

CHAPITRE II.

LA THÉORIE DES QUANTA

§ 1. — L'hypothèse des quanta.

A l'époque où Lorentz faisait triompher sa théorie, on essayait de se représenter la nature intime de la matière. L'étude des propriétés physiques et chimiques des corps avait mis en évidence l'existence de l'atome; l'électron de Lorentz venait compléter cette notion. Mais il faut bien dire que, malgré ces découvertes, les opinions des physiciens sur l'éther, sur la matière, sur la lumière et sur les liens mutuels de ces trois éléments étaient quelque peu incertaines. Et plus on se dirigeait vers l'infiniment petit pour comprendre le fond des choses, plus la confusion croissait.

Cette marche vers l'atome et vers l'électron avait été féconde dès ses débuts; certes, elle expliquait les phénomènes nouveaux, mais diminuait considérablement l'influence de la théorie des ondulations. Elle fut le point de départ de ce qu'on peut appeler « La Physique du discontinu », qui commença avec le xx^e siècle. Il semble en effet que, pour certains phénomènes dont nous allons parler, l'énergie émise ou absorbée par la matière ne le soit plus d'une manière continue mais par sauts brusques;

voilà bien de quoi bouleverser toute l'ancienne physique.
« On admettait, nous dit L. de Broglie, d'accord avec la
« théorie des ondulations, qu'une source de lumière émet
« sa radiation progressivement et d'une façon continue,
« tout comme un diapason vibrant imprime d'une fa-
« çon continue l'ébranlement sonore à l'air environnant.
« Cette hypothèse était l'origine du conflit de deux phy-
« siques et, pour arriver à des résultats conformes aux
« faits, il fallait, Planck le montra et plus tard Henri Poin-
« caré le vérifia à nouveau, admettre tout au contraire
« qu'une source de lumière émet de l'énergie radiante par
« quantités finies et égales par quanta. Ces quanta d'ail-
« leurs ont une valeur proportionnelle à la fréquence de
« la source ; en d'autres termes, chaque couleur a son
« quantum » (1).

Cette doctrine, conception extrêmement hardie de Planck, marque le début d'une véritable révolution. Nous verrons qu'elle explique un grand nombre de phénomènes et que, par ce fait même, elle transforme complètement la physique.

Quels sont les phénomènes qui suscitèrent cette conception ? Tout d'abord la photo-électricité découverte par Hertz en 1887. L'effet « photo-électrique » se produit lorsqu'on éclaire un conducteur avec des radiations de courte longueur d'onde ; ce conducteur se charge positivement. Des électrons sont expulsés et l'énergie cinétique correspondant à cette expulsion a une valeur fixe indépendante de l'intensité de la lumière incidente, mais fonction de la fréquence. On s'est dit tout d'abord de-

1. LOUIS DE BROGLIE, *op. cit.*, p. 16

vant ce phénomène que le corps éclairé emmagasine l'énergie que lui apportent les ondes électromagnétiques, et que lorsque cette accumulation est suffisante elle provoque le départ d'un électron. Ce raisonnement ne se maintient pas devant l'expérience; on a pu opérer avec des intensités si faibles qu'il eût fallu un temps extrêmement long pour créer cette réserve correspondant à un électron, alors que l'effet photo-électrique est un phénomène instantané. La théorie des ondulations est donc en défaut. La théorie de l'émission serait plus apte à l'expliquer en gros, mais elle est en contradiction avec ce fait que l'énergie, prise par un seul électron pour une fréquence donnée, est indépendante de l'intensité. « Les lois de ce phénomène ne peuvent guère s'interpréter qu'en admettant une structure atomique de la lumière; le morceau de matière irradiée serait atteint successivement par les quanta de la radiation incidente comme une cible est atteinte successivement par les projectiles d'une même salve » (1).

Les autres phénomènes enveloppés de mystère sont ceux qui se rattachent à l'émission ou à l'absorption de lumière par la matière. « L'opposition de la théorie avec l'expérience se présente ici sous une forme aiguë, violente, que permet de constater l'expérience la plus immédiate dans le domaine du rayonnement thermique » (2). Prenons en effet un four en équilibre de température c'est-à-dire dont le rayonnement est tel que pour chaque fréquence il y ait compensation complète

1. LOUIS DE BROGLIE, *op. cit.*, p. 16.

2. P. LANGEVIN, *L'orientation actuelle des sciences*. Paris, 1930, Alcan, p. 47.

entre ce qui est absorbé et ce qui est émis par les parois.
« Le résultat théorique contre toute attente se montre
« non seulement en contradiction flagrante avec les faits,
« mais présente ce caractère absurde d'exiger une den-
« sité d'énergie rayonnante et linéairement croissante
« avec la fréquence et par conséquent une densité totale
« de rayonnement infinie à toute température. L'expé-
« rience, au contraire, conduit, pour le rayonnement en
« équilibre à l'intérieur d'un four, à une densité d'éner-
« gie totale finie, et conformément à la loi thermodyna-
« mique de Stefan Boltzmann, proportionnelle à la qua-
« trième puissance de la température absolue » (1).

Cette dernière contradiction a été mise en évidence par Max Planck en 1900 qui n'hésita pas à abandonner la théorie électromagnétique qui se trouvait en défaut pour essayer d'expliquer ce phénomène touchant de près le problème délicat des échanges d'énergie entre la matière et le rayonnement. Chwolson nous dit à ce sujet « une idée d'une hardiesse invraisemblable vint à l'es-
« prit de Planck et à ce moment il saisit d'une main puis-
« sante la barre du gouvernail de ce navire qu'est la phy-
« sique; et ce navire partit dans une direction nouvelle
« à travers une étrange région tantôt éclairée d'une vive
« lumière, tantôt recouverte d'un brouillard épais, et jus-
« que-là inconnue. Et jusqu'ici il est impossible de savoir
« où il se dirige et quand le brouillard se dissipera » (2).

Il faut supposer que ces échanges d'énergie se font de manière discontinue, et cette hypothèse que l'on verra

1. P. LANGEVIN, *op. cit.*, p. 48.

2. D. O. CHWOLSON, *La Physique de 1914 à 1926*. Paris, Hermann, 1927, t. I, p. 26.

si féconde par la suite, paraissait évidemment bien scabreuse à cette époque. Le savant dut abandonner certaines de ses idées les plus chères, si belles dans leur simplicité, si fortifiées par le temps ; il fallut remplacer le continu par le discontinu. Suivons donc Planck dans ses hypothèses. Selon lui, l'énergie rayonnante possède une structure non pas continue mais granulaire, atomique, et la grandeur de ces grains d'énergie E est proportionnelle à la fréquence ν des radiations suivant la loi de simple proportionnalité :

$$E = h\nu$$

h étant une constante fondamentale que Planck parvint dès son premier mémoire à déterminer avec précision. Il put en même temps évaluer indirectement, mais avec une exactitude que l'expérience directe ne devait atteindre que dix ans plus tard, la charge de l'électron et le nombre d'Avogadro. Ce fut l'origine de la théorie des quanta (1900-1901).

Un quantum représente l'atome ou le grain d'énergie. On a vu ci-dessus qu'il diffère essentiellement des atomes de matière et d'électricité en ce qu'il n'a pas une grandeur invariable puisqu'il dépend de la fréquence. Les idées révolutionnaires de Planck ne furent prises en considération que plusieurs années plus tard. Leurs bases ne paraissaient pas suffisamment solides ; les théories classiques imprégnaient encore tous les esprits qui s'y maintenaient.

§ 2. — Les quanta de lumière ou photons.

C'est Einstein, qui le premier, jugea de leur importance. Nous verrons la portée de ces hypothèses au point de vue de la conception de la lumière, et nous verrons qu'elles nous conduisent à supposer que cette lumière est répartie de façon discontinue dans l'espace, ce qui peut paraître étrange de prime abord.

Einstein accepte l'hypothèse de Planck relative à l'émission et à l'absorption d'énergie rayonnante par quanta. Le problème qui se pose alors à ses yeux est le suivant : Que se passe-t-il dans l'espace séparant le corps qui émet des quanta et le corps qui en reçoit ? L'énergie qui se trouve dans cet espace revêt-elle une forme continue ? Non, répond Einstein qui exprime cette idée hardie « que le flux d'énergie rayonnante consiste en quanta « distincts nullement unis entre eux et volant avec la « vitesse de la lumière. Ces quanta représentent quelque « chose dans le genre d'atomes d'énergie rayonnante et « on les nomme des Quanta de lumière, bien que la pen- « sée de Einstein se rapporte à tous les cas d'énergie « rayonnante et non seulement à la lumière visible. Ici « nous avons un retour évident à la théorie newtonienne « de l'émission de la lumière, toutefois cette différence « essentielle que les particules de lumière ou plus exac- « tement d'énergie rayonnante peuvent contenir des « quantités d'énergie qui diffèrent sans limites, dépen- « dantes de la grandeur ν caractéristique pour chaque « espèce de particules » (1).

1. D. O. CHWOLSON, *op. cit.*, t. I, p. 42.

Cette théorie, proposée par Einstein en 1905, explique un grand nombre de phénomènes lumineux. Après avoir passé en revue les plus importants, nous verrons quels assauts elle a subi de la part des autres théories. Ce n'est vraiment qu'entre 1925 et 1930 qu'elle a réussi à s'imposer; des faits nouveaux ne purent être expliqués que grâce à l'existence de ces grains de rayonnement que l'on appelle photons.

Quels sont les phénomènes lumineux qui peuvent être expliqués par la théorie des quanta de Planck-Einstein?

Ce sont ceux qui sont liés à l'émission et à l'absorption de l'énergie rayonnante et qui se produisent dans les atomes et les molécules de matière; citons d'abord l'effet photo-électrique qui, nous le savons, attendit longtemps son explication. Rappelons brièvement que les corps soumis à l'action d'un rayonnement émettent des électrons dont le nombre est fonction de l'intensité du rayonnement et dont la vitesse est déterminée seulement par la fréquence. L'interprétation de ce phénomène est la suivante, réduite à la plus simple expression. On admet que chaque grain du rayonnement incident possédant l'énergie $h\nu$ provoque l'expulsion d'un électron du métal dont la vitesse v est donnée par la relation d'Einstein ;

$$h\nu = \frac{1}{2} mv^2$$

Dans cette formule, m est la masse de l'électron expulsé. L'énergie quantique $h\nu$ est donc transformée en énergie cinétique, ce qui cadre bien avec l'expérience.

Nous voyons la réciproque de ce phénomène dans l'émission des rayons X, découverts par Röntgen en 1895.

Si l'on arrête brusquement un électron possédant une grande vitesse, il y a transformation de son énergie cinétique en énergie rayonnante de très grande fréquence, comme on le voit en lisant la relation d'Einstein de la droite vers la gauche.

§ 3. — La théorie de Bohr et la lumière.

C'est toujours en se servant de ces quanta que Bohr est parvenu à donner en 1913 une explication simple de la structure des spectres de la lumière émise par les vapeurs incandescentes. Rutherford avait donné une idée de la constitution de la matière, suffisamment exacte pour expliquer les principaux faits. L'électron, tel qu'il le conçoit, est en mouvement rapide autour du noyau positif de l'atome. Il produit donc d'après Lorentz, les mêmes effets qu'un courant électrique, et il serait l'origine de la perturbation donnant naissance aux ondes électromagnétiques. Mais émettant constamment de l'énergie, il doit perdre sa vitesse et se rapprocher indéfiniment du noyau. L'atome serait donc un système instable, ce qui est inacceptable. Bohr abandonne ces idées ; pour lui, il existe pour chaque électron satellite du noyau un certain nombre de trajectoires pour lesquelles l'énergie qu'il rayonne est nulle. La stabilité existe dans ces conditions. Supposons maintenant qu'un électron, sous l'influence de certaines perturbations vienne à passer d'une orbite stationnaire sur une autre plus rapprochée du noyau, il perd de l'énergie ; il y a rayonnement. Si, au contraire, il s'éloigne du noyau, il y a absorption.

Ces hypothèses ont été vérifiées par Bohr, et l'admiration due à sa théorie, si belle dans sa simplicité, fut d'autant plus grande qu'il s'agissait là d'un problème extrêmement important pour la connaissance de la constitution de la matière. Les rapports de ce problème avec les phénomènes de la lumière sont du reste évidents.

On remarquera qu'au cours du développement de sa théorie, Bohr pose une équation qui se trouve être l'inverse précisément de celle d'Einstein. Autrement dit, Einstein et Bohr ont énoncé l'un et l'autre une relation réciproque et réversible entre l'énergie électronique et l'énergie rayonnante. Nous ajouterons qu'à partir de ce moment le brouillard s'est dissipé en grande partie sur les phénomènes touchant la constitution de la matière et presque totalement sur ceux relatifs aux échanges d'énergie entre la matière et le rayonnement. Tous ces phénomènes sont régis par une théorie corpusculaire « qui ressuscite la théorie de l'émission de Newton sous « une forme modifiée au point de vue énergétique. Mais « ce qui avait en son temps empêché le développement « ultérieur de la théorie de l'émission de Newton, à sa- « voir le phénomène d'interférence, est encore la cause « de l'accumulation des mêmes difficultés devant la « théorie des quanta de lumière » (1).

Nous verrons, en effet, dans le prochain chapitre, renaître la dualité des deux grandes théories, ondulation et émission, qui expliquent à elles deux tous les phénomènes mais qui, prises séparément, se montrent bien impuissantes. A ce sujet, Eugène Bloch nous dit : « que

1. Max PLANCK, *La nature de la lumière*, trad. française par Kerime, Refik. Paris, Blanchard, 1927, p. 22.

« la dualité semble s'étendre à l'ensemble du monde
« physique que nous connaissons. Ce monde ne se ma-
« nifeste à nous que sous forme de matière ou de rayon-
« nement. Chacune des deux entités nous semble formée
« de particules, les électrons et les photons et chacune
« de ces espèces de particules nous apparaît tantôt avec
« des propriétés que nous sommes habitués à considérer
« comme caractéristiques de la matière (masse, quantité
« de mouvement...) tantôt, au contraire, sous un aspect
« que nous rattachons d'ordinaire à la radiation (lon-
« gueur d'onde). Il serait désirable de comprendre la
« cause de cette dualité et, si possible, de chercher si elle
« ne masque pas à nos yeux une unité réelle » (1).

Ce qu'il y a de remarquable dans la théorie des quanta c'est la difficulté de compréhension de l'hypothèse. Les résultats qu'elle donne cadrent avec l'expérience, mais c'est l'hypothèse elle-même qui nous étonne et cela explique qu'elle ne s'est imposée que difficilement. La théorie des quanta est « dans une position inverse de la
« plupart des théories physiques. Celles-ci, en général,
« partent des principes clairs et distincts et révèlent une
« structure logique impressionnante. Mais l'histoire mon-
« tre que les conséquences tirées de ces principes clairs
« et distincts de cette structure, après avoir bien rendu
« compte des phénomènes simples qui l'ont suggérée, ca-
« drent de moins en moins exactement avec l'expérience
« quand on précise celle-ci, ou qu'on l'étend à des cas de
« plus en plus complexes. Ici, au contraire les résultats
« expérimentaux cadrent remarquablement avec l'hy-

1. Eugène BLOCH, *L'Ancienne et la Nouvelle Théorie des Quanta*, Paris, Hermann, 1930, p. 265.

« pothèse. Plus on essaie de l'étendre, et plus elle réussit.
« Seulement l'hypothèse en elle-même est difficilement
« compréhensible. Elle se tient non par son ordonnance
« logique, par la clarté qu'elle rapporte à l'esprit, mais
« par sa réussite expérimentale. La théorie est encore
« loin d'être au point, c'est certain. Et il faut attendre
« que la physique l'explique, pour pouvoir utilement
« essayer de la comprendre au point de vue philosophi-
« que » (1).

1. Abel Rev, *op. cit.*, p. 309.