Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande

Band: 55 (1929)

Heft: 25

Artikel: Quelques aspects de la mécanique ondulatoire et de la théorie des quanta

Autor: Juvet, G.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-42695

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 21.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

55e année 14 décembre 1929 N° 25

BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

Réd. : Dr H. Demierre, ing. Paraissant tous les 15 jours

ORGANE DE PUBLICATION DE LA COMMISSION CENTRALE POUR LA NAVIGATION DU RHIN
ORGANE DE L'ASSOCIATION SUISSE D'HYGIÈNE ET DE TECHNIQUE URBAINES
ORGANE EN LANGUE FRANÇAISE DE LA SOCIÉTÉ SUISSE DES INGÉNIEURS ET DES ARCHITECTES

SOMMAIRE : *Quelques aspects de la théorie ondulatoire et de la théorie des quanta*, par M. G. Juvet, professeur à l'Université de Lausanne. — *Calcul de systèmes hyperstatiques d'ordre élevé par décomposition en systèmes fondamentaux*, par M. le Dr Maurice Paschoud, Recteur de l'Université de Lausanne (suite et fin). — *Sur le principe des turbines Kaplan.* — *Commande à distance, et par ondes herziennes, d'une porte de garage.* — *Y a-t-il un malaise ferroviaire en Suisse ?* — Bibliographie. — Sociétés : *Société suisse des Ingénieurs et des architectes.* — Carnet des concours. — *Service de placement.*

Quelques aspects de la mécanique ondulatoire et de la théorie des quanta,[1]

par M. G. JUVET, professeur à l'Université de Lausanne.

Parlant, dans son *Introduction à la méthode de Léonard de Vinci*, de l'esprit du savant dont l'activité consiste à établir ou à découvrir le plus grand nombre de relations possibles entre les phénomènes — ou si l'on veut, entre les images des phénomènes, — Valéry dit ceci : « Cet esprit ne fait aucun effort pour passer de l'architecture cristalline à celle de pierre ou de fer ; il retrouve dans nos viaducs, dans les symétries des trabes et des entretoises, les symétries de résistance que les gypses et les quartz offrent à la compression, au clivage, — ou, différemment, au trajet de l'onde lumineuse ». Vous voudrez bien trouver dans cette phrase la justification de mon outrecuidance à venir vous parler de choses apparemment si éloignées des préoccupations qui sont en général les vôtres ; n'attendez pas d'ailleurs que je passe des formules de la physique atomique à celles de la résistance des bétons par une progression continue, il me suffit d'avoir invoqué l'un des écrivains les plus profonds de notre temps et de m'être placé sous le signe du grand Léonard, pour être assuré qu'il n'y a pas à craindre une grosse méprise à venir entretenir des ingénieurs ou des architectes des étonnants aspects que prennent la mécanique et la physique de l'échelle atomique. A cette justification, j'ajouterai que je suis assuré de votre indulgence plus encore que de la pertinence d'un rapprochement entre mon sujet et ceux qui sont traités dans ce cours de vacances.

* * *

C'est depuis le remarquable mémoire de Planck, paru en 1901 dans les *Annalen der Physik*, que les physiciens savent que les échanges d'énergie entre la matière et ce qu'on appelait encore l'éther se font par discontinuité. Lorsque la matière rayonne de l'énergie dans une enceinte à une température déterminée en équilibre thermodynamique, elle en absorbe autant ; la répartition de l'énergie dans cette enceinte, en fonction de la longueur d'onde de la lumière qui y règne, a été obtenue expérimentalement par Planck, mais les tentatives pour justifier la formule de Planck en se fondant sur la mécanique classique conduisent à une impossibilité. En fait si l'on veut éviter la conséquence suivante : *l'énergie rayonnante totale par unité de volume en équilibre de température avec la matière est infinie*, qui est manifestement impensable pour un physicien, il faut admettre que les échanges énergétiques dont il vient d'être question sont discontinus ; l'énergie est émise ou absorbée par la matière sous forme de grains, de petits paquets, de *quanta*, dont la grandeur est proportionnelle à la fréquence ν de la lumière émise ou absorbée, le facteur de proportionnalité étant un certain nombre h, dit constante de Planck, dont la nature est celle d'une action (au sens d'Hamilton) et dont la valeur est $6{,}55 \times 10^{-27}$ (erg $\times$ sec).

$$\epsilon = h\nu$$

est donc la formule fondamentale de la théorie des quanta.

C'est à Poincaré et à Sir James Jeans qu'on doit la démonstration rigoureuse de ce fait qu'il est impossible d'expliquer la loi de Planck au moyen des conceptions newtoniennes, et l'on voudra bien remarquer qu'une telle démonstration doit être d'une rigueur obstinée pour entraîner l'adhésion, puisque, d'une part, ses conséquences nous obligent à rejeter l'universalité de la mécanique rationnelle, et que, d'autre part, elle a pour but de faire constater qu'il est impossible d'imaginer des raisonnements concluant à une certaine formule en se fondant sur certaines prémisses, même si l'on admet que cette formule est seulement approximative, puisque son origine c'est l'expérience.

La constante de Planck s'introduit dans l'explication d'un phénomène tout différent, le phénomène photoélectrique. Lorsque de la lumière de courte longueur d'onde tombe sur la surface d'un conducteur chargé

[1] Conférence faite devant les participants au Cours sur le béton armé, organisé par la Société suisse des ingénieurs et des architectes, à Lausanne, en octobre 1929.

négativement, elle tend à précipiter une décharge, et si elle tombe sur un conducteur neutre, celui-ci se charge positivement. C'est donc que la lumière arrache des électrons au conducteur. On a pu mesurer la vitesse des électrons au départ, après avoir constaté que de la lumière d'une fréquence inférieure à une limite ν_o propre à chaque métal, est inopérante, et cette vitesse est donnée par la relation

$$\frac{1}{2} m v^2 = h(\nu - \nu_o)$$

comme si c'était seulement l'énergie $h\nu_o$ qui était nécessaire pour libérer l'électron, l'excès seul de l'énergie $h\nu - h\nu_o$, lui communiquant une vitesse v. L'intensité de la lumière incidente n'a aucun effet sur v ; elle détermine seulement le nombre des électrons libérés. Ici la théorie ondulatoire de la lumière est impuissante ; tout se passe comme si au point de la surface d'onde où se trouve l'atome qui perd un électron se trouvait un paquet d'énergie $h\nu$, sinon il faudrait des années pour que les ondes continues puissent fournir l'énergie de l'effet photo-électrique des rayons X.

C'est cependant la théorie des raies spectrales qui donna à la théorie du rayonnement de Planck une extension suffisante pour que le jeu des quanta apparût non plus comme un expédient, dont la nécessité ne parvenait pas à masquer l'artifice, mais bien comme l'essence même des manifestations physiques à l'échelle des atomes et des ondes lumineuses.

Les raies spectrales sont dues aux diverses actions des électrons et du noyau qui constituent l'atome de l'élément émetteur ou absorbant. Mais si, d'après Rutherford et ses élèves, les électrons en nombre égal au nombre de charges positives élémentaires du noyau, doivent tourner autour de ce noyau, il n'est pas facile de concevoir comment il peuvent rayonner de l'énergie sans que l'édifice atomique se détruise, ni d'imaginer, puisqu'ils ne peuvent être immobiles, comment, se déplaçant au sein de l'atome, ils n'émettraient pas toujours du rayonnement, puisque, d'après Maxwell, une charge électrique en mouvement accéléré crée un champ de rayonnement.

S'inspirant de raisonnements et d'analogies en rapport avec les idées de Planck et les expériences sur l'effet photoélectrique, Bohr proposa, en 1913, la théorie de l'atome qui a rendu son nom illustre, et dont les conséquences ont permis de débrouiller en première approximation les spectres de tous les éléments. Les raies spectrales émises par un atome traduisent simplement ce fait : l'atome émetteur a perdu une quantité d'énergie qui doit manifestement être égale à $h\nu$, ν étant la fréquence de la raie. On peut donc imaginer que l'atome est susceptible d'être dans des états dynamiques où ses électrons ne rayonnent pas, contrairement à la conclusion de Maxwell, sur la validité de laquelle Bohr fait hardiment de sérieuses réserves. Ces états dynamiques stables correspondent à des solutions du problème de mécanique qui consiste à déterminer les mouvements de n électrons autour d'un noyau positif, pour lesquels l'énergie a une valeur donnée. Les valeurs possibles pour l'énergie sont discrètes, soient $E_1, E_2, \ldots E_m, \ldots E_n \ldots$ Lorsqu'une raie spectrale est émise c'est que l'atome primitivement dans l'état E_n, par exemple, tombe subitement, et Bohr n'explique pas comment, dans l'état E_m, correspondant à une valeur moindre de l'énergie ; la raie émise est alors de fréquence ν, donnée par l'équation

$$h\nu = E_n - E_m.$$

L'absorption se règle de la même façon. Tout cela est en parfait accord avec le principe de combinaison découvert par Ritz d'après lequel si un atome présente deux raies de fréquences ν_1 et ν_2, il en présentera en général une troisième de fréquence $\nu_3 = \nu_1 + \nu_2$; les divers sauts quantiques du modèle de Bohr traduisent simplement ce fait. La détermination de toutes les raies spectrales émises par un atome est achevée dès que l'on connaît les diverses valeurs possibles E_i. On doit à Bohr, Sommerfeld, Schwarzschild, Epstein, d'élégantes méthodes fondées sur les plus profonds théorèmes de la mécanique analytique et de la mécanique céleste pour la recherche des E_i dans des cas de plus en plus compliqués. On peut dire que de 1913 à 1925, les physiciens apprirent la mécanique analytique pour pouvoir découvrir les raies spectrales ; les succès d'ailleurs furent remarquables, et maintenant qu'on a découvert la véritable mécanique des quanta, on peut s'étonner de la fécondité d'idées aussi artificielles que celles qui étaient à la base de la théorie de Bohr. Les diverses valeurs de E dépendent des constantes d'intégration du problème de mécanique rationnelle que pose la considération du système atomique ; plus rigoureusement E dépend d'autant de constantes arbitraires qu'il y a de degrés de liberté et ces constantes sont des nombres entiers dits nombres quantiques.

Les méthodes de Bohr et de ses émules ne permettaient pas de calculer l'intensité des raies spectrales prédites ; Bohr remédiait à cette fâcheuse insuffisance en ayant recours au principe de correspondance, d'après lequel il suffirait de reprendre les calculs classiques de la théorie électromagnétique qu'on avait dédaignés quant aux fréquences et de les utiliser pour les intensités. Cette désinvolture se justifiait par le fait suivant : lorsque les nombres n et m sont grands et assez voisins l'un de l'autre, les différences $E_n - E_m$ sont faibles vis-à-vis de E_n et de E_m eux-mêmes, alors $h\nu$ est comme une différentielle de E et l'on peut considérer les sauts quantiques supérieurs comme des passages continus. Du même coup, on comprend par ce raisonnement que la mécanique classique s'applique aux phénomènes où un grand nombre de quanta sont intéressés, l'illusion de la continuité étant un effet de grisaille uniforme causée par un brouillard de quanta.

* * *

Tous les phénomènes dont on vient de parler ressortissent à l'optique ; il y a donc des chances pour qu'ils

nous fassent connaître mieux encore la nature de la lumière. Depuis Fresnel, on est assuré du caractère ondulatoire de la lumière ; Maxwell a montré que les ondulations sont dues aux vibrations périodiques d'un champ électromagnétique qui se propage à travers l'espace. Les phénomènes de diffraction et d'interférences nous ont accoutumés à ce point de vue, et nous savons bien quelles difficultés les partisans de la théorie de l'émission ont rencontrées lorsqu'ils ont cherché à expliquer l'optique physique en ramenant la lumière à n'être qu'un bombardement, par le corps émetteur, de corpuscules ténus et très rapides. Or l'effet photoélectrique, les raies spectrales, redonnent à la théorie corpusculaire un regain de vie, et comme ces phénomènes paraissent être à l'origine — même, à la naissance — même, pourrait-on dire, de la lumière, c'est la théorie des ondulations qui devient mystérieuse, car s'il est vrai que la lumière est due à une propagation dans l'espace de grains, de quanta de lumière, ou comme on dit maintenant, de *photons*, les interférences et la diffraction deviennent inexplicables.

M. Louis de Broglie, dans une remarquable étude, n'a pas craint de considérer à la fois les deux points de vue, si contradictoires qu'ils paraissent. On ne saurait mieux comprendre son attitude qu'en la comparant à celle de Bossuet devant la contradiction entre l'omniscience de Dieu et la liberté humaine : « Quand donc nous nous mettons à raisonner, nous devons d'abord poser comme indubitable, que nous pouvons connaître très certainement beaucoup de choses, dont toutefois nous n'entendons pas toutes les dépendances ni toutes les suites. C'est pourquoi la première règle de notre logique, c'est qu'il faut ne jamais abandonner les vérités une fois connues, quelque difficulté qui survienne, quand on veut les concilier ; mais qu'il faut au contraire, pour ainsi parler, tenir toujours fortement comme les deux bouts de la chaîne, quoiqu'on ne voie pas toujours le milieu par où l'enchaînement se continue ».

En tenant ainsi les deux bouts de la chaîne, c'est-à-dire en prenant pour assuré que la lumière est un phénomène de nature ondulatoire et de nature corpusculaire à la fois, M. Louis de Broglie a pu montrer que « les dépendances » et quelques-unes « des suites » de chacune des deux vérités connues vont à la rencontre l'une de l'autre, et s'il n'a pas achevé la synthèse, ses pénétrantes analyses ont rendu possible les travaux de ses émules. M. Schrödinger, en reprenant les idées de M. de Broglie, a pu montrer que les différents états stationnaires de l'atome de Bohr, sont régis par une loi très générale, analogue à celle qui régit la production des harmoniques d'une plaque vibrante ; les fréquences des raies spectrales sont des fréquences propres du système atomique considéré. On retrouve ainsi une idée classique mais par des voies très différentes de celles où les prédécesseurs de Bohr s'étaient engagés. Le corps de doctrine créé par MM. de Broglie et Schrödinger s'appelle la *mécanique ondulatoire*. En nous fondant sur les remarques qui précèdent, nous pouvons esquisser rapidement cette belle théorie.

Lorsqu'un atome rayonne, il émet de l'énergie ; soit ϵ cette quantité d'énergie ; à toute énergie se propageant, il convient d'attacher un phénomène ondulatoire, une vibration de fréquence $\nu = \frac{\epsilon}{h}$. Un électron mobile est aussi une énergie qui se propage puisque la relativité montre que la matière et l'énergie ne sont pas distinctes ; donc à un électron en mouvement correspond un certain phénomène vibratoire aussi ; ou, si l'on veut, le phénomène vibratoire et l'électron mobile, c'est la même chose. D'une manière générale, à tout mouvement — au sens de la dynamique classique — correspond une onde dont la fréquence (ou la longueur) se détermine par la loi du quantum. Pour les phénomènes dont on traite en mécanique macroscopique, la considération de l'onde n'a aucune utilité, car la longueur d'onde assignée par la loi du quantum est infime ; on peut dire que ces ondes n'ont pas la possibilité de se manifester. Mais pour des phénomènes à petite échelle, où ϵ est très faible, la longueur d'onde peut être de l'ordre de grandeur du phénomène lui-même, par exemple, de l'ordre de grandeur de l'atome ; l'onde réagira alors sur le système et le phénomène aura un aspect dynamique et un aspect ondulatoire se conditionnant l'un l'autre. La trajectoire de l'électron, par exemple, dans un atome d'hydrogène, ne pourra être stationnaire au sens de Bohr, que si elle est en résonance avec l'onde de de Broglie. L'onde guide l'électron ; le pilotage modifie la trajectoire que la mécanique rationnelle prévoit de sorte que le mouvement d'une particule n'est plus une notion simple comme en dynamique classique. M. Schrödinger a fait voir que la fonction qui caractérise l'onde associée au mobile est déterminée par une équation aux dérivées partielles du second ordre

$$\Delta\psi + \frac{2m}{h^2}(E - V)\psi = 0$$

dont les solutions périodiques ne sont déterminées dans tout l'espace que si le paramètre représentant l'énergie prend des valeurs discrètes $E_1, E_2, \ldots E_n, \ldots$ C'est une manière de formuler la condition de résonance. Du coup, on obtient les niveaux de Bohr et on résoud certains problèmes dont nous aurons à parler tout à l'heure et dont la considération ne laissait pas d'être néfaste à la théorie de Bohr. Les progrès réalisés par la mécanique ondulatoire ont été considérables, mais les véritables méthodes pour traiter le rayonnement se trouvent avoir leurs racines dans des conceptions fort différentes dont l'essence a été découverte par MM. Heisenberg, Jordan, Born, Dirac, Wigner et Weyl.

(A suivre.)