ; de plus, rien ne pourrait expliquer le caractère discontinu et la structure toujours semblable à elle-même des spectres émis par les éléments. Pour lever ces difficultés, M. Bohr eut, en 1913, l'idée remarquable d'appliquer au modèle de Rutherford non pas les lois classiques de la Mécanique et de l'Electromagnétisme, mais les règles nouvelles de la théorie des quanta. Il admit d'abord que les électrons-planètes ne peuvent décrire que certaines des orbites prévues par l'application des lois classiques, celles précisément qui satisfont aux critères de quantification déjà énoncés et utilisés par Planck. Il admit de plus que sur leurs orbites quantifiées les électrons-planètes n'émettent aucun rayonnement, ce qui est en opposition formelle avec la théorie classique, de l'onde d'accélération. Enfin, Bohr fit l'hypothèse que les électrons peuvent changer brusquement de trajectoire en émettant sous forme de rayonnement une partie de leur énergie et que la fréquence du rayonnement s'obtient en divisant l'énergie perdue par l'électron par la constante de Planck. Sur ces bases, il édifia une théorie précise dont l'étonnant succès est bien connu de tous ceux qui ont suivi le développement de la Physique contemporaine. Non seulement cette

théorie explique la stabilité de l'atome et le caractère permanent des spectres, mais elle permet de prévoir exactement la structure des spectres optiques et des spectres de rayons X, de calculer numériquement la constante de Rydberg et même de prévoir la très légère variation qu'éprouve la valeur de cette constante quand on passe de l'hydrogène à l'hélium, etc... La théorie de Bohr, dont les postulats essentiels ont été confirmés par l'étude des phénomènes d'ionisation par choc, a permis de donner une première explication des propriétés chimiques des éléments et de la périodicité de ces propriétés qui se manifeste quand on parcourt la liste des éléments rangés par ordre de poids atomiques croissants.

Perfectionnée en 1916 par M. Sommerfeld qui y a introduit la Dynamique relativiste à la place de la Dynamique classique et a ainsi pu rendre compte d'une façon plus détaillée de la structure de certains spectres, la théorie quantique de l'atome a pu prévoir d'une façon correcte l'effet Zeeman normal déjà interprété par la théorie des électrons de Lorentz et l'effet Stark dont aucune interprétation complète n'existait encore. Sur la base des idées de M. Bohr, s'est ainsi édifié tout un corps de doctrine que nous appelons aujourd'hui « l'ancienne théorie des quanta » dont les succès furent nombreux et qui a rendu un inappréciable service à la Physique de l'atome en en fournissant pour la première fois un schéma systématique. Au point de vue qui nous intéresse ici, ce qui caractérise l'ancienne théorie des quanta, c'est qu'elle juxtapose d'une manière en somme assez peu logique la conception de l'électron-corpuscule obéissant aux lois de la Dynamique et les idées nouvelles de la théorie des quanta. Or ces idées nouvelles conduisent, nous l'avons dit, à considérer les orbites quantifiées comme des sortes d'unités dyna-

miques qu'il faut envisager dans leur ensemble et ceci n'est guère compatible avec l'idée classique de l'orbite décrite progressivement par un corpuscule ponctuel. De plus, en introduisant des nombres entiers dans les formules de quantification, la théorie des quanta nous forçait à introduire un élément tout à fait incompatible avec la structure essentiellement continue de l'ancienne Dynamique même amendée par la Relativité. Ainsi le caractère bâtard de l'ancienne théorie des quanta ne permettait pas de la considérer comme satisfaisante et on sentait la nécessité de construire un édifice plus cohérent. A partir de 1923, l'apparition de la nouvelle Mécanique a considérablement amélioré la situation, mais au prix, nous le verrons, d'une modification profonde de notre conception de l'électron.

Avant de parler de la Mécanique ondulatoire, nous allons d'abord montrer que dès avant la naissance de cette Mécanique et même en gardant l'hypothèse primitive de l'électron simple corpuscule, il ne paraissait déjà plus possible de le caractériser uniquement par sa masse et sa charge électrique. Déjà des faits expérimentaux nombreux et importants rendaient indispensable de lui attribuer une rotation interne et un magnétisme intrinsèque et cette seule complication aurait suffi, indépendamment de celles dont nous venons de parler, à montrer combien notre conception primitive de l'unité élémentaire d'électricité négative était trop simpliste.

★  
★★

On sait que les raies lumineuses émises par une source sont modifiées si cette source est placée dans un champ magnétique suffisamment intense. C'est l'effet Zeeman découvert par l'illustre physicien hollandais en 1896.

Un des plus grands succès de la théorie des électrons avait été de permettre à Lorentz une prévision exacte du phénomène découvert par son compatriote. Mais une étude plus étendue ne tarda pas à montrer que l'effet Zeeman, tel qu'il avait été prévu par Lorentz et observé par Zeeman, est en réalité tout à fait exceptionnel. C'est seulement si la source de lumière est formée par certains corps que l'on observe sur certaines raies les modifications simples prévues par la théorie de Lorentz : en général les modifications apportées aux raies par la présence du champ magnétique sont beaucoup plus compliquées que celles prévues par la théorie des électrons. On exprime ceci en disant que les effets Zeeman anormaux sont beaucoup plus fréquents que l'effet Zeeman normal, et c'est par suite d'un hasard heureux que M. Zeeman est tombé au début de ses recherches sur des cas où l'effet normal est réalisé. Naturellement, Lorentz et ses continuateurs ont cherché à compliquer la théorie primitive de l'effet Zeeman de façon à lui faire englober les effets anormaux. Ils n'y sont point parvenus. Quand, grâce à M. Bohr, la théorie quantique de l'atome s'est constituée, on aurait pu espérer que dans cette voie nouvelle on parviendrait à une théorie de l'effet Zeeman contenant les effets anormaux. Nouvelle désillusion ! l'ancienne théorie des quanta appliquée à l'action d'un champ magnétique sur l'émission spectrale d'un atome, conduit à retrouver exactement les résultats de Lorentz avec prévision parfaite des doublets et triplets de l'effet normal et impossibilité totale d'interpréter les anomalies. Ainsi donc, s'affirmait une insuffisance certaine de nos théories électroniques.

Des faits anormaux du même ordre sont ensuite apparus quand le développement de la théorie quantique de l'atome a permis de prévoir et d'analyser avec exactitude les spectres optiques et Röntgen des éléments.

La théorie de Bohr avait permis d'interpréter la composition des séries spectrales pour ainsi dire en première approximation. En tenant compte des termes correctifs introduits par la Dynamique relativiste, M. Sommerfeld avait obtenu une deuxième approximation permettant de prévoir d'une façon plus détaillée la « structure fine » des spectres. Mais cette deuxième approximation elle-même est apparue comme insuffisante : la structure réelle des spectres est encore plus compliquée, quand on en examine les détails, que ne le prévoit la théorie de Sommerfeld. Et alors on a pu voir que la théorie quantique, même étendue par l'introduction des corrections relativistes, était impuissante à rendre compte intégralement de la richesse des séries spectrales. Il y manquait visiblement quelque élément indispensable.

En réfléchissant sur ces difficultés, MM. Uhlenbeck et Goudsmit ont eu le grand mérite de comprendre qu'elles provenaient de la conception trop simpliste de l'électron placée à la base du développement de la théorie quantique de l'atome. Ils ont proposé de considérer l'électron non plus seulement comme une simple charge électrique, mais aussi comme un petit aimant : l'électron aurait donc, en plus de sa charge, un certain moment magnétique. De plus, il posséderait un certain moment cinétique interne analogue au moment cinétique d'un corps solide en rotation autour d'un axe. Pour donner une représentation intuitive de ces nouvelles propriétés du corpuscule « électron », MM. Uhlenbeck et Goudsmit se le figuraient comme une petite boule d'électricité négative en rotation autour d'un de ses diamètres, cette rotation donnant naissance au moment cinétique et au moment magnétique intrinsèques ainsi étroitement liés l'un à l'autre. Puis, guidés par des considérations que nous ne pouvons développer ici, ils précisèrent leur hypothèse en

donnant au moment magnétique et au moment cinétique internes des valeurs bien déterminées s'exprimant à l'aide de grandeurs fréquemment rencontrées dans la théorie des quanta. Selon ces idées, le mouvement interne de l'électron est quantifié, le moment cinétique correspondant valant la moitié de l'unité quantique usuelle de moment cinétique.

En introduisant cet ensemble d'hypothèses supplémentaires sur l'électron dans la théorie quantique de l'atome, MM. Uhlenbeck et Goudsmit purent montrer que les anomalies de l'effet Zeeman, les structures fines surnuméraires des spectres optiques et Röntgen et même d'autres phénomènes troublants dont nous n'avons pu parler plus haut et qui étaient connus sous le nom d'anomalies gyromagnétiques, trouvaient leur explication. Ces résultats, confirmés par ceux d'autres chercheurs, montrèrent nettement la nécessité de compléter notre conception de l'électron dans le sens indiqué par les deux physiciens hollandais.

Ainsi, même en laissant de côté les difficultés liées à l'interprétation des quanta, difficultés qui paraissaient exiger l'abandon au moins partiel du caractère corpusculaire de l'électron, la simple assimilation de l'électron à un point matériel chargé électriquement apparaissait insuffisante. L'électron possède une sorte de mouvement interne présentant une symétrie axiale, mouvement quantifié inséparable de son existence même : à cette nouvelle caractéristique fondamentale de l'électron, on a pris l'habitude de nommer le nom anglais de « spin ». En dehors de sa masse et de sa charge électrique, l'électron possède une troisième propriété tout aussi fondamentale, son spin, au double aspect cinétique et magnétique. Aucune théorie complète de l'unité d'électricité négative ne peut plus l'ignorer. Néanmoins, nous allons

pour quelques instants faire abstraction du spin pour exposer le développement de la Mécanique ondulatoire sous sa forme primitive.

★★

Il n'est pas possible de bien comprendre l'origine de la Mécanique ondulatoire sans avoir jeté un coup d'œil rapide sur l'évolution de la théorie de la lumière depuis quelque trente ans. Le fait saillant de cette évolution, c'est la réapparition des conceptions corpusculaires dans un domaine d'où elles avaient été exclues depuis près d'un siècle. La découverte des phénomènes d'interférences et de diffraction, les admirables constructions théoriques de Fresnel, l'expérience considérée comme cruciale faite par Fizeau et Foucault en mesurant la vitesse de la lumière dans l'eau, avaient semblé montrer définitivement que la lumière est formée d'ondes où l'énergie est répartie d'une façon continue. L'ancienne conception granulaire de la lumière, qui avait pu au XVIII<sup>e</sup> siècle s'enorgueillir de l'appui d'un Newton, avait été abandonnée et était presque tombée dans l'oubli à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. A l'étonnement général, elle allait renaître de ses cendres car on allait découvrir des phénomènes produits par la lumière et les autres radiations qui étaient jusqu'alors restées insoupçonnées et dont l'explication rend nécessaire un retour à la conception corpusculaire. Le plus important de ces phénomènes est l'effet photoélectrique. Voici en quoi il consiste : quand on éclaire un morceau de matière, un métal par exemple, avec de la lumière ou des rayons X, on en voit fréquemment sortir des électrons en mouvement rapide. L'étude de ce phénomène photoélectrique a montré que la vitesse des électrons expulsés ne dépend que de la longueur d'onde de la radiation incidente : c'est seulement le nombre des électrons

expulsés qui dépend de cette intensité. De plus, l'énergie des photoélectrons varie en raison inverse de la longueur d'onde de la radiation incidente.

Toutes ces lois sont entièrement différentes de celles que la théorie ondulatoire aurait pu faire prévoir et paraissaient dès l'abord très difficiles à interpréter. M. Einstein, en réfléchissant sur ces difficultés, s'est aperçu que, pour expliquer l'effet photoélectrique, il fallait en revenir, au moins dans une certaine mesure, à une structure corpusculaire des radiations (1905). Il a donc admis que les radiations sont formées de corpuscules transportant une énergie inversement proportionnelle à la longueur d'onde et a montré que les lois de l'effet photoélectrique se déduisent aisément de cette hypothèse.

D'autres phénomènes plus récemment découverts (effet Compton, effet Raman) sont venus confirmer l'hypothèse d'Einstein. Il est apparu qu'on rendait bien compte d'un certain nombre de faits en supposant que l'énergie lumineuse est divisée en grains auxquels on donne aujourd'hui le nom de « photons ». Cette invasion inattendue de l'atomisme dans un domaine dont on croyait l'avoir totalement expulsé, a été pour les physiciens la source d'embarras cruels. Comment concilier, en effet, cette nouvelle conception corpusculaire des radiations avec l'ensemble si considérable et si minutieusement étudié des phénomènes d'interférences et de diffraction dont, seule, la théorie ondulatoire paraissait pouvoir rendre compte ? L'examen de la réponse à faire à cette angoissante question a été l'origine des conceptions étrangement nouvelles de la Mécanique ondulatoire.

La seule manière de sortir des difficultés concernant la lumière, c'était en effet d'admettre que l'aspect corpusculaire de la lumière et son aspect ondulatoire tels qu'ils

se révèlent dans des catégories différentes d'expériences sont deux aspects « complémentaires » (le mot est de M. Bohr) d'une même réalité. Chaque fois qu'une radiation échange de l'énergie avec la matière, cet échange peut se décrire comme étant l'absorption ou l'émission d'un photon par la matière, mais quand on veut décrire le déplacement d'ensemble des grains de lumière dans l'espace, c'est à la théorie ondulatoire qu'il faut avoir recours. En approfondissant cette idée, on est conduit à admettre que la densité du nuage de photons associé à une onde lumineuse doit nécessairement être en tout point proportionnelle à l'intensité de cette onde lumineuse. On parvient ainsi sinon à établir définitivement, tout au moins à entrevoir une sorte de synthèse des deux anciennes théories rivales de la lumière où l'on pourrait interpréter à la fois les interférences et l'effet photoélectrique. Le grand intérêt de cette synthèse, c'est de nous révéler que, du moins dans le cas de la lumière, ondes et corpuscules sont dans la nature des apparences étroitement liées l'une à l'autre.

Mais s'il en est ainsi pour la lumière, ne peut-on pas se demander s'il n'en est pas de même pour la matière ? De même qu'un photon ne peut être isolé de l'onde qui lui est associée, ne doit-on pas supposer que les corpuscules matériels, eux aussi, sont toujours accompagnés d'une onde ? Ne doit-on pas chercher en particulier si les propriétés un peu étranges que la théorie des quanta avait amené à attribuer à l'électron, ne pourraient pas s'interpréter en le douant d'un aspect ondulatoire qui compléterait l'aspect corpusculaire déjà connu ? Telles étaient les questions capitales que le retour des corpuscules en théorie de la lumière amenait à se poser et dont l'étude fit naître, il y a un peu plus de 10 ans, les conceptions fondamentales de la Mécanique ondulatoire.

Si l'on suppose hardiment que dans la nature ondes et corpuscules sont toujours étroitement associés, le mouvement de tout corpuscule doit être lié à la propagation d'une onde. Cette liaison doit pouvoir s'exprimer par des relations entre les grandeurs mécaniques, énergie et quantité de mouvement, qui caractérisent le mouvement du corpuscule et les grandeurs ondulatoires, fréquence et longueur d'onde, à l'aide desquelles on peut décrire la propagation de l'onde. En s'inspirant de la liaison qui existe entre le photon et son onde associée, on peut en effet établir ces relations sous une forme générale qui contient le cas des photons comme cas particulier. Cette théorie générale de la liaison entre les corpuscules et leurs ondes associées forme la base sur laquelle s'est édifiée la Mécanique ondulatoire. Je ne puis naturellement rappeler ici en détails les principes de cette Mécanique. Je me bornerai à rappeler que, selon elle, la longueur d'onde de l'onde associée à un corpuscule varie en raison inverse de la vitesse de ce corpuscule : elle est d'autant plus petite que le corpuscule est plus rapide.

Voyons maintenant quelques-unes des conséquences de la nouvelle Mécanique quand on l'applique à l'électron. Lorsque l'onde associée à un corpuscule se propage librement dans une région de grandes dimensions par rapport à la longueur d'onde, la nouvelle Mécanique conduit à attribuer au corpuscule le mouvement même qui était prévu par la Mécanique classique ; c'est en particulier ce qui a lieu pour les mouvements des électrons que nous pouvons directement observer et c'est pourquoi l'étude des électrons à grande échelle avait conduit à les considérer comme de simples corpuscules. Mais il y a des cas où les lois classiques de la Mécanique ne parviennent plus à décrire ce qui se passe. Le premier de

ces cas est celui où la propagation de l'onde associée est restreinte à une région de l'espace dont les dimensions sont de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde. C'est ce qui arrive pour les électrons à l'intérieur de l'atome. L'onde associée est alors obligée de prendre la forme d'une onde stationnaire et la Mécanique ondulatoire montre que cette onde stationnaire ne peut avoir comme longueur d'onde que certaines longueurs d'onde bien définies par les conditions mêmes du problème : à ces longueurs d'onde possibles de l'onde associée, correspondant d'après les idées générales de la nouvelle Mécanique certaines énergies possibles pour l'électron intraatomique. Ces états seuls possibles à énergie bien définie correspondent exactement aux états de mouvement quantifiés introduits par M. Bohr dans sa théorie de l'atome et c'est un premier grand succès de la Mécanique ondulatoire d'avoir expliqué le fait, jusqu'alors si mystérieux, que ces mouvements sont les seuls possibles pour les électrons à l'intérieur de l'atome.

Un autre cas où le mouvement de l'électron ne doit plus suivre, d'après la Mécanique ondulatoire, les lois classiques du mouvement, est celui où son onde associée se heurte à des obstacles au cours de sa propagation. Il se produit alors des interférences et le mouvement du corpuscule peut n'avoir aucune analogie avec celui que prévoirait la Mécanique classique. Pour nous rendre compte de la façon dont les choses doivent se passer, laissons-nous guider par l'analogie avec la lumière. Supposons que nous projetions une radiation de longueur d'onde connue sur un dispositif susceptible de donner lieu à des interférences. Puisque nous savons que les radiations sont formées de photons, nous pouvons dire aussi que nous envoyons un essaim de photons sur le dispositif en question. Dans la région où se pro-

duisent les interférences, les photons se répartissent de telle façon qu'ils se trouvent concentrés là où l'intensité de l'onde associée est la plus grande. Si maintenant nous envoyons sur le même dispositif d'interférences non plus une radiation, mais un flot d'électrons de même vitesse dont l'onde associée ait même longueur d'onde que la radiation primitivement employée, l'onde interférera comme dans la première expérience puisque c'est la longueur d'onde qui règle les interférences. Il est alors tout naturel de penser que les électrons vont se concentrer là où l'intensité de l'onde associée est la plus grande et c'est bien là la prévision faite par la Mécanique ondulatoire. Les électrons dans la seconde expérience doivent donc, si les idées de la nouvelle Mécanique sont exactes, se répartir dans l'espace comme le faisaient les photons dans la première expérience. Si l'on peut établir qu'en fait il en est bien ainsi, on aura mis en évidence l'existence de l'onde associée à l'électron et apportée à la Mécanique ondulatoire une confirmation expérimentale décisive.

Cette confirmation décisive a été obtenue pour la première fois en 1927 par deux physiciens américains, MM. Davisson et Germer, qui, en envoyant un faisceau d'électrons monocinétiques sur un cristal de Nickel, sont parvenus à obtenir des phénomènes tout à fait analogues à ceux qu'on obtient avec les rayons X. Le même phénomène a été ensuite observé et étudié par un grand nombre d'autres expérimentateurs, notamment par le Professeur G. P. Thomson. Il est aujourd'hui couramment obtenu et utilisé dans les laboratoires. La découverte de ce beau phénomène a conduit à une vérification complète et quantitative des idées et des formules de la Mécanique ondulatoire.

Ainsi nous avons acquis une preuve directe de la conception suivant laquelle

l'électron n'est pas un simple corpuscule : il possède à la fois un aspect corpusculaire et un aspect ondulatoire et, suivant les cas, il faut pour prévoir les phénomènes où il intervient l'envisager comme onde ou comme corpuscule. Comment peut-on concilier ces deux aspects ? C'est ce que nous n'expliquons pas ici en détails : on sait que cette conciliation exige des conceptions nouvelles et subtiles où les probabilités jouent un rôle essentiel.

D'ailleurs ce n'est pas uniquement l'électron qui est à la fois corpuscule et onde. Il en est de même du proton comme des expériences plus récentes l'ont montré et très probablement de toutes les unités matérielles. Ainsi, pour la matière comme pour la lumière, l'aspect atomique et discontinu des entités élémentaires se double d'un aspect continu et ondulatoire et cette découverte a considérablement modifié et enrichi l'idée que nous nous faisons de l'électron.

★ ★

La Mécanique ondulatoire a remporté de magnifiques succès dans l'interprétation du monde atomique et ses applications ont renouvelé complètement les méthodes de la Physique microscopique. Néanmoins, sous sa forme primitive elle présentait deux lacunes importantes : d'abord elle n'était pas relativiste et ne pouvait s'appliquer qu'aux électrons (ou aux autres particules) de vitesse faible par rapport à celle de la lumière ; ensuite, elle n'attribuait pas à l'électron les propriétés caractéristiques du spin et se bornait à le considérer, sous son aspect corpusculaire, comme un point matériel électrisé. Il était évidemment nécessaire de trouver une forme plus générale de la Mécanique ondulatoire satisfaisant aux exigences du principe

de relativité, applicable par suite aux particules de toutes les vitesses et contenant enfin le spin de l'électron. C'est cette tentative qui a été menée à bien d'une manière particulièrement heureuse par M. Dirac. La Mécanique ondulatoire primitive représentait l'onde associée à l'électron par une fonction scalaire. Suivant une idée proposée par M. Pauli, M. Dirac admet que l'onde associée à l'électron doit se représenter pour une fonction à plusieurs composantes. Ses raisonnements l'amenant à admettre que le nombre de ces composantes est de quatre, il a su trouver les quatre équations aux dérivées partielles simultanées auxquelles ces quatre composantes doivent obéir. Tandis que la Mécanique ondulatoire primitive représente l'onde de l'électron par une seule fonction scalaire obéissant à une équation aux dérivées partielles du second ordre du type classique de l'équation des ondes, la théorie de Dirac représente l'onde associée à l'électron par une fonction à quatre composantes, l'ensemble des quatre composantes obéissant à un système d'équations du premier ordre. Ce qu'il y a de vraiment très remarquable dans cette nouvelle Mécanique ondulatoire de l'électron, c'est qu'ayant obtenu des équations de propagation par des raisonnements très généraux où il n'est nullement question de spin, on se trouve avoir par là-même introduit le spin et ses conséquences. En effet, l'étude des équations de Dirac montrent qu'elles conduisent automatiquement à attribuer à l'électron les propriétés de rotation propre et de magnétisme propre imaginés par Uhlenbeck et Goudsmit. Aussi, tandis que la Mécanique ondulatoire primitive restait, tout comme l'ancienne théorie des quanta, impuissante à prévoir les anomalies de l'effet Zeeman et la complication des structures fines spectrales, les équations de Dirac permettent de prévoir très exactement

ces phénomènes. Ainsi la théorie de Dirac nous fournit aujourd'hui de l'électron l'image la plus complète que nous en possédons : elle lui attribue en effet, d'une part un aspect corpusculaire comportant masse, charge électrique, magnétisme et rotation propres, d'autre part un aspect ondulatoire rendant compte de la diffraction par les cristaux et du comportement de l'électron dans les systèmes atomiques, aspect ondulatoire où les propriétés de spin se traduisent par une certaine anisotropie de l'onde associée.

Il nous faut insister sur une particularité de la théorie de Dirac qui a conduit son auteur à la prévision de l'existence d'électrons positifs, prévision peu après vérifiée. Nous voulons parler du fait que les équations de Dirac admettent des solutions à énergie négative auxquelles correspondraient pour l'électron des mouvements doués de propriétés paradoxales, mouvements dont l'existence n'a jamais été constatée. Il paraissait y avoir là une grosse difficulté : la théorie de Dirac se montrait trop riche en possibilités. M. Dirac a suggéré lui-même une manière très ingénieuse de sortir de cette difficulté. Remarquable que, d'après le principe d'exclusion de Pauli, il ne peut y avoir plus d'un électron par état, il imagine que pour les électrons, tous les états à énergie négative sont normalement occupés dans tout l'univers. Il en résulte une densité uniforme des électrons à énergie négative et M. Dirac suppose que cette densité uniforme est inobservable. Pour rendre compte de l'existence des électrons observables, on devra supposer qu'il y a dans l'Univers plus d'électrons qu'il n'est nécessaire pour remplir tous les états à énergie négative et que le surplus occupe des états à énergie positive et constitue l'ensemble des électrons décelables par l'expérience. Mais c'est ici où intervient une idée nouvelle qui a permis à cette conception, un peu arti-

ficielle au premier abord, de conduire à un grand succès. Rien n'empêche d'imaginer que, sous une action extérieure quelconque, un des électrons à énergie négative puisse passer dans un état à énergie positive : il y a alors apparition simultanée d'un électron décelable expérimentalement et d'un « trou » ou « lacune » dans la distribution des électrons à énergie négative. Or M. Dirac a montré qu'une telle lacune se comporte comme un corpuscule qui aurait la masse de l'électron et une charge électrique exactement égale et de signe contraire. Il y aurait donc dans certains cas exceptionnels possibilité de création d'une « paire » formée d'un électron négatif et d'un électron positif. Cette théorie des « trous » de Dirac aurait sans nul doute laissé beaucoup de physiciens sceptiques si l'expérience n'était venue ensuite lui apporter une remarquable confirmation. Les beaux travaux de M. Anderson et de MM. Blackett et Occhialini ont en effet montré que, dans des conditions exceptionnelles (action des rayons cosmiques) on voit se manifester des électrons positifs. Ces électrons positifs ou positons sont aujourd'hui étudiés un peu partout dans les laboratoires. Les conceptions de Dirac conduisent à prévoir que les positons doivent être instables et tendre à disparaître au contact de la matière : on conçoit en effet que si un trou se trouve en présence d'un électron négatif, celui-ci pourra combler le trou par une transition accompagnée de rayonnement et il y aura alors disparition de deux électrons de signes contraires. Cette instabilité des positons paraît bien prouvée par de belles expériences de M. Jean Thibaud confirmées par celles de M. Joliot.

L'électron positif, comme le négatif, possède un spin et il en est très probablement de même de tous les corpuscules élémentaires de matière tels par exemple que le

neutron découvert presque en même temps que le positon. Il paraît probable que tous les corpuscules élémentaires ont non seulement le double aspect corpusculaire et ondulatoire, mais aussi les propriétés de spin sans doute profondément liées à l'existence même de la matière. Ainsi, en approfondissant l'étude des propriétés de l'électron, nous sommes arrivés à dégager des caractères généraux qui doivent probablement appartenir à tous les corpuscules élémentaires et dont les équations de Dirac sont présentement la meilleure expression mathématique.

★★

Nous avons vu la conception dualiste de la lumière qui unit les photons aux ondes lumineuses, servir de guide dans l'édification de la Mécanique ondulatoire. Le but initial de cette Mécanique était de fournir une théorie générale de la liaison entre ondes et corpuscules applicable aussi bien à la lumière qu'à la matière, aux photons qu'aux électrons. Et néanmoins, la Mécanique ondulatoire sous sa forme primitive ne nous fournit aucunement les bases d'une théorie satisfaisante de la lumière sous son double aspect corpusculaire et ondulatoire. Pourquoi ? D'abord parce que cette Mécanique ondulatoire primitive, n'étant pas relativiste, n'est applicable qu'à des corpuscules de vitesse faible par rapport à celle de la lumière et par suite ne peut s'appliquer aux corpuscules dont la lumière est formée. Ensuite, la Mécanique ondulatoire primitive utilise une onde scalaire et isotrope ; elle ne contient pas les éléments de symétrie voulue pour pouvoir expliquer la polarisation de la lumière. Enfin, elle ne nous fournit également aucun moyen de donner à l'onde lumineuse le caractère électromagnétique dont nous savons, depuis Maxwell et Hertz, qu'elle est certainement douée.

La situation s'est modifiée quand a paru la théorie de l'électron de Dirac. Celle-ci, en effet, est relativiste et pour cette raison, applicable au photon. De plus, elle introduit une onde dont le caractère anisotrope n'est pas sans analogie avec la polarisation lumineuse. Enfin, elle lie au corpuscule des grandeurs électromagnétiques dérivant de son moment magnétique propre qui ne sont pas sans analogie avec les champs de l'onde électromagnétique Maxwellienne. On pouvait donc espérer qu'en appliquant au photon les équations de Dirac, on obtiendrait une théorie dualiste satisfaisante de la lumière. En réalité, il n'en est rien et, sans vouloir entrer ici dans le détail, nous dirons qu'un photon bâti sur ce modèle n'aurait que la moitié de la symétrie nécessaire à une bonne théorie de la lumière. Ayant fait cette constatation, l'auteur de ces lignes a développé récemment une théorie de la lumière dans laquelle le photon est considéré non pas comme un unique corpuscule de Dirac, mais comme une paire de corpuscules de Dirac analogue à la paire formée par un électron négatif et un électron positif. Cette conception conduit, tout au moins en ce qui concerne la propagation de la lumière dans le vide, à des résultats très satisfaisants. On retrouve les propriétés de polarisation de la lumière et l'on réussit ainsi à préciser le rapport réel et profond qui existe entre le spin et la polarisation. On parvient aussi à attacher au photon un champ électromagnétique tout à fait identique à celui par lequel Maxwell a représenté la lumière.

Nous ne voulons pas insister ici sur cette nouvelle théorie de la lumière. En particulier nous ne discuterons pas la question de savoir si les deux corpuscules qui y sont supposés constituer le photon, ne devraient pas être identifiés avec ces « neutrinos » dont les théo-

riciens invoquent aujourd'hui l'existence pour rendre compte de la non-conservation apparente de l'énergie lors de l'émission des spectres continus  $\beta$  des corps radioactifs. Nous voudrions seulement attirer l'attention sur la courbe majestueuse qu'aurait décrite la pensée des physiciens si cette nouvelle théorie se confirmait définitivement. Partis de l'idée simpliste de l'électron conçu comme un point matériel chargé, ils auraient été obligés, pour expliquer les phénomènes quantiques, d'étendre à l'électron la double nature constatée pour la lumière et de créer la Mécanique ondulatoire : puis, pour absorber dans la Mécanique ondulatoire les propriétés de spin nécessaires à l'explication de toute une catégorie de phénomènes, ils auraient dû compliquer cette nouvelle Mécanique en l'amenant à la forme de Dirac. Et alors, par un étrange retour, cette Mécanique ondulatoire perfectionnée, revenant vers ses origines, servirait à son tour à constituer la théorie dualiste de la lumière unissant en un tout harmonieux le photon, l'onde lumineuse, la polarisation et le champ électromagnétique Maxwellien.

Mais laissons ces considérations encore hypothétiques. Nous avons vu dans cette étude notre conception de l'électron évoluer en se compliquant et en s'enrichissant depuis quarante années. Ainsi, comme cela arrive presque toujours, nous avons commencé par adopter une image trop schématique. Peu à peu, il a fallu la modifier en y introduisant des complexités nouvelles, souvent bien troublantes pour nos anciennes habitudes de pensée. Mais si nous avons ainsi perdu la belle simplicité des débuts, combien nous y avons gagné en connaissances nouvelles et en puissance pour classer et relier les faits physiques de l'échelle atomique !