

NOTICE

SUR LES

TRAVAUX SCIENTIFIQUES

DE

M. Louis de BROGLIE

Professeur à la Faculté des Sciences de Paris



PARIS

HERMANN & C^{ie}, ÉDITEURS

6, rue de la Sorbonne

—
1931

avec mises à jour manuscrites en 1933



TITRES DIVERS

1910. Licencié ès lettres.

1913. Licencié ès sciences.

1914-1919. Mobilisé dans les services techniques de la Télégraphie militaire.

1924. Docteur ès sciences.

Lauréat de l'Institut { 1926. Prix Jules Mahyer
1927. Prix Becquerel.
1929. Médaille Henri Poincaré.

1922 Prix Albert de Monaco

1929. Lauréat du prix Nobel de physique.

1928. Maître de Conférences à la Faculté des Sciences de Paris (Institut Henri Poincaré).

1931. Professeur sans chaire à la même Faculté.

1927. Secrétaire de la Société Française de Physique.

1930. Associé étranger de l'Académie des Sciences et Lettres de Cracovie.

1930. Chevalier de la Légion d'honneur.

1930. Ajouté par l'Académie des Sciences à la liste des candidats à la section de Mécanique (décembre).

1923 Professeur Titulaire de Théorie physique à la Faculté des Sciences de Paris

BIBLIOGRAPHIE

NOTES, MÉMOIRES ET ARTICLES

1. – Sur le calcul des fréquences limites d'absorption K et L des éléments lourds (*C. R.*, 170, 1920, p. 585).
2. – Sur l'absorption des rayons X par la matière (*C. R.*, 171, 1920, p. 1137).
3. – Sur le modèle d'atome de Bohr et les spectres corpusculaires (*C. R.*, 172, 1921, p. 716) (en coll. avec M. Maurice de Broglie).
4. – Sur la structure électronique des atomes lourds (*C. R.*, 172, 1921, p. 1650) (en coll. avec M. A. Dauvillier).
5. – Sur la distribution des électrons dans les atomes lourds (*C. R.*, 173, 1921, p. 137) (en coll. avec M. A. Dauvillier).
6. – Sur le spectre corpusculaire des éléments (*C. R.*, 173, 1921, p. 527) (en coll. avec M. Maurice de Broglie).
7. – Sur la dégradation du quantum dans les transformations successives des radiations de haute fréquence (*C. R.*, 173, 1921, p. 1160).
8. – Sur la théorie de l'absorption des rayons X par la matière et le principe de correspondance (*C. R.*, 173, 1921, p. 1456).
9. – Rayons X et équilibre thermodynamique (*Journal de Physique*, série VI, tome III, p. 33-45) .
10. – Sur le système spectral des rayons Röntgen (*C. R.*, 175, 1922, p. 685) (en coll. avec M. A. Dauvillier).
11. – Sur les analogies de structure entre les séries optiques et les séries Röntgen (*C. R.*, 175, 1922, p. 755) (en coll. de M. A. Dauvillier).

- 12.– Rayonnement noir et quanta de lumière (*Journal de Physique*, série VI, t. III, p. 422-428).
- 13.– Sur les interférences et la théorie des quanta de lumière (*C. R.*, 175, 1922, p. 811).
- 14.– Remarques sur les spectres corpusculaires et l'effet photo-électrique (*C. R.*, 175, 1922, p. 1139) (en coll. avec M. Maurice de Broglie).
- 15.– Remarques sur le travail de E. Hjahmar concernant la série M des éléments (*C. R.*, 175, 1922, p. 1198) (en coll. avec M. A. Dauvillier).
- 16.– Ondes et Quanta (*C. R.*, 177, 1923, p. 507).
- 17.– Quanta de lumière, diffraction et interférences (*C. R.*, 177, 1923, p. 548).
- 18.– Les quanta, la théorie cinétique des gaz et le principe de Fermat (*C. R.*, 177, 1923, p. 630).
- 19.– Sur le système spectral des rayons X et la structure de l'atome (*Journal de Physique*, série VI, t. V, p. 119) (en coll. avec M. A. Dauvillier).
- 20.– Sur la vérification expérimentale des projections d'électrons prévues lors de la diffusion des rayons X par les considérations de Compton et Debye (*C. R.*, 178, 1924, p. 383) (en coll. avec M. Maurice de Broglie).
- 21.– A tentative theory of light quanta (*Philosophical Magazine*, t. XLVII, p. 446, 458).
- 22.– Sur la définition générale de la correspondance entre onde et mouvement (*C. R.*, 179, 1924, p. 39).
- 23.– Sur un théorème de M. Bohr (*C. R.*, 179, 1924, p. 676).
- 24.– Sur la dynamique du quantum de lumière et les interférences (*C. R.*, 179, 1924, p. 1029).
- 25.– La théorie des quanta, synthèse de la Dynamique et de l'Optique (*Revue générale des Sciences*, 35^e année, n° 22, p. 629).
- 26.– Sur la fréquence propre de l'électron (*C. R.*, 180, 1925, p. 498).

- 27.– Sur l'interprétation physique des spectres X d'acides gras (*C. R.*, 180, 1925, p. 1485) (en coll. avec M. J. J. Trillat).
- 28.– Sur le parallélisme entre la dynamique du point matériel et l'optique géométrique (*Journal de Physique*, série VI, t. V II, n°I, p.1-6).
- 29.– Remarques sur la nouvelle Mécanique ondulatoire (*C. R.*, 183, 1926, p. 272).
- 30.– Les principes de la nouvelle Mécanique ondulatoire (*Journal de Physique*, série VI, t. VII, n° II, p. 321, 337).
- 31.– Sur la possibilité de relier les phénomènes d'interférences et de diffraction à la théorie des quanta de lumière (*C. R.*, 183, 1926, p. 447).
- 32.– Sur la possibilité de mettre en accord la théorie électromagnétique avec la nouvelle Mécanique ondulatoire (*C. R.*, 184, 1927, p. 81).
- 33.– La structure atomique de la matière et du rayonnement et la Mécanique ondulatoire (*C. R.*, 184, 1927, p. 273).
- 34.– L'Univers à cinq dimensions et la Mécanique ondulatoire (*Journal de Physique*, série VI, t. VIII, n° 2, p. 65-73).
- 35.– La Mécanique ondulatoire et la structure atomique de la matière et du rayonnement (*Journal de Physique*, série VI, t. VIII, n°5, p. 225-241).
- 36.– Sur le rôle des ondes continues en Mécanique ondulatoire (*C. R.*, 185, 1927, p. 380).
- 37.– Deux conceptions adverses de la lumière et leur synthèse possible (*Scientia*, septembre 1927, p. 128).
- 38.– Rapport au 5^e Conseil de Physique Solvay sur *la nouvelle Dynamique des Quanta* (publié dans *Electrons et photons*, rapports et discussions du 5^e Conseil de Physique Solvay, Gauthier-Villars, éd, 1928, p. 105).
- 39.– Corpuscules et ondes Y (*C. R.*, 185, 1927, p. 1180).
- 40.– La physique moderne et l'œuvre de Fresnel (*Revue de Métaphysique et de Morale*, t. XXXIV, n° 4, 1927, p. 421).
- 41.– L'œuvre de Fresnel et l'évolution actuelle de la Physique (Conférence prononcée à l'occasion du centenaire de Fresnel le 29 octobre 1927, publiée

par la *Revue d'Optique théorique et expérimentale*, 6, 1927, p. 493).

- 42.– Continuité et individualité dans la Physique moderne (Cahier de la nouvelle journée, n° 15, Continu et discontinu, p. 60).
- 43.– La crise récente de l'optique ondulatoire (Conférence faite au laboratoire des Arts et Métiers le 17 avril 1929, publiée par la *Revue scientifique*, 67^e année, 1929, n° 12, p. 353).
- 44.– Déterminisme et causalité dans la Physique contemporaine (*Revue de Métaphysique et de Morale*, t. XXXVII, n° 4, 1929, p. 433).
- 45.– Sur la nature ondulatoire de l'électron (Conférence faite à Stockholm à l'occasion de la remise des prix Nobel le 11 décembre 1929, publiée par la *Revue scientifique*, 68^e année, n° 1, 1930, p. 1).
- 46.– Ondes et corpuscules dans la Physique moderne (Conférence faite au Conservatoire des Arts et Métiers sous la présidence de M. Paul Painlevé le 26 janvier 1930, publiée par la *Revue générale des sciences*, t. XLI, n°4, 1930, p. 101).
- 47.– Sur les équations et les conceptions générales de la Mécanique ondulatoire (*Bull. Soc Math. de France*, mai 1930).

OPUSCULES ET OUVRAGES D'ENSEMBLE

- I. Recherches sur la théorie des quanta, thèse de doctorat soutenue à Paris le 25 novembre 1924 (*Annales de Physique*, 10^e série, t. III, 1925, p. 22-128 ; traduction allemande, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1927).
- II. Ondes et mouvement (Gauthier-Villars, Paris, 1926 ; collection de Physique mathématique, fascicule I) .
- III. Introduction à la Physique des Rayons X et g (en coll. Avec M. Maurice de Broglie) (Gauthier-Villars, Paris, 1928 ; traduction allemande J. A. Barth, Leipzig, 1930).

- IV. La Mécanique ondulatoire (*Mémoires des sciences physiques*, fasc. 1 ; Gauthiers-Villars, Paris, 1928).
- V. — Selected papers on wave mechanics (en coll. avec M. Léon Brillouin) (Blackie and Son, Glasgow, 1928).
- VI. — Ondes et corpuscules (Hermann, Paris, 1930).
- VII. — Introduction à l'étude de la Mécanique ondulatoire (Hermann, Paris, 1930 ; traduction anglaise Methuen and Co, Londres, et traduction allemande, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig).
- VIII. — La théorie de la quantification dans la nouvelle Mécanique (Hermann, Paris, sous ¹⁹³² presse).

En préparation : Le passage des corpuscules électrisés à travers les barrières de potentiel. (*sous presse, Annales de l'Institut H. Poincaré*)

Travaux postérieurs à l'impression de cette notice :

Remarques sur les intégrales premières en Mécanique ondulatoire [C.R. t. 194 (1932) p. 693]

Sur les densités de valeurs moyennes en Mécanique ondulatoire [C.R. t. 194 (1932) p. 1062]

La représentation simultanée des possibilités dans la nouvelle Physique [Revue de Métaphysique et de Morale. t. XXXIX p. 141]

L'état actuel de la théorie électromagnétique [Rapport au Congrès international d'électricité, Paris 1932]

Sur une analogie entre l'électron de Dirac et la théorie électromagnétique [C.R. t. 194 (1932), p. 536]

Remarque sur le moment magnétique et le moment de rotation de l'électron [C.R. t. 194 (1932) p. 577]

Sur le champ électromagnétique de l'onde lumineuse [C.R.A. 19] (1982)
p. 862]

Sur une forme plus restrictive des relations d'incertitude [Collection des exposés
de Physique théorique, Hermann, Paris, fasc. 1]

NOTICE SUR LES TRAVAUX SCIENTIFIQUES

de

M. Louis de BROGLIE,

Professeur à la Faculté des Sciences de Paris

INTRODUCTION

Bien que j'aie commencé mes études supérieures par la préparation d'une licence littéraire, je n'ai pas tardé à m'orienter vers des études scientifiques qui ont dès lors exercé sur moi une invincible attraction. Mon goût me portait naturellement vers la mécanique, la physique théorique et la philosophie des sciences. Mais dirigé par les conseils de mon frère Maurice et vivant dans l'atmosphère du laboratoire où il poursuivait ses recherches expérimentales, j'ai été dès cette époque habitué à ne pas perdre de vue que les constructions théoriques de la science n'ont de valeur que si elles s'appuient toujours sur les faits et restent en contact avec eux.

J'étais encore tout jeune étudiant quand eut lieu à Bruxelles en octobre 1911 le premier Conseil de Physique Solvay dont les discussions eurent pour thème : « les théories du rayonnement et les quanta ». Mon attention ayant été attirée sur ce Conseil par mon frère qui en avait rédigé les procès-verbaux, je lus avec un intérêt passionné les rapports qui y avaient été présentés. C'est ainsi que je fus initié par la lecture du rapport de M. Planck aux mystères de la théorie du quanta dont le développement domine depuis trente ans toute l'évolution de la physique théorique. Rappelons en quelques mots l'origine de la théorie des quanta. En s'appuyant sur les principes classiques de la mécanique et de l'électrodynamique, les théoriciens avaient obtenu une loi qui exprime la répartition spectrale du rayonnement d'équilibre thermodynamique à une

température donnée, mais l'expérience interrogée n'avait pas confirmé cette loi. Réfléchissant à cette difficulté, Planck avait pu la lever et trouver une forme de loi en accord avec les résultats expérimentaux en introduisant l'étrange restriction exprimée par la condition du « quantum d'action ». Ce faisant, Planck avait introduit dans la physique une nouvelle constante universelle, la constante h , et il avait annoncé par avance que cette constante avait une valeur voisine de $6,55 \cdot 10^{-27}$. Depuis, on a retrouvé l'intervention de cette constante dans un nombre énorme des phénomènes et les expérimentateurs ont pu la mesurer par de nombreuses méthodes tout à fait différentes, trouvant toujours une valeur voisine de celle indiquée par Planck. Cette histoire de la découverte du quantum d'action est très instructive. Elle montre comment l'expérience oblige les théoriciens à modifier leurs conceptions et comment les théoriciens novateurs entraînés par la force même des idées qu'ils ont émises pour interpréter les faits, se trouvent amenés à devancer à leur tour l'expérience et à prévoir des phénomènes non encore découverts.

A l'époque où se tenait le premier Conseil Solvay, la théorie des quanta, vieille déjà de dix ans, s'était étendue. La découverte de l'effet photoélectrique en particulier avait conduit M Einstein à supposer que tout rayonnement de fréquence est formé de corpuscules de valeurs hn , nouvelle intervention mystérieuse de la constante h . Cette théorie corpusculaire de la lumière, renouvelée des Grecs et de Newton, paraissait inconciliable avec la théorie ondulatoire si solidement établie pourtant sur la ferme base des expériences de diffraction et d'interférences. Par là une crise redoutable s'annonçait en physique théorique.

En parcourant les procès-verbaux du Conseil Solvay, je fus frappé dès cette époque par le fait que les théories générales de la Mécanique analytique jouaient un rôle essentiel dans le développement de la doctrine des quanta. Bien que la constante h soit tout à fait étrangère à la Mécanique analytique classique, on dirait que celle-ci forme un moule tout prêt à la recevoir. Tout à fait décidé à me consacrer à l'étude du mystère des quanta, je fis alors de la Mécanique analytique et de ses rapports avec les quanta le centre de mes réflexions.

Mais les événements allaient pour longtemps interrompre mon effort. Mobilisé avant et pendant la guerre dans les services techniques de la T.S.F. militaire, mon attention fut absorbée alors par d'autres travaux. Peut-être cependant, mon passage dans les services de la T.S.F. en me familiarisant avec les propriétés des ondes m'a-t-il préparé à tenter plus tard la synthèse des théories mécaniques et des théories ondulatoires.

Les milieux scientifiques savent le rôle énorme que les services de la télégraphie militaire ont joué pendant la guerre sous l'énergique et savante direction de M. le général Ferrié pour la défense de notre pays. Ce n'est pas le lieu de rappeler ici la très modeste part que, fort jeune homme alors, j'ai pu prendre à cette grande œuvre. Qu'il me soit seulement permis d'exprimer à M. le général Ferrié mes sentiments de profonde reconnaissance pour la bienveillance qu'il a constamment montrée à mon égard dans cette partie de ma carrière.

Premiers travaux.

Quand la fin de la guerre me permit de me consacrer de nouveau à la recherche désintéressée, ce fut d'abord vers l'étude des théories physiques relatives aux rayons X ou plus généralement aux rayonnements de très haute fréquence que je me tournai. Mon frère qui depuis plusieurs années déjà s'était consacré à l'étude expérimentale de ces rayonnements poursuivait alors ses recherches avec des collaborateurs dont plusieurs sont devenus des maîtres. Dans ce milieu, je trouvais aisément tous les renseignements dont je pouvais avoir besoin sur les derniers résultats de la recherche expérimentale dans le domaine Röntgen ainsi qu'une ample documentation. On comprend donc l'orientation que je pris naturellement à ce moment. Il ne faudrait pas croire d'ailleurs qu'en m'attachant aux rayons X, je perdais de vue mon but essentiel : l'étude des quanta. C'est qu'en effet toute la théorie des radiations de haute fréquence est imprégnée de l'idée de quantum. Tout comme la lumière, ces radiations se comportent comme si elles étaient constituées par des corpuscules d'énergie $h \nu$ et la valeur élevée de la fréquence a pour conséquence que le quantum $h \nu$ a une valeur relativement grande, fait qui facilite sa mise en évidence. D'autre part, les rayons X naissent dans les régions profondes de l'atome, régions profondes dont l'architecture est essentiellement déterminée par le quantum d'action ainsi que nous l'avons appris la théorie de Bohr. L'observation des raies X émises par une catégorie déterminée d'atomes nous renseigne sur la structure interne de ces atomes et sur le mouvement des électrons qu'il renferme, mouvements qui précisément sont justiciables de la théorie des quanta. L'étude des spectres de rayons X est donc liée d'une façon étroite à la théorie de l'atome et à la Mécanique « quantifiée » du mouvement des électrons dans l'atome. On comprend donc l'intérêt qu'elle présentait pour moi.

Travaux sur les niveaux de Bohr et la théorie de l'absorption des rayons X.

Dans la théorie de Bohr, les électrons décrivent des orbites à l'intérieur de l'atome autour du noyau chargé positivement. Mais ces orbites ne sont pas quelconques : elles doivent être quantifiées. La suite des valeurs de l'énergie pour les orbites quantifiées définit les « niveaux » de Bohr et la fréquence d'une raie émise par un atome est toujours égale à la différence des énergies de deux niveaux de Bohr. L'étude du spectre des rayons X et en particulier, celle des bandes d'absorption permet la détermination expérimentale des niveaux de Bohr. Mais la théorie doit en rendre compte. Mon premier travail fut un essai de calcul théorique des niveaux K et L des éléments lourds (1). Le développement si rapide des théories depuis cette époque (1920) lui ont enlevé beaucoup de son intérêt.

Peu après, je m'attaquai à la théorie de l'absorption par la matière. Ce phénomène obéit à une loi fondamentale très simple dite loi de Bragg-Peirce. Le coefficient d'absorption qui, toutes choses égales d'ailleurs, est proportionnel à la 4^e puissance du nombre atomique de l'élément absorbant, varie à l'intérieur d'une bande d'absorption comme le cube de la longueur d'onde. J'ai fait une tentative pour rendre compte théoriquement de la loi de Bragg-Peirce en employant les moyens dont on disposait alors (2, 8, 9). Cette tentative très imparfaite m'avait conduit à un type de formules qui se retrouve dans toutes les théories faites depuis sur ce sujet et à un calcul des constantes numériques figurant dans la loi d'absorption qui a donné lieu ensuite à d'intéressantes comparaisons avec l'expérience.

Travaux faits avec M. A. Dauvillier sur la distribution des électrons entre les niveaux dans les atomes lourds et sur le système spectral des rayons X.

Les nombreux électrons qui entourent le noyau d'un atome lourd sont distribués entre les divers niveaux d'énergie. Mais comment sont-ils distribués ? Combien y a-t-il d'électrons appartenant au niveau K ? Combien

y a-t-il d'électrons appartenant aux divers niveaux L ?... etc. Ces questions fondamentales pour la théorie de l'atome se rattachent, nous le savons aujourd'hui, à ce qu'on nomme « le principe d'exclusion de Pauli ». Mais en 1921, on ne pouvait en chercher la réponse qu'en profitant des renseignements que nous fournissent les spectres optiques et Röntgen. M. Bohr venait par cette méthode d'obtenir un premier schéma pour la répartition des électrons entre niveaux. Mais en réfléchissant sur ce schéma de M. Bohr, nous nous aperçûmes, M. Dauvillier et moi, qu'il était insuffisant. Le schéma de M. Bohr tenait compte en effet seulement des niveaux prévus par la théorie de Bohr complétée sur ce point par M. Sommerfeld et non pas de tous les niveaux en plus grand nombre dont l'expérience avait déjà révélé l'existence. M. Dauvillier et moi, nous proposâmes alors un autre schéma qui, sans être tout à fait identique à celui qui a prévalu (schéma de Stoner) s'en rapproche beaucoup plus que celui de M. Bohr (4, 5).

Poursuivant notre collaboration, M. Dauvillier et moi, nous avons pu établir une correspondance entre les spectres lumineux et les spectres X qui ne paraît pas avoir été antérieurement aperçue avec netteté. On sait que, dans les spectres lumineux, on peut discerner un certain nombre de séries de raies qu'on nomme série principale, série étroite, série diffuse, série de Bergmann. Nous avons pu, M. Dauvillier et moi, classer les raies des spectres de rayons X de façon à faire apparaître l'existence dans ces spectres d'une série principale, d'une série étroite, d'une série diffuse, d'une série de Bergmann... (10, 11, 15, 19). Cette analogie de structure des spectres Röntgen avec les spectres optiques est un fait d'une importance considérable dont la signification véritable n'est clairement apparue qu'après la découverte du magnétisme de l'électron et en particulier après le développement encore récent de la théorie de l'électron magnétique de M. Dirac.

Travaux sur les spectres corpusculaires avec M. Maurice de Broglie.

Mon frère, aux enseignements et aux conseils duquel je dois tant, poursuivait vers 1921 de très remarquables expériences sur l'effet photo-

électrique des rayons X. On sait que, si un faisceau de rayons X frappe un morceau de matière, il en fait sortir en général des flots d'électrons animés de grandes vitesses. L'hypothèse que les radiations sont formées de corpuscules d'énergie $h\nu$, permet de prévoir la forme de la loi qui doit relier la fréquence de la radiation incidente et les énergies des électrons expulsés. En effet, les électrons sont emprisonnés dans les atomes avec des énergies négatives correspondant aux niveaux de Bohr. Un électron ne pourra donc s'échapper de l'atome en absorbant l'énergie $h\nu$ d'un corpuscule de radiation que si cette énergie $h\nu$ est supérieure à la valeur absolue de l'énergie négative initiale de l'électron. Pour les électrons de chaque niveau, il existe donc une fréquence critique au-dessous de laquelle l'effet photoélectrique ne peut pas se produire. De plus, quand la fréquence est assez élevée pour produire l'effet photoélectrique, l'électron doit sortir de l'atome avec une énergie cinétique égale à :

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

W étant l'énergie nécessaire pour extraire l'électron de son niveau intra-atomique. Il fallait voir si ces prévisions étaient vraiment exactes, puis, l'exactitude de la loi précédente étant vérifiée, s'en servir pour mesurer l'énergie des niveaux intra-atomiques et comparer les valeurs obtenues à celles que l'étude des spectres de rayons X avait fournies. L'expérience consistait essentiellement à mesurer par la méthode de la déviation magnétique l'énergie des électrons expulsés par l'action de rayonnements de fréquences connues. J'aidai de mon mieux mon frère à débrouiller et à classer les résultats expérimentaux qu'il avait obtenus. De cette collaboration est sortie une série de notes faites en commun (3, 6, 7, 14, 20). Le résultat général de ces travaux fut que les prévisions de la théorie corpusculaire des radiations sont rigoureusement exactes dans le domaine de l'effet photoélectrique X.

Spectres d'acides gras. Ouvrage d'ensemble sur les rayons X et g.

Je signalerai encore ici une courte note sur les spectres d'acides gras, faite en collaboration avec M. J.-J. Trillat ; bien qu'un peu postérieure en

date, elle se rattache à la même lignée que les travaux précédents. M. Trillat commençait alors ses belles études sur la constitution des acides gras en étudiant la manière dont des couches minces de ces acides diffractent les rayons X. Certains des résultats obtenus paraissaient ne pas cadrer avec la théorie maintes fois vérifiée de la diffraction des rayons X. Examinant la question nous nous aperçûmes qu'une application judicieuse du théorème de Babinet permettait de lever la difficulté (27).

Peu après, mon frère et moi, nous avons eu l'idée de faire un exposé de l'état de nos connaissances sur les radiations de très haute fréquence en combinant nos points de vue d'expérimentateur et de théoricien. De notre collaboration est sorti un petit ouvrage d'ensemble sur la physique des rayons X et γ dont il a été fait depuis une traduction en allemand (III).

Recherches sur la théorie des quanta et la Mécanique ondulatoire.

J'arrive maintenant aux plus importants de mes travaux. Mon but était toujours resté d'arriver à faire progresser la question des quanta. Or mes études sur les radiations de haute fréquence m'avaient profondément convaincu de la nécessité d'admettre au moins dans un certain sens une structure granulaire des radiations. Et cependant les phénomènes d'interférences et de diffraction de la lumière sont là pour nous montrer la nécessité de la théorie ondulatoire et dans le domaine même des radiations de très haute fréquence, la diffraction des rayons X par les cristaux qui a été à la base de tous les progrès de la spectroscopie X n'est-elle pas un phénomène nettement ondulatoire ? Préoccupé par ces questions, j'entrepris alors un petit travail qui fut le prélude du développement de la Mécanique ondulatoire.

Travaux sur le rayonnement noir.

Tous les travaux sur le rayonnement noir d'équilibre thermodynamique avaient toujours pris comme point de départ que ce rayonnement était de nature ondulatoire. Je fus frappé par l'idée qu'il était naturel d'essayer de se placer au point de vue de l'hypothèse corpusculaire, c'est-à-dire d'assimiler le rayonnement noir à un gaz de « photons ». On peut chercher à appliquer à ce gaz de photons les méthodes statistiques de Boltzmann, mais une précaution est nécessaire : les photons ayant certainement une vitesse égale ou voisine de la constante $c = 3.10^{10}$ cm/sec, on ne peut leur appliquer que la dynamique d'Einstein. Comme rien n'empêche de combiner les méthodes statistiques de Boltzmann avec la dynamique relativiste, j'ai cherché par cette voie à obtenir la loi de répartition de l'énergie entre les photons du rayonnement noir,

c'est-à-dire la loi qui, pour le rayonnement noir considéré comme un gaz de lumière, est l'analogie de la loi de Maxwell pour les gaz ordinaires. Mais la conception corpusculaire des radiations admet avec Einstein qu'un photon d'énergie E correspond à la fréquence

$$n = \frac{E}{h}$$

En trouvant une loi de distribution de l'énergie entre les photons, je trouvais donc du même coup une loi de distribution de l'énergie entre les fréquences, une loi de répartition spectrale de l'énergie. Et la loi à laquelle je parvins ainsi fut la loi proposée par Wien antérieurement aux travaux de Planck. Tel fut le résultat essentiel contenu dans mon mémoire (12). Mais la véritable loi de répartition spectrale de l'énergie dans le rayonnement noir n'est pas, on le sait, la loi de Wien : c'est la loi dite de Planck qui ne coïncide avec la loi de Wien que pour les très grandes fréquences. Je cherchai à retrouver la loi de Planck, mais je n'y parvins pas. Deux ans plus tard, un jeune savant Hindou, M. Bose, devait y parvenir à l'aide d'une méthode statistique nouvelle différente de celle de Boltzmann dont l'essence fut peu après dégagée par M. Einstein et qu'on nomme aujourd'hui couramment la statistique de Bose-Einstein. Dans son mémoire de 1924, M. Bose a retrouvé le résultat que j'avais obtenu, savoir que la statistique de Boltzmann appliquée aux photons conduit à la loi de Wien ; c'est à tort que parfois on attribue la priorité de ce résultat à M. Bose puisqu'il était l'objet essentiel de mon mémoire de 1922.

Pour tâcher d'arriver à la loi de Planck, j'avais eu l'idée, en rédigeant le mémoire que je viens d'analyser, qu'il fallait introduire à côté des photons considérés isolément des associations de photons, associations qui seraient des sortes de molécules de lumière. Je suis revenu peu après à cette idée dans une courte note sur les fluctuations d'énergie dans le rayonnement noir (13). Il est fort remarquable que cette idée de photons associés ou indépendants est bien en fait liée aux bases de la statistique de Bose-Einstein qui seule peut conduire à la loi de Planck ; c'est ce qu'a montré plus récemment M. Léon Brillouin dans un beau travail sur les statistiques quantiques ¹.

¹*Annales de Physique*, X^e série, t. VII, p. 316.

Travaux sur la corrélation entre ondes et corpuscules.

L'étude du rayonnement noir avait fortifié en moi la conviction que, pour parvenir à une théorie plus complète de la lumière et des radiations, il fallait chercher à unir l'idée des corpuscules avec l'idée des ondes. Mais, en y réfléchissant, j'ai eu tout à coup l'intuition qu'une semblable union des ondes et des corpuscules était aussi nécessaire dans la théorie de la matière. Voici comment je suis parvenu à cette conclusion. Dans la conception corpusculaire des radiations, la formule fondamentale est la formule des « quanta de lumière » d'Einstein c'est-à-dire $E = hn$. Cette relation reliant l'énergie du corpuscule de radiation à la fréquence de l'onde correspondante établit une sorte de pont entre la conception des ondes et celles des corpuscules ; elle crée une sorte de correspondance entre les deux images. Il en résulte que la constante h est en quelque manière un trait d'union entre les ondes et les corpuscules.

Mais si nous nous tournons vers la théorie de la matière et en particulier vers celle des systèmes atomiques, que voyons-nous ? Nous voyons les particules élémentaires de la matière, en particulier les électrons, décrire des mouvements quantifiés dont la spécification fait intervenir la constante h et des nombres entiers. Or l'intervention des nombres entiers fait tout de suite penser aux phénomènes d'interférence et de résonance, c'est-à-dire à des phénomènes essentiellement ondulatoires. Ne peut-on pas penser alors qu'il y a lieu dans la théorie de la matière d'adjoindre des ondes aux corpuscules, la correspondance entre les unes et les autres étant définie par des formules où la constante de Planck jouera le rôle essentiel ? Et si l'on parvient à établir cette correspondance entre ondes et corpuscules pour la matière, peut-être se révélera-t-elle comme identique à celle qu'on doit admettre entre ondes et corpuscules pour la lumière. Et alors on aura atteint un très beau résultat ; on aura constitué une doctrine générale qui établira la même corrélation entre ondes et corpuscules, aussi bien dans le domaine de la lumière que dans celui de la matière.

Pour mener à bien cette tentative, je fus guidé par l'analogie formelle

depuis longtemps signalée entre les équations de la Mécanique analytique et celles de l'optique géométrique, par l'analogie notamment du principe de moindre action de Maupertuis, avec le principe ou temps minimum de Fermat. Je suis parvenu à établir la correspondance que j'avais en vue en associant au mouvement de tout corpuscule de matière ou de radiation dont l'énergie est E et la quantité de mouvement g , la propagation suivant les lois de l'optique géométrique d'une onde dont la fréquence n et la longueur d'onde λ , sont reliées aux grandeurs E et g par les relations :

$$n = \frac{E}{h} \qquad \lambda = \frac{h}{g}$$

Grâce à cette correspondance entre les grandeurs mécaniques et ondulatoires, le principe de Maupertuis pour le corpuscule se confond avec le principe de Fermat pour l'onde, et les trajectoires possibles du corpuscule se confondent avec les rayons au sens optique. Appliquée à la lumière, cette correspondance exige la coexistence des photons et des ondes lumineuses, l'énergie d'un photon étant bien reliée à la fréquence de l'onde par la relation d'Einstein. Appliquée à la matière, la même correspondance exige que tout corpuscule de matière, tout électron par exemple, soit toujours associé à une onde, qui accompagne et contrôle son mouvement. Dès ce moment, j'ai eu l'idée qu'on devait pouvoir obtenir *avec des électrons* des phénomènes analogues aux phénomènes d'interférence ou de diffraction. Dans cette direction devait se trouver l'expérience cruciale qui apporterait la démonstration directe de l'existence d'une onde associée pour tout électron. Nous reviendrons plus tard sur cette question.

Encouragé par la cohérence logique du résultat obtenu, j'ai poursuivi mes recherches en montrant comment l'existence d'une onde associée à l'électron explique pourquoi le mouvement des électrons dans le domaine atomique est quantifié. L'équation qui exprime que le mouvement d'un électron est quantifié a en effet la signification suivante : l'intégrale de Maupertuis

$\int m \cdot v \cdot ds$ prise le long de la trajectoire fermée est égale à un multiple entier de constante h . Mais d'après la correspondance que j'avais établi entre la quantité de mouvement du corpuscule et la longueur d'onde de l'onde qu'il faut

lui associer, le quotient par h de l'intégrale de Maupertuis prise le long de la trajectoire est égale à la variation totale de la phase de cette onde le long de la trajectoire, en prenant 2π pour unité. Ecrire que l'intégrale en question est un multiple entier de h revient donc à écrire que la phase de l'onde est une fonction « uniforme » le long de la trajectoire, c'est-à-dire que l'onde est *stationnaire*. Ce dernier mot éclaire le sens profond de la quantification des mouvements électroniques. Un mouvement électronique est quantifié, c'est-à-dire stable, quand l'onde correspondante est stationnaire. Cette belle explication de la quantification acheva de me montrer que j'étais dans la bonne voie.

J'ai voulu alors appliquer ces idées générales à la théorie des gaz et au rayonnement noir. Là aussi les résultats furent très satisfaisants. J'ai pu en effet montrer que les conceptions nouvelles conduisaient pour un gaz de corpuscules à une loi de distribution des énergies qui, pour un gaz au sens usuel, se confond sensiblement avec la loi classique de Maxwell et pour un gaz de lumière redonne la loi de Planck ; ainsi je complétais mes travaux antérieurs sur le rayonnement noir et j'ouvrais la voie à la nouvelle méthode statistique qui fut développée peu après par MM. Bose et Einstein.

Tous ces résultats furent résumés en trois notes parues dans les *Comptes Rendus* en septembre et octobre 1923 (16, 17, 18). *Je puis dire que tout l'énorme développement ultérieur de la Mécanique ondulatoire a sa racine dans ces trois notes.*

Je cherchai ensuite à approfondir certains points de ma nouvelle théorie (22, 23, 24, 26) et à en faire des exposés généraux susceptibles d'attirer sur elle l'attention du public scientifique (21, 25). Puis je voulus réunir tous mes résultats sous forme d'une thèse pour obtenir le grade de docteur en sciences. J'ai préparé cette thèse sous la direction de M. Paul Langevin dont le bel enseignement au Collège de France avait puissamment contribué à la formation de mon esprit et à l'orientation de mes recherches. Ma thèse a été soutenue devant la Faculté des Sciences de Paris le 25 novembre 1924 (I).

Travaux sur la Mécanique ondulatoire :

La correspondance que j'avais établie entre les corpuscules et leurs ondes associées identifiait la dynamique classique des corpuscules avec l'optique géométrique des ondes associées. C'est là un point que j'achevai de mettre en évidence peu de temps après ma thèse dans un petit mémoire (28). Mais il fallait aller plus loin. On le sait en effet, dans la théorie ondulatoire, l'optique géométrique n'est qu'une approximation qui cesse d'être valable s'il y a interférences, diffraction ou variation trop rapide des conditions de propagation. Quand l'optique géométrique n'est plus valable pour la propagation de l'onde associée au corpuscule, le mouvement de celui-ci ne doit plus pouvoir être prévu par les lois de la Dynamique classique. Il fallait donc, comme je le disais déjà dans ma thèse, « constituer une Mécanique plus générale qui serait à la Mécanique ancienne (y compris celle d'Einstein) ce que l'optique ondulatoire est à l'optique géométrique ». J'ai fait après ma thèse quelques tentatives dans ce sens qu'on trouvera consignées dans un petit ouvrage publié à cette époque (II). Mais l'équation de propagation que je proposai alors pour les ondes associées aux corpuscules n'était pas complète comme je m'en suis aperçu ensuite.

C'est à ce moment que M. Erwin Schrödinger, alors professeur à l'Université de Zurich, publia la série de ses beaux mémoires intitulés : « La quantification envisagée comme problème de valeurs propres ». M. Einstein avait attiré l'attention du monde scientifique sur mes travaux et montré les rapports étroits de ma théorie avec la méthode statistique de Bose. M. Schrödinger, après avoir commencé par approfondir cette question, découvrit la forme exacte des équations qu'il fallait admettre pour la propagation des ondes associées aux corpuscules. Il en déduisit une théorie rigoureuse de la quantification dont les résultats se montrèrent très satisfaisants. Ainsi se trouva définitivement créée la Mécanique ondulatoire, couronnement logique de mes études sur la corrélation entre ondes et corpuscules.

M. Schrödinger m'avait fort aimablement tenu au courant de ses recherches m'en communiquant les principaux résultats avant de les publier.

Tout de suite, je cherchai à les rattacher à mes résultats antérieurs et à les étendre de diverses façons. Ce fut l'objet d'une série de notes et d'exposés (29, 30, 31, 32, IV). On y trouve entre autres choses les formes relativistes de l'équation de propagation en Mécanique ondulatoire et les relations qu'expriment la conservation du nombre des corpuscules. Dans ces travaux, apparaît aussi ma préoccupation d'arriver à préciser dans la nouvelle théorie la position et la vitesse des corpuscules pendant le cours de leur mouvement. Je pressentais déjà que l'orientation donnée à la nouvelle Mécanique par les travaux de Schrödinger rendait cette question très délicate mais je cherchais à la résoudre ; j'ai dû depuis y renoncer à cause du principe d'incertitude d'Heisenberg. Je reviendrai un peu plus loin sur ce difficile sujet.

Travail sur l'Univers à cinq dimensions.

D'après Einstein, on doit représenter les phénomènes physiques dans un espace à quatre dimensions qui est la synthèse abstraite de l'espace et du temps : c'est l'espace-temps ou Univers de la théorie de Relativité. M. Kaluza a proposé d'ajouter à l'Univers une cinquième dimension qui échapperait totalement à nos observations, l'espace-temps dans lequel se situent tous les faits de notre expérience étant en quelque sorte une section à 4 dimensions de cet Univers à cinq dimensions. La théorie de Kaluza a l'avantage de permettre une interprétation géométrique du champ électromagnétique ; elle complète donc la théorie de Relativité généralisée qui donne une interprétation géométrique du champ gravifique mais non du champ électromagnétique. Mais au point de vue de la Mécanique ondulatoire, la conception de l'Univers à cinq dimensions a aussi ses avantages : elle permet en effet de donner aux équations de cette Mécanique une forme plus symétrique et très élégante, comme l'avait indiqué M. O. Klein dans un petit mémoire quelque temps après les grands travaux de Schrödinger. Le mémoire de Klein ne m'ayant pas paru à l'abri des critiques, j'ai repris la question et je suis arrivé à une forme d'équation de propagation dans l'Univers à cinq dimensions qui me paraît préférable à la forme proposée par M. Klein (34). Finalement, après avoir eu un certain succès, la théorie de l'Univers à cinq dimensions n'a pas donné tout ce que l'on

en attendait et elle a été abandonnée. On n'en parle plus guère aujourd'hui, mais peut-être y reviendra-t-on.

Pour terminer ce paragraphe, je noterai que les mémoires que j'ai publiés dans les premiers temps du développement de la Mécanique ondulatoire ont été réunis et publiés avec quelques mémoires de M. Léon Brillouin par un éditeur anglais (V).

La diffraction des électrons par les cristaux

Une théorie n'est vraiment solide que si elle a reçu de l'expérience une confirmation directe. La corrélation entre ondes et corpuscules que j'avais proposée et toute la Mécanique ondulatoire qui en découle ne pouvaient être tenues comme vraiment satisfaisantes tant que l'existence de l'onde associée au corpuscule matériel n'était pas mise expérimentalement en évidence.

L'électron étant celui des corpuscules matériels, sur lequel nous pouvons aujourd'hui expérimenter le plus aisément, c'est pour lui qu'il était naturel de chercher à obtenir des phénomènes de nature ondulatoire. Les nouvelles conceptions conduisent, nous l'avons vu, à attribuer à l'onde associée à un électron de quantité de mouvement g une longueur d'onde $\frac{h}{g}$.

Comme pour les électrons dont la vitesse n'est pas trop voisine de celle de la lumière on peut employer la valeur classique de la quantité de mouvement mv , on a :

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

En substituant les valeurs numériques bien connues de h et de m , on voit facilement que pour les électrons de vitesses usuelles dans les expériences la longueur d'onde λ , est de l'ordre de 10^{-8} à 10^{-9} cm., soit de l'ordre de la longueur d'onde des rayons X. Il doit donc être extrêmement difficile pour les électrons comme pour les rayons X d'obtenir les phénomènes de diffraction par le bord d'un écran ou par un fil qui sont aisés à obtenir pour la lumière visible en raison de la plus grande longueur d'onde. Par contre rien ne paraît en principe s'opposer à ce que l'on puisse obtenir avec des électrons le phénomène de diffraction par les cristaux si bien connu pour les rayons X depuis les

célèbres recherches de M. von Laue en 1912.

Convaincu que là serait peut-être l'expérience cruciale qui mettrait mes théories hors de doute, j'ai conseillé dès 1925 à M. A. Dauvillier avec qui j'avais plusieurs fois collaboré et dont l'habileté expérimentale m'était bien connue, d'envoyer sur un cristal un faisceau d'électrons et de chercher à obtenir ainsi des figures de diffraction analogues à celles de Laue. Mais cette expérience est très délicate et exige une longue mise au point ; absorbé par d'autres travaux, M. Dauvillier ne put continuer ses recherches dans cette direction.

C'est MM. Davisson et Germer travaillant aux laboratoires Bell à New-York qui ont eu le mérite de mettre pour la première fois en évidence, en 1927, la diffraction des électrons par les cristaux. La théorie de la diffraction des rayons X pour les cristaux est bien connue des physiciens. Dans un cristal, il existe une infinité de familles de plans réticulaires parallèles et équidistants, chaque famille étant caractérisée par la distance des plans voisins ; cette distance appelée «distance réticulaire » peut se prévoir par des considérations cristallographiques. Quand un faisceau de rayons X de longueur d'onde λ , tombe sur un cristal, il est fortement réfléchi dans la direction de réflexion régulière par toutes les familles de plans réticulaires pour lesquelles la condition :

$$2d \sin \theta = n \lambda$$

(Où d est la distance réticulaire, θ le complément de l'angle d'incidence sur la famille de plans et n un nombre entier) est réalisée. On obtient donc une série de faisceaux réfléchis qui peuvent marquer leurs traces sur une plaque photographique. De la disposition des taches sur la plaque, on peut déduire la longueur d'onde λ , connaissant les distances réticulaires d , ou inversement déduire les distances réticulaires d si l'on connaît déjà par ailleurs la longueur d'onde λ . On sait que cette théorie de la diffraction des rayons X par les cristaux a été rigoureusement vérifiée par l'expérience et qu'elle sert de base à toute la spectroscopie X. MM. Davisson et Germer ont obtenu un phénomène tout à fait analogue en remplaçant le faisceau monochromatique incident de

rayons X par un faisceau monocinétique d'électrons ¹. L'application de la théorie de Laue aux taches de diffraction a montré qu'on doit associer aux électrons incidents de vitesse v une onde de longueur

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

dont la diffraction règle l'éparpillement des électrons par le cristal.

Ainsi s'est trouvée splendidement confirmée non seulement l'existence d'une onde associée aux électrons mais la relation que j'avais prévue entre la longueur d'onde de l'onde et la quantité de mouvement du corpuscule.

Dans le domaine des rayons X, la diffraction par les cristaux a été depuis longtemps déjà étudiée à l'aide d'une autre méthode dite « méthode de Debye et Scherrer » Cette méthode consiste à faire passer un faisceau de rayons X à travers une poudre de petits cristaux dont les orientations sont quelconques. La distribution isotrope des petits cristaux autour de la direction de propagation de faisceau X incident a pour effet qu'au lieu d'obtenir sur une plaque photographique normale à la direction d'incidence des taches de diffraction, on obtient des anneaux dont le diamètre dépend essentiellement de la nature des petits cristaux (c'est-à-dire de leurs distances réticulaires) et de la longueur d'onde des rayons X incidents. Comme les métaux sont formés par un enchevêtrement de petits cristaux généralement orientés au hasard, on peut, pour appliquer la méthode de Debye et Scherrer, remplacer la poudre cristalline par un mince film métallique. Peu de temps après la découverte de Davisson et Germer, M. G. P. Thomson alors professeur à l'Université d'Aberdeen a transposé la méthode de Debye et Scherrer pour le cas des électrons. En faisant tomber un faisceau monocinétique d'électrons normalement à un film métallique très mince et en recueillant les électrons diffractés sur une plaque photographique située derrière le film et parallèlement à lui il a obtenu des anneaux tout à fait analogues à ceux que l'on obtient avec les rayons X et les diamètres de ces anneaux indiquaient encore que l'on devait considérer les électrons incidents de vitesse v comme accom-

¹ Dans les expériences de Davisson et Germer, la position des faisceaux diffractés était repérée non par la méthode photographique mais à l'aide d'une chambre d'ionisation.

pagnés et guidés par une onde de longueur d'onde $\lambda = \frac{h}{mv}$. Tandis que MM. Davisson et Germer avaient opéré avec des électrons relativement lents, M. Thomson opérait avec des électrons rapides ; les expériences de M. Thomson augmentaient donc considérablement le domaine de vitesse pour lequel la formule $\lambda = \frac{h}{mv}$ se trouvait vérifiée.

Depuis ces premières expériences, le phénomène de la diffraction des électrons par les cristaux a été obtenu par un très grand nombre d'expérimentateurs parmi lesquels je citerai M. Rupp, en Allemagne, M. Kikuchi, au Japon, MM. Ponte et Dauvillier, en France. L'existence du phénomène et la validité de la relation $\lambda = \frac{h}{mv}$ ne sont plus contestées aujourd'hui. On a même pu constater la diffraction des électrons par un réseau optique ordinaire (Rupp) et en faire par l'emploi d'écrans fluorescents une véritable expérience de cours (Dauvillier, Trillat).

Dans la vérification de la formule $\lambda = \frac{h}{g}$, on a poussé jusqu'au raffinement. En effet, pour les électrons très rapides dont la vitesse devient appréciable par rapport à la lumière c , la quantité de mouvement a pour valeur non plus mv mais bien

$$g = \frac{mv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

C'est là un résultat expérimental qui est en accord avec la théorie de la Relativité. Pour les électrons rapides, on doit donc avoir rigoureusement :

$$\lambda = \frac{h}{m v} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

L'existence du terme correctif $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ a été mise en évidence notamment par Rupp.

On trouvera jointes à cette notice des planches représentant des anneaux de diffraction obtenus par M. Ponte. Le seul aspect de ces anneaux si analogues à ceux qu'on obtient dans tant d'expériences optiques prouve la nécessité de compléter l'image de l'électron-corpuscule par des conceptions ondulatoires.

La découverte de la diffraction des électrons avait apporté une confirmation complète de mes vues théoriques. Peu après l'Académie des Sciences a couronné mon œuvre en me décernant la médaille Henri Poincaré non encore attribuée jusque-là. Puis j'ai reçu le prix Nobel.

Les succès de la Mécanique ondulatoire ayant attiré sur elle l'attention de cercles scientifiques étendus, j'ai été amené à faire un certain nombre d'exposés et de conférences d'un caractère moins spécialisé que mes travaux antérieurs (37, 41, 43, 45, 46, VI). Je citerai aussi ici un exposé général plus technique fait devant la Société mathématique de France (47).

Travaux sur l'interprétation physique de la nouvelle Mécanique et sur l'incertitude d'Heisenberg.

La Mécanique ondulatoire est parvenue à unir étroitement les notions d'ondes et de corpuscules, mais cette union n'a pas été sans altérer profondément, on s'en est aperçu peu à peu, les significations physiques qu'il était autrefois possible d'attribuer à ces deux notions. D'une part l'onde de la nouvelle Mécanique bien que venant en quelque sorte inscrire son existence sur la plaque photographique dans les expériences de diffraction des électrons, n'en a pas moins, quand on approfondit la question, un sens beaucoup plus abstrait et formel que l'onde de l'ancienne physique : ce n'est plus qu'une « onde de probabilité » et, pour reprendre un mot célèbre de lord Salisbury ¹, le verbe « onduler » dans la nouvelle théorie n'a plus aucun sujet. D'autre part la notion si simple du corpuscule s'y est aussi quelque peu obscurcie. Nous considérons jadis le corpuscule, l'électron par exemple, comme un objet de dimensions très petites, un point matériel. A chaque instant ce corpuscule occupait une position bien définie dans l'espace et l'ensemble de ses positions au cours du temps constituait sa trajectoire le long de laquelle à chaque instant il était animé d'une vitesse bien définie. Mais dès le début du développement de la Mécanique ondulatoire on a pu voir qu'il ne serait pas très commode de conserver ces notions si claires et si simples. Je vais rapidement rappeler pourquoi.

Tant que la propagation de l'onde associée au corpuscule s'opère suivant les lois de l'optique géométrique, il est permis d'attribuer au corpuscule une trajectoire qui doit, comme je l'ai expliqué, coïncider avec un des rayons de

¹Lord Salisbury avait écrit naguère que le rôle de l'éther dans la théorie de la lumière était d'être le sujet du verbe « onduler ».

l'onde. Mais si l'optique géométrique n'est pas valable pour l'onde associée, s'il y a interférences ou diffraction, ou encore si comme dans l'atome les conditions de propagation varient trop rapidement à l'échelle de la longueur d'onde, il ne sera plus possible de définir les « rayons » qui n'ont de sens qu'en optique géométrique ; on ne saura donc plus quelle trajectoire ni quel mouvement attribuer au corpuscule.

Imprégné des idées de la Physique classique, il m'est apparu d'abord comme impossible de renoncer à l'idée que les corpuscules avaient une position et une vitesse bien définies. J'ai donc fait les plus grands efforts pour arriver à attribuer au corpuscule une position et une vitesse même quand l'optique géométrique n'était plus valable pour l'onde associée. Cette préoccupation déjà visible dans des travaux que j'ai cités (30, 31, IV) apparaît plus nettement encore dans toute une série de notes ou mémoires consacrés à la question (33, 34, 36, 39). J'ai exposé les résultats auxquels j'étais arrivé dans mon rapport au 5^e Conseil de physique Solvay (38), mais la théorie que je proposais était loin de me donner complète satisfaction.

C'est alors que j'ai eu connaissance d'un mémoire de M. Heisenberg dans lequel il exposait pour la première fois son célèbre « principe d'incertitude ». Selon M. Heisenberg, il est inutile et même impossible dans la nouvelle Mécanique de préciser à la fois la position et l'état de mouvement d'un corpuscule. Par des raisonnements et des exemples profonds et subtils, le jeune savant a montré qu'aucune expérience ne peut permettre de mesurer à la fois avec exactitude une des coordonnées d'un corpuscule et la composante correspondante de sa quantité de mouvement et même que cette impossibilité est implicitement inscrite dans les équations de la Mécanique ondulatoire. Cette « incertitude » s'exprime mathématiquement par la relation :

$$\Delta q \Delta p \geq h$$

où Δq est l'incertitude sur une coordonnée et Δp l'incertitude sur le moment conjugué. Naturellement à cause de l'extrême petitesse de h , l'incertitude en question ne joue aucun rôle à notre échelle, mais elle est fondamentale à l'échelle atomique.

D'abord très surpris par les conclusions d'Heisenberg, je n'ai pas tardé

à m'apercevoir qu'elles étaient parfaitement exactes et qu'elles expliquaient les difficultés que j'avais rencontrées en m'efforçant de préciser exactement le mouvement des corpuscules en Mécanique ondulatoire. Fort de l'expérience que j'avais acquise en faisant ces tentatives, j'ai fait un exposé général pour bien fixer le sens de l'incertitude d'Heisenberg en m'attachant particulièrement à montrer pourquoi toutes les tentatives faites dans le but d'y échapper paraissaient vouées à l'insuccès. Cet exposé qui m'a fourni la matière d'un cours à l'Institut Henri Poincaré (voir plus bas) a été publié ensuite (VII).

L'incertitude d'Heisenberg entraîne avec elle une certaine indétermination des phénomènes de l'échelle atomique. On discute sur le sens de cette indétermination : les uns y voient une indétermination fondamentale que les progrès ultérieurs de la science ne parviendront pas à lever tandis que les autres préfèrent y voir une preuve de l'insuffisance de nos conceptions actuelles et pensent qu'en abandonnant nos images trop grossières d'ondes et de corpuscules pour d'autres plus adéquates nous parviendrons un jour à retrouver la causalité parfaite. De toute façon la question présente un gros intérêt philosophique. J'avais déjà eu l'occasion auparavant de tenir les philosophes au courant du développement de la Mécanique ondulatoire (41) ; depuis l'apparition du principe d'incertitude, j'ai à leur intention fait quelques exposés de la question (42, 44). J'ai notamment fait sur ce sujet une conférence à la Société Française de philosophie qui a été suivie d'une très intéressante discussion à laquelle ont participé, outre M. Einstein alors présent à Paris, plusieurs représentants éminents de la Science Française.

Ouvrages d'ensemble. Enseignement et recherches à l'Institut Henri Poincaré.

La Mécanique ondulatoire s'est développée d'abord avec une grande rapidité, de nombreuses branches venant se greffer sur le tronc principal de la théorie. Puis le développement s'est ralenti et le moment est venu de consolider le terrain acquis et de mettre au point ces doctrines nouvelles qui sont assez difficiles et dont la forme première n'a pas toujours été exempte d'obscurités. Depuis environ trois ans, je me suis spécialement attaché à faire des exposés d'ensemble aussi clairs et aussi approfondis que possible sur certaines branches de la nouvelle Mécanique.

J'ai été particulièrement orienté dans cette voie par la création de l'Institut Henri Poincaré organisé à la Faculté des Sciences de Paris grâce à de généreux concours à la fin de 1928. Cet institut dont M. Emile Borel a été l'animateur est destiné à être principalement un centre de recherches et d'enseignement pour le Calcul des probabilité et pour la Physique mathématique et théorique. Sa création répondait d'autant plus à un besoin qu'en France pendant le premier quart de notre siècle l'étude des théories physiques nouvelles a été un peu trop négligée : c'est ainsi qu'on ne trouve guère de noms Français dans l'histoire du développement initial de la théorie des quanta.

Quand naquit l'Institut Henri Poincaré, je faisais depuis deux ans déjà des cours libres à la Sorbonne. La Faculté des Sciences m'a fait alors l'honneur de me faire confier l'un des deux postes d'enseignement de Physique théorique créés dans le nouvel organisme, l'autre étant confié à M. Léon Brillouin.

Le partage de l'enseignement de la physique théorique à l'Institut Henri Poincaré entre M. Léon Brillouin et moi s'est opéré tout naturellement.

Tandis que M. Léon Brillouin se réservait l'étude des statistiques quantiques et de leurs applications, étude pour laquelle sa profonde connaissance du sujet et ses beaux travaux personnels le désignaient particulièrement, je me suis consacré à l'enseignement de la Mécanique ondulatoire et des théories qui s'y rattachent et, depuis 1928, j'ai fait chaque année dans mon cours un exposé entièrement original d'une question comprise dans ce domaine.

C'est ainsi qu'en 1928-1929, j'ai exposé les caractères fondamentaux de la nouvelle Mécanique en m'attachant spécialement au principe d'incertitude : comme je l'ai dit plus haut, j'ai ensuite rédigé et publié cet exposé (VII). L'année suivante, je me suis efforcé d'approfondir la notion de quantification en Mécanique ondulatoire et j'ai développé la théorie abstraite et générale qu'on nomme souvent « la théorie des transformations ». Ce cours m'a fourni la matière d'un ouvrage qui est actuellement sous presse (VIII). En 1930-1931, j'ai étudié la théorie de l'électron magnétique due à M. Dirac et je me suis en particulier attaché à éclairer la difficile question du sens de la vitesse dans cette théorie. Enfin, je vais cette année exposer comment la nouvelle mécanique envisage le passage des corpuscules à travers les barrières de potentiel, importante question à laquelle se rattachent diverses théories notamment la théorie de l'émission des particules α par les corps radioactifs proposée par M. Gamow.

L'un des buts de l'Institut Henri Poincaré est naturellement de former de jeunes théoriciens de la Physique, sa création est trop récente encore pour qu'il ait, à ce point de vue, atteint son plein rendement mais déjà néanmoins les résultats s'annoncent. Pour ne parler que de ce qui me concerne, le nombre des étudiants travaillant sous ma direction augmente chaque année : plusieurs travaux ont été effectués ou sont en préparation. En somme, tout permet d'espérer que, grâce surtout à la création de l'Institut Henri Poincaré, la science Française aura une part importante dans les progrès prochains des théories physiques. A ce résultat, je m'efforce de contribuer.

RÉSUMÉ

Mon goût naturel m'a porté dans ma première jeunesse vers l'étude des théories mécaniques et physiques ; en particulier, m'attiraient les énigmes qu'a posées au savant moderne la découverte des quanta.

Après la fin de la guerre, j'ai tourné d'abord mon attention vers l'étude théorique des rayons X et autres radiations de haute fréquence pour lesquelles les quanta jouent un rôle essentiel. J'ai fait à cette époque des travaux sur les niveaux de Bohr, l'absorption des rayons X par la matière, la distribution des électrons dans les atomes lourds, la classification des raies du spectre Röntgen, l'effet photoélectrique, etc.

M'attaquant ensuite au cœur même de la théorie des quanta, je me suis aperçu que seule une fusion intime de nos concepts d'onde et de corpuscule pouvait nous faire comprendre un peu plus la nature mystérieuse des quanta. J'ai donc été amené à prétendre qu'à tout corpuscule de matière ou de rayonnement, on doit adjoindre une onde dont la propagation accompagne et, contrôle le mouvement du corpuscule. J'ai pu définir exactement la relation qui doit exister entre l'énergie et la quantité de mouvement du corpuscule d'une part, la fréquence et la longueur d'onde de son onde associée d'autre part. L'établissement de cette corrélation générale entre ondes et corpuscules m'a permis de comprendre la raison d'être de l'analogie depuis longtemps remarquée entre les équations de la Mécanique analytique et celles de l'optique géométrique, la signification du caractère quantifié des mouvements corpusculaires à l'échelle atomique, l'origine de la loi du rayonnement noir de Planck, etc.

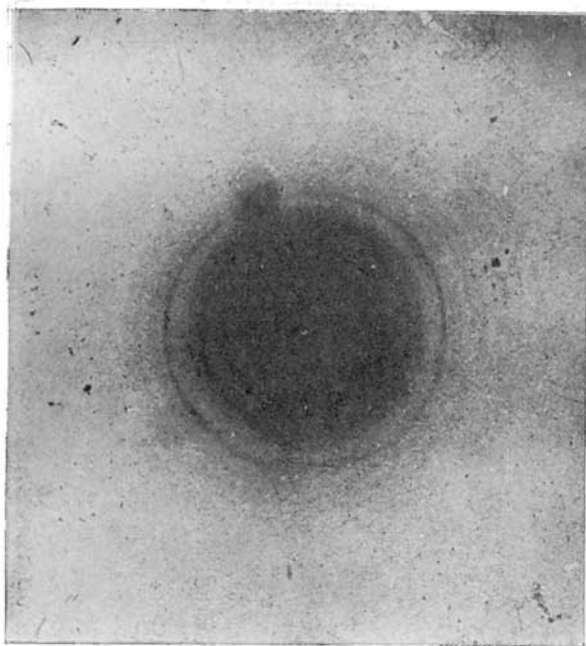
De ces travaux est issue la «Mécanique ondulatoire » science nouvelle sur laquelle reposent presque tous les progrès de la Physique théorique contemporaine. J'ai consacré de nombreux travaux au développement de cette Mécanique ondulatoire qui a reçu par ailleurs des travaux de M. E. Schrödinger une décisive impulsion.

Mes idées sur la nécessité d'associer au mouvement de tout corpuscule

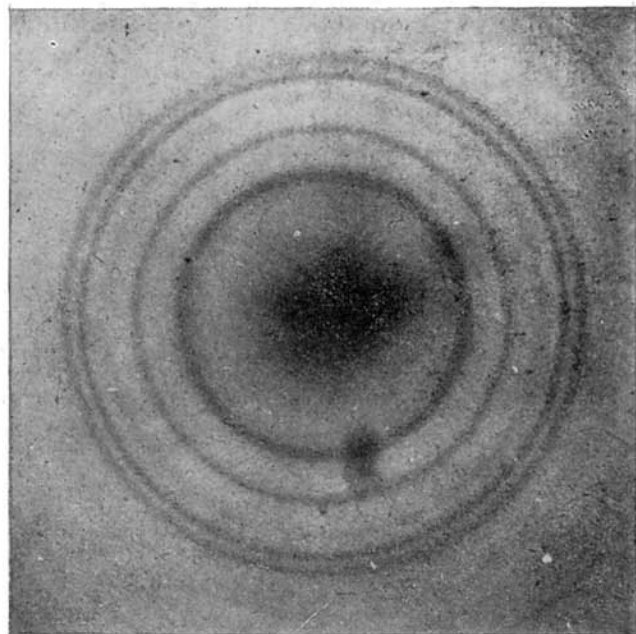
la propagation d'une onde amenaient tout naturellement à prévoir *pour les électrons* la possibilité de phénomènes analogues aux phénomènes de diffraction bien connus pour la lumière et les rayons X. Cette prévision singulière a été complètement et quantitativement confirmée par la découverte de la diffraction des électrons par les cristaux. Cette découverte a mis hors de doute la validité des conceptions hardies que j'avais le premier développées.

La fusion de nos concepts de corpuscule et d'onde dans la nouvelle Mécanique nous a obligé à apporter à ces deux concepts des modifications profondes dont il est très délicat de préciser l'exacte nature. J'ai consacré de nombreux travaux à cette difficile question qui est du reste encore loin d'être complètement éclaircie.

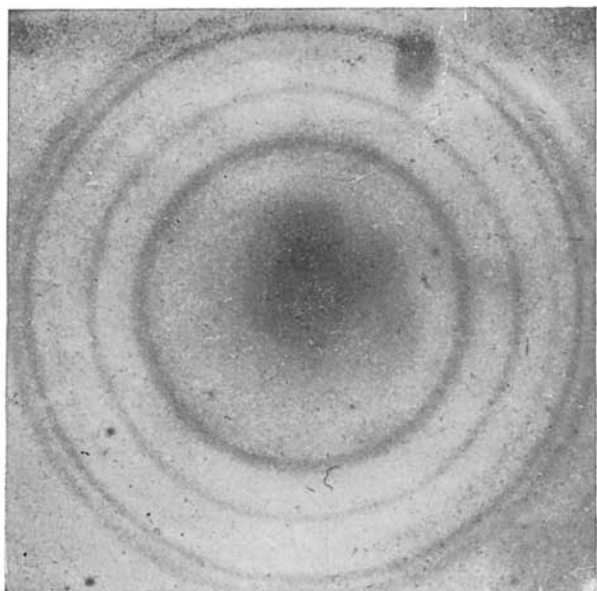
Chargé depuis trois ans d'un enseignement de Physique théorique à l'Institut Henri Poincaré de la Faculté des Sciences de Paris, je me suis efforcé dans des cours et des ouvrages d'ensemble de préciser et d'approfondir les principes généraux de la Mécanique ondulatoire et des théories physiques qui s'y rattachent.



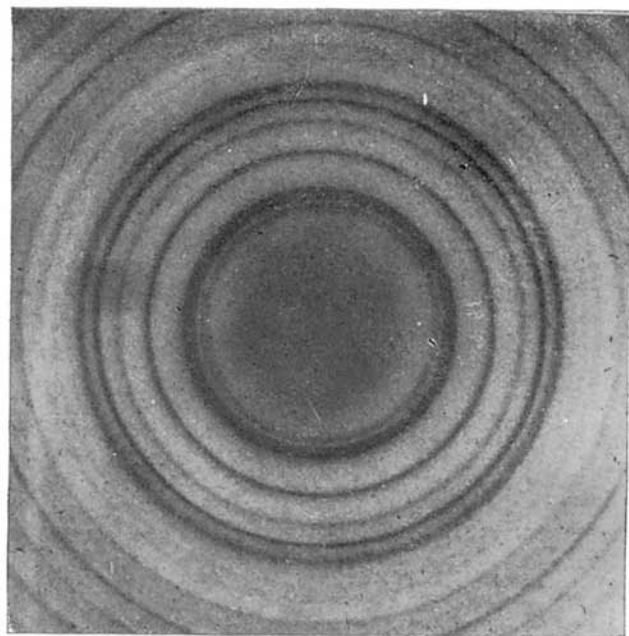
Anneaux de diffraction obtenus avec Cd O
comme diffuseur et des électrons de 16.670 volts
 $\lambda = 0^{\circ},094$



Anneaux de diffraction obtenus avec Zn O
comme diffuseur et des électrons de 13.489 volts
 $\lambda = 0^{\circ},105$



Anneaux de diffraction obtenus avec Zn O
comme diffuseur et des électrons de 10.190 volts
 $\lambda = 0^{\circ},121$



Anneaux de diffraction obtenus avec Zn O
comme diffuseur et des électrons de 18.710 volts
 $\lambda = 0^{\circ},090$