

UNIVERSITÉ DE PARIS

LA LUMIÈRE, LES QUANTA ET LA TECHNIQUE DE L'ÉCLAIRAGE

par

Louis de BROGLIE

Prix Nobel

Secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences



Conférence donnée au Palais de la Découverte
le 16 Janvier 1960

LA LUMIÈRE, LES QUANTA ET LA TECHNIQUE DE L'ÉCLAIRAGE

LA nature de la lumière, ce qui varie en elle suivant qu'elle est intense ou faible, blanche ou colorée, la façon dont elle se propage sans affaiblissement notable dans le vide, même sur les immenses distances des espaces interstellaires, la manière dont cette propagation est affectée par la rencontre d'obstacles ou la traversée de milieux matériels, ce sont là des problèmes qui ont depuis bien des siècles préoccupé tous les esprits curieux de mieux comprendre les divers aspects du monde physique.

Certaines constatations durent dès l'abord frapper les précurseurs de l'Optique moderne. Dans le vide et dans les milieux matériels homogènes, on s'aperçoit facilement que la lumière suit dans sa progression des « rayons » lumineux de forme rectiligne et l'on a immédiatement l'impression qu'elle s'écoule le long de ces rayons comme si chacun de ceux-ci était assimilable à une trajectoire que parcourrait quelque élément de lumière. D'une source lumineuse placée au sein d'un milieu homogène, la lumière semble s'élaner en ligne droite dans toutes les directions. D'autre part, quand un rayon de lumière vient frapper un miroir, il se réfléchit exactement comme se brise la trajectoire d'un corpuscule qui vient rebondir sur un obstacle élastique. La réfraction d'un rayon lumineux qui traverse la surface de séparation de deux milieux réfringents évoque la forme brisée qu'aurait la trajectoire d'un corpuscule en traversant cette surface. Comment tout cet ensemble de constatations, qui constitue aujourd'hui pour nous le domaine propre de l'Optique géométrique, aurait-il pu ne pas suggérer à tout esprit réfléchi l'idée que la lumière est formée de corpuscules, de « grains », se déplaçant en ligne droite dans les milieux homogènes avec des vitesses sans doute extrêmement

élevées ? Il est bien naturel que cette conception de la lumière, déjà très en faveur dans l'antiquité (un demi-siècle avant notre ère, Lucrèce l'exprimait très nettement dans son poème philosophique *De natura rerum*), ait été adoptée par la plupart des physiciens jusqu'au XIX^e siècle.

On peut faire remonter au XVII^e siècle l'origine de l'Optique scientifique moderne. C'est, en effet, dans la première moitié de ce siècle que Snell et Descartes ont pour la première fois énoncé, sous une forme mathématique précise, les lois de la réflexion et de la réfraction. C'est peu après que le magistrat-géomètre Fermat a montré que ces lois peuvent être déduites d'un principe général qui porte son nom. Ce principe de Fermat a introduit dans la Physique l'idée nouvelle et féconde que de grandes lois de la nature expriment le fait que certaines grandeurs ont une valeur minimale : il affirme en effet que, dans les phénomènes de l'Optique géométrique, la forme des rayons lumineux est toujours telle que le temps mis par la lumière pour se propager d'un point à un autre le long du rayon est minimal. Entre 1660 et 1670, Bartholin découvre au Danemark le phénomène de la double réfraction du spath d'Islande et Grimaldi à Bologne observe, sans en comprendre la véritable nature, le phénomène de la diffraction de la lumière par le bord d'un écran où l'on voit la lumière contourner le bord de l'obstacle qu'elle rencontre et pénétrer légèrement dans la région de l'ombre géométrique. Vers la même époque, Newton démontre la nature complexe de la lumière blanche en effectuant à l'aide d'un prisme, dans d'admirables expériences, sa décomposition « spectrale » en lumières simples diversement colorées ; puis il découvre les anneaux d'interférences qu'on peut observer sur les lames minces, les anneaux de Newton. Et toutes ces dernières grandes découvertes presque simultanées semblent à peu près impossibles à interpréter avec les idées de l'Optique géométrique et la conception des grains de lumière.

C'est sans doute cette moisson de connaissances nouvelles sur la lumière et la difficulté de les interpréter toutes à l'aide de l'image granulaire qui ont poussé un esprit très original, le grand savant Hollandais Christian Huyghens, à imaginer une nouvelle hypothèse sur la structure de la lumière entièrement différente de celle qui avait prévalu jusqu'alors : il y voit une ondulation qui se propagerait dans un milieu caché à nos perceptions, l'éther, milieu qui pénétrerait tous les corps et

remplirait même les régions de l'espace qui nous paraissent « vides ». Par des raisonnements géométriques d'une grande élégance, encore classiques aujourd'hui, Huyghens montre que cette théorie ondulatoire de la lumière permet d'interpréter non seulement les lois de la réflexion et de la réfraction, mais le phénomène de la double réfraction. Vers la même époque, Newton, bien que restant fidèle à la conception corpusculaire de la lumière, se rend cependant bien compte que le phénomène des anneaux des lames minces, qu'il a lui-même découvert, exige pour son interprétation l'introduction d'un élément périodique et, dans sa remarquable « théorie des Accès », il tente une sorte de synthèse de l'image granulaire et de l'image ondulatoire. Les grains de lumière dont il admet l'existence seraient accompagnés, du moins quand ils traversent la matière, d'une ondulation qui réagirait sur eux : cette réaction aurait pour effet que les corpuscules de lumière passeraient alternativement, à intervalles de temps réguliers, par des « accès de facile transmission » et des « accès de facile réflexion » : arrivant sur la surface de séparation de deux milieux différents, le grain de lumière la franchirait aisément s'il était dans un accès de facile transmission, mais serait au contraire rejeté vers l'arrière s'il se trouvait dans un accès de facile réflexion. Définissant alors une « longueur d'accès » qui est le chemin parcouru par le grain de lumière entre deux accès consécutifs de même nature, Newton obtient une interprétation théorique des anneaux d'interférences, interprétation qui coïncide avec celle obtenue plus d'un siècle plus tard par Augustin Fresnel dans sa théorie ondulatoire de la lumière à la seule condition d'identifier la longueur d'accès de Newton avec la moitié de ce que nous appelons aujourd'hui la longueur d'onde.

On voit ainsi combien en cette fin du xvii^e siècle, après de nombreuses et remarquables découvertes expérimentales dans le domaine de l'Optique, on était prêt à reconnaître non seulement la nécessité d'une théorie ondulatoire de la lumière, mais aussi, ce qui est encore bien plus remarquable, la nécessité d'une synthèse entre le point de vue corpusculaire et le point de vue ondulatoire. Mais toutes ces tentatives restèrent inachevées et, après Huyghens et Newton, comme il arrive parfois dans l'histoire des sciences, l'Optique, après avoir connu une période d'admirables progrès, entre tout à coup dans une longue phase de stérilité qui va durer plus d'un siècle.

Il faut, en effet, attendre jusqu'aux premières années du XIX^e siècle pour voir le médecin Thomas Young reprendre, à l'aide d'expériences nouvelles, l'étude des phénomènes d'interférences et de diffraction, notamment par le célèbre dispositif des « trous d'Young ». Puis le progrès de nouveau se précipite. En 1807 Malus, en France, découvre presque par hasard, la polarisation de la lumière qu'étudieront ensuite des savants comme Biot et Arago.

En 1815, un jeune Polytechnicien, ingénieur des Ponts et Chaussées, Augustin Fresnel, qui jusque là n'avait jamais eu l'intention de se consacrer à la Physique, est victime d'une « épuration » effectuée par le gouvernement des Cent Jours et, destitué de ses fonctions, doit se retirer à la campagne : il occupe ses loisirs à reprendre avec des moyens de fortune l'étude des phénomènes de diffraction et d'interférences : adoptant alors les idées de Huyghens avec l'aide des plus récents progrès de l'analyse mathématique de son époque, il montre que seule la théorie ondulatoire de la lumière parvient à expliquer les apparences que l'on peut observer. Il ne triomphe pas sans peine de l'opposition de savants illustres attachés à la traditionnelle théorie corpusculaire, mais il finit par les forcer à se rallier à ses vues. Terminant avec éclat une courte vie de 39 années abrégée par la phtisie, il complète son œuvre admirable en introduisant dans la théorie ondulatoire l'hypothèse de la transversalité des vibrations lumineuses. Il en tire, par d'admirables raisonnements que reproduisent encore tous nos traités d'Optique, non seulement l'interprétation de la polarisation de la lumière, mais encore une théorie complète de la double réfraction et plus généralement de la propagation de la lumière dans les milieux anisotropes (1).

La seconde moitié du XIX^e siècle a apporté chaque jour des confirmations de plus en plus nombreuses et précises de la théorie ondulatoire de la lumière, mais elle a vu aussi sa réinterprétation sous forme de théorie électromagnétique par James Clerk Maxwell. Je ne puis ici résumer l'œuvre fondamentale de Maxwell et je dois me contenter de dire qu'en ce

(1) Rappelons que, dans la théorie ondulatoire de la lumière, l'intensité lumineuse est mesurée par le carré de l'amplitude de la vibration qui se propage par ondes, tandis que la couleur est déterminée par la longueur d'onde.

qui concerne l'Optique son apport essentiel a été d'avoir identifié la vibration lumineuse de Fresnel à une onde électromagnétique en propagation. Grâce à elle, d'un seul coup, toute l'Optique est devenue un chapitre particulier de l'Électromagnétisme et l'on a pu alors se rendre compte que tout le spectre de la lumière visible par notre œil était contenu dans un très petit intervalle (une octave dans l'échelle des fréquences) de l'immense gamme des radiations électromagnétiques qui, partant des ondes hertziennes très longues aux longueurs d'onde de l'ordre de plusieurs kilomètres, s'étend jusqu'aux Rayons γ des corps radioactifs, dont la longueur d'onde est de l'ordre de 10^{-10} centimètres, en passant par les ondes hertziennes moyennes, courtes et ultra-courtes, l'infrarouge, le visible, l'ultraviolet et les Rayons X (1). Mais si la théorie de Maxwell a ainsi effectué une magnifique synthèse de deux domaines de la Physique, l'Électricité et l'Optique, jusqu'alors entièrement séparés, si, sous la forme de la théorie des Électrons de Lorentz, elle nous a ensuite permis de commencer à mieux comprendre comment s'opèrent les réactions entre les éléments électrisés de la matière et les rayonnements et en particulier de nous représenter l'émission et l'absorption de la lumière par les corps matériels, si enfin, s'étant décidé à abandonner la vieille notion de l'éther support universel des vibrations lumineuses elle a pu trouver sa place dans le cadre de la théorie de la relativité, elle n'a rien changé d'essentiel ni à l'image ondulatoire de la lumière et des radiations admises par les conceptions antérieures de Fresnel, ni à la répartition continue de l'énergie radiante que ces conceptions impliquent. L'idée de corpuscule de lumière lui étant entièrement étrangère, elle ne nous apportait rien d'analogue à l'étonnante synthèse qu'avait entrevue Newton dans la théorie des Accès. Comme elle s'imposait entièrement à leur esprit, les physiciens de la fin du XIX^e siècle admettaient tous, sans réticence aucune, la nature purement ondulatoire et essentiellement continue de tous les rayonnements et en particulier de la lumière : rien n'annonçait encore l'extraordinaire révélation qu'allait être pour eux la découverte de la structure « quantique » des rayonnements.

* * *

(1) L'octave occupée par la lumière visible dans l'échelle des fréquences correspond, on le sait, aux longueurs d'onde comprises entre 0,4 μ et 0,8 μ environ (le μ étant le millième de millimètre).

Vers 1900, dans les laboratoires de Physique, le problème du « rayonnement noir » était à l'ordre du jour. On désigne sous cette appellation, d'ailleurs assez incorrecte, l'étude du rayonnement émis par un corps noir (c'est-à-dire un corps entièrement absorbant pour toutes les longueurs d'onde) maintenu à une température donnée. Dans la nature, il n'y a pas de corps parfaitement noirs, bien qu'il y ait des corps très approximativement noirs dans un domaine étendu de longueurs d'onde ; mais on démontre que dans une enceinte fermée maintenue à la température absolue T , un « four » à température T , il s'établit d'une façon permanente un rayonnement identique à celui qu'émettrait un corps parfaitement noir de température T et ceci donne un sens expérimental précis à la notion de rayonnement noir et en permet l'étude quantitative. Quand les théoriciens se sont occupés du problème du rayonnement noir, ils ont établi par des raisonnements très sûrs de thermodynamique un certain nombre de lois que l'expérience a tout de suite très bien vérifiées. Je ne veux en rappeler que deux. La première est la suivante : la densité d'énergie du rayonnement noir correspondant à la température T , c'est-à-dire l'énergie totale que ce rayonnement contient par unité de volume, croît proportionnellement à la quatrième puissance de la température, donc très rapidement avec T : c'est la loi de Stefan-Boltzmann. La seconde loi dont je veux parler est relative à la distribution spectrale de l'énergie dans le rayonnement noir. L'expérience prouve que toute la gamme des longueurs d'onde est représentée dans le rayonnement noir, une certaine quantité d'énergie revenant à chaque longueur d'onde : la courbe qui représente pour une température donnée la répartition des énergies entre les longueurs d'onde est une « courbe en cloche » présentant un maximum, c'est-à-dire qu'il y a une certaine longueur d'onde pour laquelle l'énergie est maximale. Cette longueur d'onde λ_M est d'ailleurs fonction de la température de sorte qu'il y a un « déplacement » dans le spectre de la longueur d'onde à énergie maximale en fonction de la température. Un raisonnement thermodynamique dû à Wien montre que la relation entre λ_M et T est donnée par la formule :

$$\lambda_M T = C^e$$

C'est la « loi du déplacement » de Wien : l'expérience a permis de la bien vérifier et a, de plus, montré que, si l'on emploie les unités c. g. s. et l'échelle des températures absolues

(échelle Kelvin), la constante du second membre de la relation précédente est égale environ à 0,29. On a donc :

$$\lambda_M T = 0,29 \quad \text{C. G. S. Kelvin}$$

Jusque-là, tout allait bien, mais le problème n'était pas pour autant résolu car le point capital était d'obtenir la répartition spectrale de l'énergie entre les diverses longueurs d'onde présentes dans le rayonnement noir. Soit ν la fréquence d'une composante monochromatique du rayonnement et $d\nu$ un petit intervalle spectral du rayonnement : il s'agissait de trouver, pour le rayonnement noir correspondant à une température T , la quantité d'énergie $\rho(\nu, T) d\nu$ qui revient aux composantes spectrales appartenant à l'intervalle $d\nu$. Mais ici des considérations générales de Thermodynamique ne suffisaient plus. La composition du rayonnement noir contenu dans une enceinte maintenue à une température absolue donnée T résulte en effet d'une infinité d'échanges d'énergie entre le rayonnement lui-même et les parois de l'enceinte ou les corps qu'elle contient, c'est-à-dire d'une sorte de moyenne statistique sur une infinité de processus d'émission et d'absorption du rayonnement par la matière. Or à la fin du siècle dernier la question ainsi posée aux théoriciens de la Physique ne leur paraissait pas très difficile à résoudre parce que la théorie électromagnétique, sous la forme que lui avait donnée Lorentz, semblait permettre d'analyser complètement ces processus d'émission et d'absorption : il suffisait alors, pour obtenir $\rho(\nu, T)$, de prendre une moyenne statistique de tous ces processus en employant les méthodes de la mécanique statistique que l'interprétation statistique de la Thermodynamique avait déjà rendues familières à tous les physiciens. On aboutissait ainsi à une forme mathématique de la fonction $\rho(\nu, T)$ qu'on nomme la loi de Rayleigh-Jeans du nom de 2 physiciens anglais qui l'ont successivement démontrée par des voies différentes. Cette loi de Rayleigh-Jeans est la suivante :

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi}{c^3} k \nu^2 T$$

où c est la vitesse de la lumière dans le vide (dont la valeur est très voisine de 300.000 kilomètres par seconde) et où k est une constante bien connue dans l'interprétation statistique de la Thermodynamique, dont la valeur en unités c. g. s. avec

emploi de l'échelle des températures absolues est $1,37 \cdot 10^{-16}$ erg par degré Kelvin.

Malheureusement le résultat ainsi obtenu ne cadrait aucunement avec les données expérimentales. Pour T donné, la fonction $\rho(\nu, T)$ croîtrait comme ν^2 : la courbe représentant ρ en fonction de ν n'aurait aucunement la forme « en cloche » qu'imposait l'expérience. Qui plus est, la quantité d'énergie présente par unité de volume dans le rayonnement noir, qui doit s'obtenir en prenant l'intégrale de $\rho(\nu, T)$ sur toutes les valeurs de la fréquence, devrait être infinie, ce qui est évidemment inacceptable. L'échec théorique auquel on aboutissait ainsi était très grave car dès l'abord il pouvait suggérer des doutes sur l'exactitude du caractère continu attribué depuis près d'un siècle à la structure des rayonnements et aux processus de leurs émissions et absorptions par la matière.

Vers 1900, très préoccupé de cet échec, un grand savant allemand, Max Planck, qui était un spécialiste de la Thermodynamique et de son interprétation statistique, résolut de reprendre la question de fond en comble. Cet examen le convainquit rapidement qu'il était impossible, en admettant les idées alors régnantes, de justifier une forme de la loi de répartition spectrale du rayonnement noir qui fût raisonnable et conforme à l'expérience : il fallait donc trouver du nouveau, il fallait avoir du génie ! De ce pathétique épisode de sa vie intellectuelle, Planck nous a laissé un émouvant récit : « Après quelques semaines du travail le plus intense que j'aie fourni durant ma vie — a-t-il écrit dans son discours Nobel — l'obscurité commença à s'éclaircir et un horizon entièrement inattendu se mit à poindre devant moi. » Dans un éclair de génie, il venait d'apercevoir la manière de sortir de l'impasse : il fallait admettre que, lors de l'émission ou de l'absorption d'une radiation de fréquence ν par la matière, l'énergie radiante est émise ou absorbée non pas d'une façon continue comme on l'admettait alors, mais sous forme de « grains » d'énergie de valeur $h\nu$, où h est une nouvelle constante universelle ayant les dimensions d'une action au sens de la Mécanique, constante que l'on a toujours désignée depuis sous le nom de « constante de Planck » ou, parfois, de « quantum d'Action ».

L'hypothèse introduite par Planck changeait entièrement la façon dont devaient être appliquées au problème du rayon-

nement noir les méthodes de la Mécanique statistique et pour cette raison conduisait à une autre forme de la fonction $\rho(\nu, T)$. Cette autre forme, la célèbre loi de Planck, est la suivante :

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{\nu^3}{\frac{h\nu}{e^{kT}} - 1} \quad (1)$$

où c et k sont les constantes de valeur bien connue dont nous avons déjà parlé et où h est la nouvelle constante introduite par Planck. Or, en attribuant à la constante h la valeur numérique $6,55 \cdot 10^{-27}$ erg-seconde (on admet plutôt aujourd'hui $6,6 \cdot 10^{-27}$), cette loi nouvelle permettait à Planck de représenter d'une façon parfaite les courbes expérimentales : elle permettait aussi, comme c'était son devoir car elle devait rester en accord avec les raisonnements thermodynamiques généraux, de retrouver la loi de Stefan-Boltzmann et la loi du déplacement de Wien, cette dernière sous sa forme numérique $\lambda_M T = 0,29$. L'accord était complet et il mettait hors de doute l'exactitude de l'hypothèse des Quanta.

Cette révolutionnaire hypothèse des Quanta, après avoir ainsi permis à Planck de trouver la loi expérimentalement exacte donnant la répartition spectrale de l'énergie dans le rayonnement du corps noir, a progressivement pénétré dans toute la Physique de l'échelle atomique et elle est à la base de tout son développement contemporain. Mais on s'est rapidement aperçu qu'elle entraînait une conséquence d'une grande portée que Planck lui-même s'était au début refusé à admettre : en supposant que tout rayonnement monochromatique de fréquence ν est émis et absorbé par quanta d'énergie $h\nu$, elle conduit presque inévitablement à attribuer au rayonnement lui-même une structure granulaire. On peut même considérer la loi de Planck comme résultant d'une répartition statistique entre les diverses composantes spectrales du rayonnement noir de « grains de lumière » d'énergie $h\nu$. Ce fut cette discontinuité de structure du rayonnement qu'admit hardiment le jeune Albert Einstein quand, en 1905, cinq ans

(1) Il est aisé de passer de la répartition $\rho(\nu, T) d\nu$ en fonction de la fréquence à la répartition $\rho(\lambda, T) d\lambda$ en fonction de la longueur d'onde à l'aide de la formule bien connue $\nu = \frac{c}{\lambda}$.

après la découverte de Planck, il donna dans sa théorie des « quanta de lumière » une interprétation surprenante par sa simplicité des mystérieuses lois de l'effet photoélectrique. Je ne m'étendrai pas ici sur cette théorie de l'effet photoélectrique : je me contenterai de dire que son étonnant succès semblait rendre certain que les radiations, émises et absorbées par grains, devaient aussi posséder une structure granulaire pendant qu'elles se propagent à travers l'espace. On aboutissait ainsi nécessairement et sous la pression de l'expérience à la conclusion, bien inattendue à cette époque, que les théories ondulatoires de Fresnel et de Maxwell, nécessaires pour l'interprétation de certains phénomènes lumineux, ne rendaient pas exactement compte de la répartition de l'énergie dans les rayonnements et n'en représentaient, en quelque sorte, qu'un aspect statistique. On se trouvait donc en présence d'un problème extrêmement difficile, entrevu, nous l'avons dit, par Newton dans sa théorie des Accès : celui de coordonner au sein d'une image unique et cohérente les ondes lumineuses et les grains d'énergie radiante, les « photons » comme nous disons aujourd'hui, dont l'existence simultanée se trouvait démontrée par les faits expérimentaux.

Le problème ainsi posé à la sagacité des physiciens était déjà redoutable. Une vingtaine d'années plus tard, vers 1923-27, il allait apparaître dans toute sa généralité quand les idées de la Mécanique ondulatoire, bientôt confirmées par des preuves expérimentales incontestables, nous eurent révélé que toutes les particules de la matière sont attachées à des ondes en propagation par un lien tout à fait analogue à celui qui unit les photons aux ondes électromagnétiques. Aujourd'hui on obtient couramment dans les laboratoires avec toutes sortes de corpuscules matériels, en particulier avec des électrons, des phénomènes d'interférences et de diffraction tout à fait analogues à ceux qu'on connaissait depuis longtemps pour la lumière, à ceux qui avaient paru à Fresnel et à ses continuateurs constituer une preuve indubitable de la nature ondulatoire des rayonnements. Le troublant problème de la dualité des ondes et des corpuscules dans tous les phénomènes physiques se trouvait ainsi posé dans toute son ampleur : malgré l'élégance des formalismes mathématiques dans lequel on l'a enrobé, il est douteux qu'il soit encore entièrement résolu. Ayant réfléchi pendant toute ma vie à ce problème, j'en suis arrivé à croire que la façon dont cette association des ondes

et des corpuscules peut être conçue d'une façon intelligible n'est pas, à l'heure actuelle, véritablement éclaircie : la comprendre reste sans doute une des grandes tâches futures de la Physique théorique. Mais je ne puis insister ici davantage sur une question particulièrement difficile et je veux exposer rapidement quelques-unes des idées que le développement de l'introduction des quanta en Physique nous ont rendues familières et qui ont une importance particulière pour le sujet que je traite.

En 1913, un jeune savant danois, M. Niels Bohr, qui travaillait alors en Angleterre dans le laboratoire de l'illustre Rutherford, parvint à édifier une théorie quantique de l'atome qui pouvait être considérée comme le prolongement naturel des idées de Planck et d'Einstein et qui a marqué une des grandes étapes de l'histoire de la Physique contemporaine. Je ne veux pas exposer la théorie primitive de Bohr et la manière dont les progrès de la Microphysique l'ont ensuite prolongée et transformée et je veux me contenter d'en dégager les deux idées essentielles qui ont survécu à toutes les modifications ultérieures. La première de ces idées essentielles, c'est que tous les édifices matériels de l'échelle microphysique, molécules, atomes et même noyaux d'atomes, possèdent une série discontinue d'états stables à énergie bien déterminée, les états quantifiés ou états stationnaires : c'est l'intervention des quanta qui assure la stabilité de ces états et leur confère un rôle privilégié. La seconde idée essentielle qui complète la première et achève de fournir une base à la théorie, c'est que l'émission d'un rayonnement par un édifice microphysique ne peut se produire que quand cet édifice passe spontanément d'un état quantifié d'énergie W_2 à un état quantifié d'énergie inférieure W_1 : il émet alors brusquement l'énergie qu'il perd sous la forme d'un quantum de radiation de fréquence ν_{21} , c'est-à-dire d'un photon d'énergie $h\nu_{21} = W_2 - W_1$. La formule ainsi obtenue :

$$\nu_{21} = \frac{W_2 - W_1}{h}$$

constitue la « loi des fréquences » de Bohr : elle relie d'une façon remarquablement simple la fréquence de la radiation émise lors de la transition brusque, qui fait passer le système microphysique d'un état quantifié à un autre, aux valeurs de son énergie dans l'état initial et dans l'état final. Le principe

de la réversibilité des phénomènes élémentaires nous impose d'ailleurs de compléter l'image du processus d'émission d'un rayonnement ainsi obtenue par l'image suivante du processus d'absorption : si un édifice atomique est susceptible, entre autres, de 2 états quantifiés d'énergie W_1 et $W_2 > W_1$ et s'il se trouve initialement dans l'état d'énergie inférieure W_1 , il sera susceptible, quand il sera frappé par un rayonnement de fréquence ν_{21} égale à $\frac{W_2 - W_1}{h}$, d'absorber un photon d'énergie $h\nu_{21}$ de ce rayonnement en passant brusquement de l'état quantifié d'énergie W_1 à l'état quantifié d'énergie supérieure W_2 . Ainsi les processus d'émission et d'absorption se trouvent bien être exactement inverses l'un de l'autre.

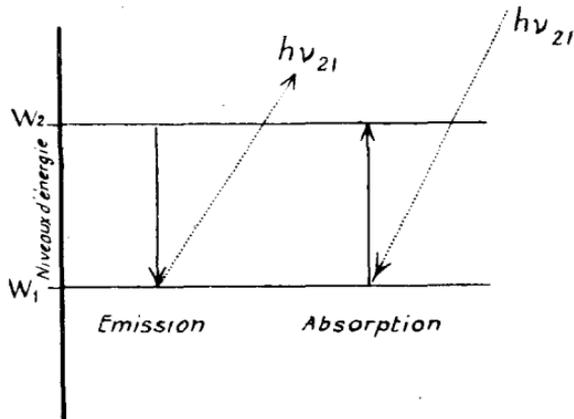


FIG. 1.

Ces conceptions fondamentales de la théorie de Bohr, où la structure quantifiée des atomes et des molécules ainsi que la structure quantique du rayonnement joue un rôle fondamental, sont restée depuis 45 ans à la base de nos connaissances sur l'émission et l'absorption des radiations par la matière. Elles seules ont permis de débrouiller l'écheveau si compliqué des données spectroscopiques, elles seules peuvent nous faire comprendre comment fonctionne une source de lumière. C'est dire l'importance qu'elles ont pour l'interprétation de nombreux phénomènes intéressant la technique de l'Éclairage. Mais je me réserve de revenir plus loin sur ce point et je vou-

drais maintenant insister sur une seule des très nombreuses et importantes conséquences de la loi des fréquences de Bohr.

Considérons un édifice atomique, atome ou molécule, qui possède, comme c'est toujours le cas, une suite d'états stationnaires possibles dont les énergies quantifiées sont par ordre de valeur croissante $W_1, W_2, W_3 \dots W_n$; s'il se trouve initialement dans son état d'énergie minimale W_1 , il pourra éventuellement absorber dans un rayonnement incident de fréquence

$$\nu_{n1} = \frac{W_n - W_1}{h}$$

un photon d'énergie $h\nu_{n1}$ en passant d'un seul coup dans l'état d'énergie W_n . On dit alors que l'atome (ou la molécule) a été « excité » et porté de son état fondamental d'énergie minimale à l'état d'énergie W_n . Si ensuite l'édifice atomique revient directement en une seule transition de l'état W_n à l'état W_1 , il réémettra un photon d'énergie $h\nu_{n1}$ par un processus inverse de celui qu'il a subi précédemment, c'est-à-dire qu'il émettra une radiation de même fréquence que celle qui l'a excité. Mais si, comme cela se produit souvent, il revient de l'état excité d'énergie W_n à l'état fondamental d'énergie W_1 par une suite de transitions successives (en passant par exemple, de W_n à W_5 , puis de W_5 à W_2 et enfin de W_2 à W_1) il ne pourra émettre dans ces transitions successives que des radiations dont la fréquence sera inférieure à celle de la radiation qui l'avait excité. Tout se passe comme si le gros quantum d'énergie $h\nu_{n1}$ primitivement encaissé par l'atome était ensuite « monnayé » par lui sous forme de quanta plus petits. C'est là une conséquence nécessaire de la nature quantique de la lumière et de la loi des fréquences de Bohr qui lui est intimement liée. Nous pouvons énoncer ce résultat en disant : « Un système atomique qui, partant de son état normal d'énergie minimale, passe dans un état excité d'énergie supérieure sous l'action d'une radiation de fréquence ν ne peut ensuite réémettre spontanément que des rayonnements dont la fréquence est inférieure, ou au plus égale, à la fréquence ν . » Les radiations émises par une source de lumière ont une tendance constante, par suite de leurs interactions avec la matière, à se fractionner en radiations de fréquences moindres; en termes plus brefs, il y a une tendance constante à la « dégradation des fréquences ». C'est là ce que l'on nomme « la loi de Stokes » qui régit tous les phénomènes de photoluminescence et en particulier ceux de fluorescence. Nous en reparlerons bientôt.

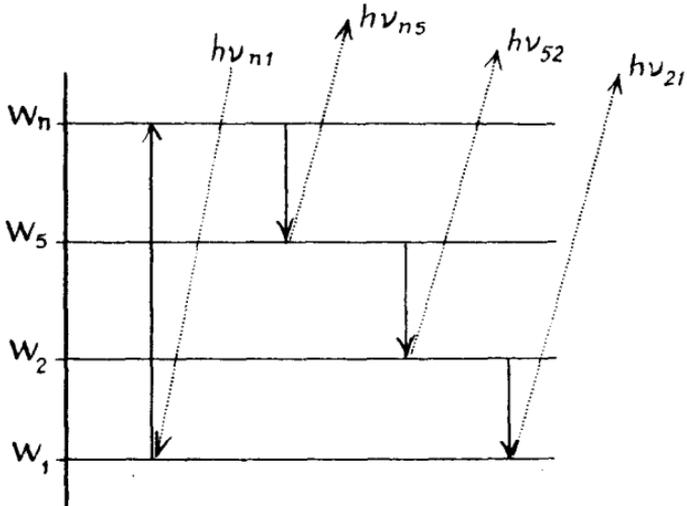


FIG. 2.

* * *

Toutes les considérations que je viens de développer se rattachent au caractère granulaire de la lumière et des radiations en général. Elles présentent, ai-je besoin de le dire?, un très grand intérêt théorique, mais elles sont loin d'avoir uniquement un intérêt académique car elles ont aussi aujourd'hui une très grande importance pratique. Sans parler des applications techniques, devenues innombrables aujourd'hui, de phénomènes, tel l'effet photoélectrique par exemple, où la structure quantique de la lumière intervient essentiellement, je veux considérer seulement la technique de l'éclairage.

Pour cette technique, ce sont les propriétés corpusculaires et quantiques de la lumière qui présentent le plus d'importance. Elle n'a guère, semble-t-il, utilisé jusqu'ici les propriétés spécifiquement ondulatoires de la lumière (les phénomènes d'interférences par exemple), mais, depuis longtemps, elle utilise les phénomènes de l'optique géométrique qui, nous l'avons vu, sont très directement reliés à la conception granulaire de la lumière. Depuis les « miroirs ardents » d'Archimède jusqu'aux formes les plus modernes des projecteurs en passant par les phares lenticulaires de Fresnel, elle n'a pas cessé d'utili-

ser les miroirs et les lentilles, c'est-à-dire toutes les ressources de la dioptrique et de la catoptrique. Mais, si ceci est tellement évident qu'il n'est guère la peine d'y insister, il est sans doute plus intéressant de montrer à quel point, à l'époque contemporaine, la technique de l'éclairage a tiré profit du progrès de nos connaissances sur la nature quantique de la lumière elle-même et des processus matériels discontinus grâce auxquelles elle apparaît, disparaît ou se transforme.

Pour aborder ce sujet, il me semble intéressant de dire d'abord quelques mots sur la nature des « sources » de lumière. Il est essentiel de bien distinguer à ce sujet les sources constituées par des corps solides portées à l'incandescence et celles formées par des gaz ou des vapeurs dont les atomes ou molécules émettent de la lumière sous l'influence d'excitations thermiques ou électriques.

Pour les solides incandescents, l'émission de lumière a lieu, en général, essentiellement sous forme d'un spectre continu où sont présentes en principe toutes les longueurs d'onde, avec naturellement des intensités différentes. Cette émission continue a son origine dans l'agitation thermique des électrons contenus dans le corps incandescent : ces électrons éprouvant continuellement des variations d'énergie dues aux chocs ou aux perturbations qu'ils subissent dans le solide : ces variations d'énergie, suivant qu'elles sont négatives ou positives, s'accompagnent de l'émission ou de l'absorption d'un quantum de radiation, d'un photon, et le résultat statistique de tous ces processus élémentaires est finalement le rayonnement à l'extérieur par le solide incandescent d'une radiation présentant un spectre continu. On peut alors se rendre compte que, si le solide incandescent est assimilable à un « corps noir », la composition spectrale de la lumière qu'il émet sera donnée par la formule de Planck correspondant à la température qu'il a atteinte, formule essentiellement reliée, nous le savons, à la structure quantique de la lumière. Assurément les corps solides incandescents ne sont pas en général de véritables corps noirs et n'émettent pas exactement comme le voudrait la loi de Planck, mais celle-ci nous donne cependant, en général, de précieuses indications sur la forme approximative du spectre de fréquences qu'ils émettent et sur la position dans l'échelle des longueurs d'onde du maximum de leur émission. Je revien-

drai tout à l'heure sur les importantes conséquences que cette circonstance présente dans la technique de l'éclairage.

Passons maintenant aux sources formées de gaz ou vapeurs excités thermiquement ou électriquement. Ici l'émission provient essentiellement de « l'excitation » (au sens que j'ai indiqué précédemment) des atomes ou des molécules du gaz ou de la vapeur sous l'action des chocs qu'ils subissent par suite de l'agitation des autres particules présentes par effet de température ou de l'accélération des ions présents dans un champ électrique provoquant une décharge électrique. Porté ainsi à un état stationnaire excité, l'édifice atomique revient ensuite vers son état normal par une suite discontinue de transitions brusques accompagnées chacune par l'émission d'une longueur d'onde déterminée conformément aux conceptions de Bohr. Le spectre émis sera donc essentiellement un spectre discontinu, un spectre de « raies ». Et le fonctionnement d'une source de ce genre ne pourra être véritablement compris, la complexité du spectre qu'elle émet ne pourra être interprétée qu'en tenant compte, conformément aux idées de Planck et de Bohr, de la nature quantique de la lumière et des processus discontinus qui la font naître.

Reprenons maintenant de plus près la question de l'éclairage par les corps solides incandescents. La répartition spectrale continue du rayonnement émis par un tel corps est représentée par une courbe en cloche dont la forme est, en gros, analogue à celle que prévoit la loi de Planck. La majeure partie de l'énergie de ce rayonnement se trouve concentrée dans un intervalle spectral assez étroit centrée sur la longueur d'onde λ_M qui correspond à la densité spectrale maximale et cette longueur d'onde λ_M est approximativement reliée à la température T du corps incandescent par la formule du déplacement de Wien $\lambda_M T = 0,29$ C. G. S. degré Kelvin, qui, nous l'avons vu, est une conséquence de la loi de Planck. On voit donc que la formule de Planck et en particulier la loi de Wien qui en découle vont pouvoir fournir dans beaucoup de cas à l'éclairagiste des renseignements sinon tout à fait exacts, tout au moins assez approchés.

C'est ici qu'apparaît l'écueil de l'éclairage par incandescence. Notre œil est surtout sensible aux composantes jaunes ou vertes de la lumière visible : pour les extrémités rouges et

violettes du spectre, sa sensibilité est bien moindre et elle disparaît dans l'infrarouge et l'ultraviolet. D'où cela provient-il? Sans aucun doute du fait que, douées d'un pouvoir d'adaptation qui reste bien mystérieux, les espèces vivantes au cours de leurs apparitions et de leurs évolutions, se sont adaptées au milieu extérieur au sein duquel elles vivaient. Baignés par la lumière du soleil, les animaux supérieurs et l'homme ont adapté leur vision aux radiations qu'il recevaient. Or la surface du soleil rayonne approximativement comme celle d'un corps noir dont la température serait voisine de 6.000° et la loi du déplacement de Wien nous apprend que, dans ce rayonnement solaire, la longueur d'onde de densité spectrale maximale est voisine de 5.10^{-4} cm ou $0,5 \mu$: elle est bien située dans la région jaune-vert et correspond au maximum de sensibilité de l'œil humain. Il en résulte que, pour qu'une source lumineuse ait un bon rendement en lumière visible, c'est-à-dire pour qu'une très forte proportion de l'énergie radiante qu'elle émet soit concentrée dans la région spectrale où notre œil est sensible, il faudrait que cette source soit à une température d'environ 6.000 degrés. Des sources ayant localement des températures de cet ordre ne sont pas irréalisables sur la terre et la cratère de certains arcs électriques peuvent s'en approcher : mais ces sources à température très élevée sont très intenses et éblouissantes et leur fonctionnement est parfois instable. Ces circonstances font qu'elles sont plutôt réservées pour des usages spéciaux (projecteurs, phares...) et que, pour les usages courants et en particulier pour les usages domestiques, la source courante de lumière est aujourd'hui la lampe électrique à filament incandescent. Mais, et c'est ici qu'apparaît l'écueil dont je parlais tout à l'heure, on ne peut élever la température du filament d'une lampe à incandescence au-delà d'une valeur d'au plus 3.000 degrés absolus sous peine de voir ce filament se désagréger et fondre. La loi du déplacement de Wien indique que le rayonnement d'un tel filament aura sa densité spectrale maximale pour une longueur d'onde au moins de l'ordre de 1μ , c'est-à-dire située dans le proche infrarouge. C'est donc dans le proche infrarouge que le filament émettra, sans aucun profit pour notre vision, la plus grande partie de son rayonnement : une très faible partie seulement de ce rayonnement émise sur des fréquences plus élevées se trouvera comprise dans le spectre de la lumière visible. Le rendement énergétique de la lampe à filament incandescent en lumière visible sera donc toujours très faible. Il est facile et classique

de chiffrer ce très faible rendement. Si une puissance d'un watt était entièrement transformée en lumière visible, elle produirait un flux lumineux d'environ 600 lumens. Or dans les lampes à incandescence usuelles, on n'obtient guère que 10 à 15 lumens, exceptionnellement 20 lumens, par watt, ce qui correspond à des rendements compris entre 1,5 et 3,5 pour cent.

Ce sont là des rendements énergétiques très faibles et qu'il paraît bien difficile d'augmenter beaucoup dans l'éclairage par lampes électriques à filament incandescent parce qu'ils sont liés à la nature des choses. Si l'humanité s'était développée au cours des millénaires sous un éclairage de lampes à incandescence et non sous celui du soleil, sans doute notre œil aurait-il son maximum de sensibilité dans la région de 1μ et alors le rendement de nos lampes en énergie radiante visible par notre œil serait excellent. La question étant présentée de cette façon, la raison profonde du mauvais rendement de nos sources lumineuses nous apparaît clairement.

On sait d'ailleurs que le lamproye, vulgairement appelé « ver luisant », humble insecte qui brille faiblement dans l'ombre pendant les nuits d'été, bat au point de vue du rendement tous les records dans le domaine de l'éclairage. La lumière qu'il émet est en vérité extrêmement faible, mais elle est entièrement concentrée dans le spectre visible de sorte que le rendement énergétique en lumière visible est ici égal à l'unité. Nouvel exemple des facultés d'adaptation des êtres vivants!

Passons maintenant aux sources de lumière qui utilisent des gaz ou vapeurs dont les atomes sont portés à des états divers d'excitation, en général provoquée par une décharge électrique. Ces décharges peuvent suivant les types de lampes se produire sous plus ou moins haute tension, avec ou sans dispositif spécial pour l'amorçage de l'arc. Ce qui nous intéresse ici, c'est que l'émission est due à des processus de transitions quantiques subies par les atomes présents dans le gaz ou le mélange de gaz qui est contenu dans le tube où se produit la décharge.

Le rayonnement qui sort du tube est donc formé par un spectre de raies correspondant aux divers états stationnaires possibles des atomes qui les ont émises et l'impression que ce rayonnement produit sur notre œil, et en particulier sa colo-

ration, dépend de l'intensité relative des différentes raies dont il est formé. Et comme cette intensité relative des raies dépend de la plus ou moins grande probabilité d'excitation des états stationnaires qui leur donnent naissance, elle-même fonction des conditions de la décharge, on peut en faisant varier ces conditions modifier dans de certaines limites l'intensité et la coloration de la lumière émise. Je n'entrerai pas ici dans des détails techniques sur les innombrables et très diverses applications qu'à l'aide de toutes sortes d'artifices ingénieux a permis l'emploi des tubes à décharge. Je me contenterai de noter que la lumière de tubes à décharge, quand on les emploie sans les artifices spéciaux dont je parlerai tout à l'heure, a une composition spectrale qui s'écarte beaucoup de celle de la lumière solaire à laquelle notre œil est adapté : d'une coloration parfois agréable, mais toujours assez prononcée, elle ne contient pas certaines composantes spectrales auxquelles notre œil est habitué et il en résulte pour nous des sensations déconcertantes et parfois déplaisantes : le coloration rouge-orangé, très belle d'ailleurs, de la lumière des tubes au néon surprend ceux qui ne l'ont jamais vue et la teinte violacée de la lumière de l'arc au mercure, qui éteint tous les rouges, donne aux gens et aux choses un aspect cadavérique fort peu plaisant. Les autres tubes à décharge, comme ceux qui utilisent la vapeur de sodium, ont des défauts analogues. Aussi ce genre de sources lumineuses est-il presque exclusivement réservé aux éclairages de publicité ou de décoration auxquels ces sources sont d'ailleurs souvent magnifiquement adaptées.

Cependant certains tubes à décharge peuvent être aujourd'hui couramment utilisés pour l'éclairage usuel grâce à l'emploi des tubes luminescents. Il s'agit là d'un des plus remarquables progrès qu'ait accomplis depuis un quart de siècle la technique de l'éclairage, progrès auquel restent en France particulièrement attachés les noms de M. Risler et du regretté André Claude. Si dans un tube à vapeur de mercure les atomes de mercure émettent ce spectre visible fortement teinté en violet dont je parlais tout à l'heure, ils émettent aussi avec une grande intensité des raies ultraviolettes évidemment inutilisables pour l'éclairage et, de plus, totalement absorbées par les parois en verre du tube à décharge. L'idée essentielle de l'éclairage par fluorescence est d'utiliser pour l'éclairage ce puissant rayonnement ultraviolet en le transformant en un rayonnement du spectre visible et pour cela de faire intervenir ce

phénomène de dégradation des fréquences exprimé par la loi de Stokes qui est, nous l'avons vu, une conséquence immédiate de la nature quantique des rayonnements. En revêtant l'intérieur des parois d'un tube à vapeur de mercure d'une substance fluorescente, on peut transformer une partie importante de son rayonnement ultraviolet en lumière visible. On a l'avantage de pouvoir réaliser ainsi un rendement lumineux très sensiblement supérieur à ceux que l'on peut obtenir avec des lampes à incandescence : on peut, en effet, par ce procédé, obtenir jusqu'à 50, 60 ou même 80 lumens par watt, c'est-à-dire des rendements de 10 à 12 pour cent, près de 4 fois supérieurs aux rendements des meilleures lampes à filament. Les tubes à fluorescence ont aussi l'avantage qu'en utilisant pour le revêtement fluorescent intérieur des parois du tube des mélanges de substances convenablement choisies, on peut obtenir toute une gamme de lumières réémises présentant des colorations douces et agréables à l'œil que nous connaissons tous. Sans insister davantage sur cette technique des tubes fluorescents, je veux encore une fois souligner qu'elle constitue une magnifique application du phénomène de la dégradation quantique des fréquences.

Les phénomènes de fluorescence dont nous venons de voir l'utilisation sont des phénomènes de « photoluminescence » (ou émission de lumière provoquée par la lumière, donc par des photons). Il y a d'autres phénomènes de luminescence : ceux de « triboluminescence » ou émission de lumière résultant du broyage d'un solide, observés par exemple quand on casse du sucre dans l'obscurité, ceux de « chimiluminescence » qui accompagnent des phénomènes chimiques (c'est sans doute à cette catégorie qu'appartient le rayonnement très faible, mais de rendement unité, du ver luisant). Il y a aussi les phénomènes d'électroluminescence assez récemment découverts et étudiés par M. Destriau. Certains de ces phénomènes, notamment les derniers, recevront peut-être un jour des applications dans l'art de l'éclairage.

* * *

Je terminerai ici cette brève incursion dans le domaine de la technique de l'éclairage où j'ai seulement eu l'intention de montrer combien est importante, pour la bonne compréhension des phénomènes qu'elle utilise aujourd'hui, la découverte de

la structure quantique de la lumière et des processus qui la font naître ou la transforment. Et je voudrais pour finir tirer de l'exposé que je viens de faire devant vous deux conclusions, de nature d'ailleurs assez différente, qui me paraissent s'imposer.

La première de ces conclusions est relative aux conditions de la découverte scientifique dans le domaine théorique. Nous avons vu la découverte de la nature corpusculaire de la lumière et du caractère quantique des phénomènes d'émission et d'absorption, si importante au point de vue des conceptions de la physique générale, si importante aussi pour notre compréhension de multiples phénomènes susceptibles de nombreuses applications notamment dans la technique de l'éclairage découler d'une intuition géniale de Max Planck développée ensuite par les travaux d'Einstein et de Bohr. Souvenez-vous de ce que dit Planck quand il nous raconte qu'après une longue période de travail intensif et solitaire, il a tout à coup aperçu, dans une illumination soudaine, la nature discontinue des processus d'émission du rayonnement et l'existence du quantum d'Action. Les leçons de l'histoire des Sciences nous montrent que les grandes découvertes, tout au moins dans le domaine théorique, se sont toujours effectuées de cette façon : un grand chercheur, obsédé par un problème dont il a reconnu l'importance, aperçoit tout à coup, dans un acte essentiellement individuel, un aspect très caché de la réalité physique. Ceci nous montre, je le crois du moins, que, tout en reconnaissant la valeur du travail en équipe et de la recherche dirigée dont on parle beaucoup aujourd'hui, il convient de ne pas surestimer leur valeur. Certes le travail en équipe et la recherche dirigée ont une grande importance dans la science et la technique contemporaines. Indispensables dans le cas de recherches industrielles, très utiles aussi dans nos laboratoires modernes de science expérimentale qui dans beaucoup de cas sont devenus comme de petites usines, il ne sauraient suffire : la valeur du chef d'équipe, l'initiative et l'intuition individuelles du chercheur restent des facteurs primordiaux du succès. Mais dans le domaine théorique, c'est vraiment l'effort individuel, souvent solitaire, qui me paraît la chose la plus essentielle. Les plus grandes découvertes dans ce domaine ont été faites dans le secret d'une pensée vigoureuse. Il en a été ainsi dans le passé : tout me porte à croire qu'il en sera de même dans l'avenir.

La seconde de mes conclusions sera de souligner combien les grandes découvertes, même quand elles sont faites par des chercheurs qui n'ont en vue aucune application pratique et qui se sont posé des problèmes d'une façon purement spéculative, ont eu rapidement ensuite des applications dans le domaine technique. Certes Planck, quand il a découvert la nature quantique de la lumière et des processus d'émission, quand il a écrit pour la première fois la formule qui porte son nom, ne pensait nullement à la technique de l'éclairage : il ne se doutait pas que le grand effort de pensée qu'il venait d'accomplir allait nous permettre de comprendre et de prévoir un nombre considérable de phénomènes dont la technique de l'éclairage allait faire, rapidement et de plus en plus, usage. Quelque chose d'analogue m'est arrivée : lorsqu'en 1923 j'ai aperçu, assez subitement aussi, les idées fondamentales de la Mécanique ondulatoire, j'étais uniquement préoccupé d'approfondir le mystère du double aspect corpusculaire et ondulatoire de la lumière et de la matière : j'ai été extrêmement surpris de voir les conceptions que j'avais élaborées recevoir très rapidement des applications concrètes dans les techniques de la diffraction des électrons et de la microscopie électronique. Montaigne écrivait jadis : « C'est un grand ornement que la Science » et il ajoutait aussitôt : « et c'est un outil de merveilleux service ». Ce sont là, en effet, les deux aspects inséparablement unis, l'un intellectuel, l'autre pratique, de la connaissance scientifique.
