Zeitschrift: Archives des sciences physiques et naturelles
Herausgeber: Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève
Band: 12 (1930)

Artikel: L'électromagnétisme et les principes de la mécanique
Autor: Schidlof, A.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-741246

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

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

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

Download PDF: 17.07.2025

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

L'ÉLECTROMAGNÉTISME ET LES PRINCIPES DE LA MÉCANIQUE

PAR

A. SCHIDLOF

Cette leçon d'introduction * a pour objet de mettre en évidence les principes fondamentaux sur lesquels repose la physique théorique, et les méthodes grâce auxquelles celle-ci progresse en se maintenant constamment en contact avec les recherches expérimentales. Les questions qui se rattachent à la théorie de l'électromagnétisme se prêtent tout particulièrement à cette discussion à cause des considérations historiques et épistémologiques auxquelles elles donnent lieu. Pour voir dans les principes qui se trouvent à la base de la physique autre chose qu'une création artificielle de notre intelligence, il est utile de se rendre compte de quelle manière on les a obtenus par l'extension et par la pénétration en profondeur des études expérimentales et théoriques.

I. — Calquée sur le modèle de la mécanique rationnelle, la physique théorique procède par voie déductive. La mécanique tout entière s'obtient en partant de certains « principes » dont l'énumération serait fastidieuse. Parmi ces principes, les trois premiers « axiomes » de Newton ont une importance particulière. Ce sont, pour les rappeler ici : le principe de l'inertie, la définition de la force, et l'axiome de l'action et de la réaction.

* Leçon d'ouverture du cours de physique mathématique donnée à l'Université de Genève le 3 novembre 1930.

Pour la physique, un principe de la mécanique qui est bien moins général que les trois axiomes de Newton a gagné une importance prédominante: le principe de conservation de l'énergie, qui énonce la constance de la somme des énergies cinétique et potentielle. Il est valide, en mécanique, uniquement dans certains cas particuliers. Toutefois, les problèmes auxquels il s'applique sont précisément parmi les plus intéressants et les plus importants, ainsi, par exemple, la plupart des problèmes de la mécanique céleste.

En physique, on a étendu la définition de l'énergie de telle façon que le principe de conservation de l'énergie présente une signification tout à fait générale. A ce principe fondamental, on a cherché à adjoindre, au cours du XIXe siècle, quelques autres lois générales permettant de prévoir, par le raisonnement pur, tous les phénomènes observables. Cette étude des bases théoriques de la physique a abouti à la constatation que la physique tout entière repose, d'une part sur les principes de la mécanique, d'autre part sur les lois de l'électromagnétisme qui complètent celles de la mécanique tout en occupant, dans une large mesure, une position indépendante.

Le besoin d'unité et de simplification nous fait désirer la disparition d'un pareil dualisme. On ne peut pas, cependant, dans l'état actuel de la physique, renoncer à maintenir cette distinction si on veut éviter des hypothèses plus ou moins arbitraires *. En effet, les recherches théoriques, qui avaient pour but de rattacher l'étude de l'électromagnétisme à la mécanique, ont conduit à la conclusion que la mécanique perd dans le cas de l'électromagnétisme sa qualité de guide infaillible qui s'était manifestée avec tant d'éclat dans d'autres parties de la physique. La théorie de l'électromagnétisme se rattache bien à la mécanique par l'intermédiaire du principe de conservation de l'énergie, mais, malgré ce lien, l'application des principes de la mécanique n'a pas apporté beaucoup de clarté dans l'étude des phénomènes électromagnétiques.

Cette insuffisance de la mécanique n'a pas éclaté dès le début

* Rappelons à cet égard l'adage newtonien: « hypotheses non fingo ».

des recherches théoriques. On s'est basé d'abord uniquement sur les conceptions mécaniques en vigueur qui suggéraient la notion de « forces » de nature particulière s'exerçant, conformément à l'axiome newtonien de l'action et de la réaction, entre des corps électrisés, aimantés ou traversés par des courants électriques. Cette manière de voir date de la fin du XVIIIe siècle et a eu pour point de départ les célèbres expériences de Coulomb. Il était possible d'élaborer ainsi, sans grandes difficultés, la théorie des effets statiques, en d'autres termes, des actions qui s'exercent entre des corps électrisés immobiles ou entre des aimants. Toutefois, Faraday, dans la première moitié du XIXe siècle déjà, a insisté fortement sur le rôle que joue le milieu interposé dans les phénomènes électrostatiques ou magnétiques. Quoiqu'en vérité l'intervention du milieu dans les effets statiques n'est aucunement en contradiction avec la théorie newtonienne de l'action à distance, elle a cependant eu pour conséquence de suggérer une interprétation différente qui, dans la suite, s'est montrée plus féconde. On s'est décidé, en effet, à suivre une voie entièrement nouvelle lorsque l'impossibilité de baser la théorie de l'électromagnétisme sur la notion de l'action à distance devint évidente.

La conception de l'action à distance avait conduit univoquement à la théorie de la gravitation universelle, de l'électrostatique, de la magnétostatique, mais lorsqu'on entreprit l'étude des effets dynamiques produits par les courants électriques, on se vit immédiatement entouré de grandes incertitudes. Ainsi, par exemple, en ce qui concerne la force agissant entre les portions infinitésimales de conducteurs parcourus par des courants, Ampère avait déduit de ses expériences une loi élémentaire basée sur les axiomes de Newton, mais Grassmann opposa à la loi d'Ampère une tout autre expression mathématique, également conforme aux principes de la mécanique et conduisant aux mêmes conséquences observables (1) *.

La découverte due à Faraday des phénomènes d'induction compliqua davantage encore les considérations théoriques. Il fallait, désormais, dans l'étude des courants variables, faire

* Voir les indications bibliographiques à la fin de ce mémoire.

intervenir la vitesse vraisemblablement finie, avec laquelle se propagent les actions électromagnétiques. Les travaux théoriques profonds, faits, à cette époque, par Wilh. Weber, Gauss, Riemann, Clausius et beaucoup d'autres physiciens et mathématiciens, tous basés sur les principes de la mécanique, ont actuellement un intérêt purement historique. Ces recherches n'apportèrent aucun éclaircissement sur la vitesse de propagation. Peu à peu, on abandonna la poursuite d'une théorie de l'électricité basée uniquement sur la mécanique, et on accepta, non sans répugnance, la conception de Faraday attribuant au milieu ambiant le rôle d'agent électromagnétique.

Cette idée a été placée par Maxwell à la base de la théorie qui porte son nom. Les fameuses équations qui permettent l'établissement de toutes les lois de l'électromagnétisme pour les corps en repos se déduisent essentiellement du principe préconisé par Faraday, et qu'on appelle le principe de l'action du milieu ou de l'action du champ.

II. — Selon le principe de l'action du milieu, toute action physique se propage nécessairement de proche en proche avec une vitesse finie, de sorte que tout événement qui se passe dans un point du milieu est défini de façon univoque par les événements qui se sont produits à des instants antérieurs infiniment voisins dans l'entourage immédiat du point considéré.

Au premier abord, le principe de l'action du champ paraît être évident. Il tire la force de conviction avec laquelle il s'impose à notre intelligence de sa relation étroite avec le principe de causalité. En l'énonçant, nous n'affirmons autre chose que le déterminisme des phénomènes physiques. Il ne semble pas qu'un pareil principe puisse être en opposition avec les principes de la mécanique. Maxwell lui-même avait la conviction que l'action du milieu doit pouvoir se déduire de ces principes, et il chercha de beaucoup de manières à parvenir, par cette voie détournée, à une interprétation mécanique des lois de l'électromagnétisme, tantôt en imaginant des modèles susceptibles de transmettre, conformément aux lois observables, l'action du milieu d'un corps à l'autre, tantôt en se livrant à des considérations théoriques plus générales. Aucune de ces tenta-

tives n'a abouti au résultat voulu. Les principes de la mécanique se sont montrés tout aussi impuissants à fournir une interprétation de l'action du milieu, qu'ils étaient incapables de guider la théorie sur la voie plus directe prise dans les recherches antérieures. On voit, du reste, immédiatement la raison pour laquelle l'interprétation mécanique de l'action du champ doit se heurter de prime abord à une grave difficulté. De même que les forces de la gravitation universelle, les actions électriques et magnétiques se propagent dans l'espace vide. Ce fait suggère évidemment l'idée de l'existence d'un milieu matériel universel. Newton s'est refusé à faire cette hypothèse qui lui a paru séduisante, mais dont il a, sans doute, reconnu les écueils. Actuellement, nous savons que l'existence d'une matière remplissant tout l'espace est en contradiction avec les constatations expérimentales les mieux établies.

L'absence de tout milieu matériel jouant le rôle d'agent mécanique prive le principe de l'action du champ d'une bonne partie de son évidence. Mais on peut attribuer au terme « milieu » une signification très large. De toute façon, le champ, qui est une grandeur bien définie, joue le rôle d'un agent physique, et on reconnaît que le principe de l'action du champ est théoriquement préférable à la notion de l'action à distance, car ce principe simplifie singulièrement la théorie et lui donne une signification expérimentale immédiatement vérifiable (2).

On n'a plus besoin de s'occuper de ce qui s'est passé à des époques reculées dans des régions éloignées de l'univers, pourvu qu'on connaisse exactement l'état actuel du champ dans l'entourage immédiat des corps considérés, état directement accessible à l'observation.

L'état du champ est caractérisé par six grandeurs déterminées qu'on appelle les « composantes du champ électromagnétique ». Ce sont les relations générales existant entre les dérivées temporelles et spatiales de ces 6 composantes qui constituent les 6 équations de Maxwell. Or, il est à remarquer que le principe de l'action du champ, joint au principe de conservation de l'énergie et complété par les données les plus immédiates et les plus sûres fournies par l'observation, conduit de façon univoque aux équations de Maxwell. On peut, par contre, obtenir diffé-

rentes théories en se basant sur l'action à distance et sur les principes de la mécanique.

Par conséquent, puisque l'expérience a vérifié complètement toutes les conséquences tirées des équations de Maxwell, on a reconnu dans ces équations l'expression adéquate des lois observables, et on peut considérer que le principe de l'action du champ doit être placé comme principe fondamental à la base de la théorie de l'électricité et du magnétisme.

III. — Les équations de Maxwell permettent la déduction de toutes les lois de l'électromagnétisme, pour autant que ces lois se rapportent à des corps en repos. La découverte la plus éclatante due à ces équations est celle de la nature électromagnétique des ondes lumineuses auxquelles se rattachent d'autres radiations également électromagnétiques de longueur d'onde plus ou moins courte, les rayons infrarouges, ultraviolets, les rayons X et gamma. La théorie de Maxwell a suggéré, d'autre part, la réalisation d'ondes électromagnétiques de grande longueur, expérience qui a été faite pour la première fois par Hertz et qui a conduit aux nombreuses applications actuellement si répandues de la télégraphie et de la téléphonie sans fil.

Le champ d'application des lois de l'électromagnétisme est d'ailleurs tellement vaste, et l'importance de ces lois pour la physique est tellement grande que, malgré les vérifications les plus impressionnantes, des doutes persistèrent concernant la validité complète des équations de Maxwell. A l'époque même où cette théorie, par ses succès inattendus, s'impose aux physiciens, de grands théoriciens tels que Henri Poincaré (3) et Ludwig Boltzmann (4) la soumettent à une critique serrée et signalent les grandes obscurités et les contradictions qui subsistent. Voici la raison de ces appréhensions:

En laissant de côté délibérément les principes de la mécanique, la théorie de Maxwell avait réussi là où ces principes avaient conduit à des échecs, mais de ce fait même, on pouvait conclure à l'existence d'un certain antagonisme, plus ou moins caché, entre les deux groupes de lois, antagonisme incompatible avec la nécessité de baser la physique théorique simultanément

sur les lois de l'électromagnétisme et sur celles de la mécanique.

En fait, la théorie se heurtait à des difficultés en apparence insurmontables, lorsqu'on cherchait à l'appliquer à l'électrodynamique et à l'optique des corps en mouvement, c'est-à-dire lorsqu'on la mettait en contact direct avec la mécanique. Pour caractériser en quelques mots la nature de ces difficultés, nous voulons considérer, pour un instant, les équations de Maxwell comme l'expression des propriétés d'un fluide matériel, l'éther, transmettant les ondes électromagnétiques (5).

Il faut alors supposer l'éther complètement entraîné dans le mouvement de la terre autour du soleil, pour tenir compte de l'absence de toute influence du mouvement de la terre sur les phénomènes optiques observés avec des sources terrestres. On doit, tout au contraire, supposer l'éther absolument immobile, comme l'avait fait Fresnel, pour interpréter les effets optiques produits par des sources extraterrestres.

Ces considérations se rapportent à une époque déjà ancienne, et les difficultés signalées n'existent plus pour la physique actuelle. Il n'est cependant pas inutile de s'arrêter un instant à l'examen d'un problème qui inquiétait les physiciens au début du XXe siècle. Nous pouvons y voir un exemple très instructif de l'énorme intérêt que peuvent présenter, dans certains cas, pour la physique tout entière des spéculations purement théoriques et même exclusivement mathématiques. En effet, chaque fois que les observations conduisent à des résultats qui ne semblent admettre aucune interprétation raisonnable, on peut être assuré que la recherche théorique poussée à fond aboutira à une grande découverte. Ce cas s'est renouvelé récemment lorsque les recherches expérimentales eurent conduit à attribuer à la lumière avec une nécessité égale d'une part une structure ondulatoire et d'autre part une structure corpusculaire. En d'autres termes, des preuves de même poids permettaient d'établir que la lumière se comporte à certains égards comme une onde (dans les phénomènes d'interférence et de diffraction) à d'autres égards comme un bombardement dû à des particules espacées (dans l'effet photoélectrique ou dans l'effet Compton). Or, ces deux suppo-

sitions avaient toujours été considérées comme contradictoires par les physiciens.

La belle théorie de la mécanique ondulatoire due à M. Louis de Broglie (6) a fait disparaître ce dilemme inquiétant quoique purement apparent, mais le principal mérite de cette théorie réside en ce qu'elle a permis d'arriver à la conception claire d'un nombre énorme de faits incompréhensibles du point de vue des théories plus anciennes.

Pareillement, la question de l'application des lois de l'électromagnétisme aux corps en mouvement a obligé les physiciens à se livrer à des considérations théoriques assez subtiles. Evidemment, il a fallu abandonner l'hypothèse de l'éther matériel, mais ce sacrifice à lui seul ne suffit pas pour concilier des constatations qui, à première vue, semblent s'exclure*. Avant tout, la théorie avait pour tâche de maintenir la validité des équations de Maxwell, entièrement vérifiées en ce qui concerne les propriétés électromagnétiques des corps en repos. En définitive, c'est l'étude des propriétés mathématiques de ces équations qui a permis de découvrir le chemin à suivre pour arriver à la résolution d'un problème qui ne semblait admettre aucune solution acceptable et pour écarter tout danger de contradiction entre les lois de l'électromagnétisme et celles de la mécanique.

IV. — Ce sont surtout les recherches théoriques de H.-A. Lorentz qui ont mis en évidence une propriété extraordinairement importante des équations de Maxwell. Ces équations conservent la même forme lorsqu'on soumet les coordonnées spatiales et le temps simultanément à une transformation linéaire très simple, dite « transformation de Lorentz ». Physiquement, cette transformation signifie que les dimensions linéaires d'un corps ainsi que les durées écoulées dépendent du rapport existant entre la vitesse du corps et une certaine vitesse critique égale à la vitesse de la lumière dans le vide. De plus, la notion de simultanéité perd sa signification universelle. On

* En effet, l'expérience montre clairement que les vecteurs du champ électro-magnétique sont entraînés dans le mouvement de la terre s'il s'agit de sources terrestres, non entraînés dans le cas de sources extra-terrestres.

ne peut plus dire que deux événements sont simultanés sans préciser l'état du mouvement du système de référence spatial auquel on rapporte les observations.

Cette découverte théorique de Lorentz a donné la clef de l'énigme de l'électrodynamique et de l'optique des corps en mouvement et elle a conduit ainsi à l'interprétation complète de toutes les constatations expérimentales relatives aux phénomènes électromagnétiques. En même temps, on avait touché du doigt la source de l'antagonisme latent existant entre les lois de l'électromagnétisme et celles de la mécanique.

Les équations de la mécanique n'avaient nullement la même propriété remarquable que les équations de Maxwell, et la transformation de Lorentz n'y jouait aucun rôle; mais il existe une autre transformation linéaire, la transformation de Galilée, qui laisse inchangée la forme des équations de mouvement newtoniennes. Mathématiquement, la transformation de Galilée est très proche de la transformation de Lorentz, tout en présentant un caractère plus simple que celle-ci. La mécanique classique ignore, en effet, l'existence d'une vitesse limite. Il fallait faire disparaître ce désaccord entre la mécanique et l'électromagnétisme pour pouvoir se servir en physique simultanément des deux groupes de lois.

Le mérite d'avoir reconnu clairement cette nécessité revient à A. Einstein. En attirant l'attention sur la signification cinématique et mécanique des équations de la transformation de Lorentz, Einstein a créé la théorie de la relativité restreinte qui établit l'harmonie entre les principes fondamentaux de la physique au prix d'une retouche, en somme assez légère, apportée à la mécanique de Newton. Dans la mécanique relativiste, le quatrième axiome de Newton, le principe de relativité de Galilée, est remplacé par le principe de relativité plus compréhensif d'Einstein. Ainsi se trouve exclue définitivement toute possibilité de contradiction entre les lois de la mécanique et celles de l'électromagnétisme, grâce à une modification dont la mécanique a retiré elle-même le plus grand bénéfice. La masse du point matériel est, dans la mécanique relativiste, une fonction de sa vitesse telle que les équations du mouvement conservent une forme invariante lorsqu'on les soumet à la

transformation de Lorentz. On peut alors appliquer ces équations aux mouvements extrêmement rapides qui satisfont très exactement aux lois prévues par Einstein. Une des conséquences les plus remarquables de la théorie est la proportionalité entre la masse inerte et le contenu énergétique d'un corps.

La cinématique et la mécanique d'Einstein sont mathématiquement moins simples que les théories newtoniennes correspondantes. Dans beaucoup de problèmes on se heurte à des difficultés provenant du fait que le temps relativiste n'a plus le rôle d'une variable indépendante. Il est devenu une variable d'état du corps, car dans la cinématique relativiste, la durée écoulée dépend de la vitesse du corps. Nous voyons par cet exemple que la clarté et la simplicité des conceptions fondamentales sont souvent rachetées, en physique, par une plus grande complexité des opérations exigées pour la résolution des problèmes. Il en résulte que la physique, au fur et à mesure de ses progrès, doit avoir recours aux branches les plus variées des mathématiques. L'importance grandissante des notions abstraites n'est nullement due aux spéculations des théoriciens, elle provient de l'approfondissement incessant des recherches expérimentales et de l'extension toujours croissante des connaissances fournies par l'observation.

Aussi, l'achèvement de l'œuvre accomplie par H.-A. Lorentz et par A. Einstein est-il dû à un mathématicien, H. Minkowski, qui a découvert la signification quadri-dimensionnelle de la transformation de Lorentz et, par suite, l'interprétation la plus simple qu'on peut donner aux équations de Maxwell. De ses considérations purement mathématiques, Minkowski a tiré la conclusion que les phénomènes physiques se passent en réalité dans une multiplicité à quatre dimensions qui forme un tout appelé espace-temps ou univers.

La décomposition apparente de cette multiplicité en un espace bien défini à 3 dimensions et un temps indépendant du système de référence spatial est due à la circonstance que, dans les conditions habituelles d'observation, les vitesses de tous les corps sont très petites en comparaison de la vitesse limite. Si la représentation quadridimensionnelle fournit des méthodes relativement simples et très élégantes permettant de maîtriser

les difficultés des problèmes de la mécanique relativiste, elle est, de plus, comparable en valeur aux plus grandes découvertes scientifiques, et a eu pour le développement ultérieur de la physique une importance qu'on ne saurait surestimer (7).

Une généralisation de la conception de l'univers de Minkowski a permis à Einstein de donner, dans sa théorie générale de la relativité, une interprétation de la gravitation universelle conforme au principe de l'action du champ. La construction rationnelle d'un milieu susceptible de transmettre des actions physiques est donc possible, et on voit ainsi un rapprochement très suggestif se produire entre les deux catégories de lois fondamentales de la physique. De plus, la théorie de la gravitation d'Einstein fournit la preuve manifeste du fait que la validité du principe de l'action du milieu n'est nullement liée à l'hypothèse naïve et certainement inexacte d'une matière remplissant l'espace entier (8, 9).

V. — La théorie actuelle de l'électromagnétisme n'est, d'ailleurs, pas tout à fait identique à la théorie primitive de Maxwell. Elle attribue un rôle important aux centres matériels desquels émanent les actions électrostatiques, et elle se rapproche ainsi des théories plus anciennes basées sur l'idée d'une action à distance transmise avec une vitesse finie. Quoiqu'il n'existe plus d'antagonisme entre la mécanique et la théorie électromagnétique basées, toutes deux, dans une large mesure, sur des conceptions pareilles, il ne faudrait cependant pas croire que la séparation entre les deux domaines ait disparu. En effet, les équations du champ de gravitation d'Einstein ne montrent aucune analogie avec les équations beaucoup plus simples de la théorie de Maxwell. Il n'est plus question de considérer les lois de l'électromagnétisme comme un cas particulier de celles de la mécanique. Dans la physique actuelle, les deux groupes de lois sont autonomes quoiqu'étroitement connexes, et on ignore encore dans une large mesure de quelle façon les effets dûs à la charge électrique du point matériel se rattachent aux propriétés de sa masse inerte et gravitante.

Nous savons actuellement que la matière est entièrement composée de centres électrisés, d'électrons et de protons, entre

lesquels agissent des forces électromagnétiques. L'électromagnétisme et les principes de la mécanique se trouvent ainsi placés à la base de la théorie de la matière. Aux innombrables centres contenus dans le moindre fragment de matière, on ne peut appliquer les lois théoriques qu'en prenant des moyennes statistiques. Pour les phénomènes statiques et stationnaires, on retrouve ainsi, comme l'a montré Lorentz (10), les lois de l'électromagnétisme qui découlent des équations de Maxwell. Par contre, les phénomènes dynamiques, les effets dans lesquels interviennent les échanges d'énergie entre les atomes, obéissent aux deux principes fondamentaux de la thermodynamique résumant nos connaissances relatives à la chaleur.

La thermodynamique elle-même doit se déduire, grâce aux considérations statistiques, des principes de la mécanique et des équations de Maxwell, appliquées aux mouvements des molécules, des atomes et de leurs éléments constituants, en tenant compte, de plus, des échanges d'énergie rayonnante. On est ainsi conduit à l'étude de la constitution des atomes, rendue accessible à l'observation grâce aux recherches spectroscopiques.

VI. — Avec les questions concernant la structure intime des atomes, ainsi que les relations entre cette structure et les propriétés de l'énergie rayonnante, nous sommes arrivés au seuil de la théorie des quanta qui constitue le chapitre le plus récent de la physique théorique. L'électromagnétisme y intervient, étroitement rattaché à la mécanique. Il serait donc utile d'interpréter la relation existant entre la charge électrique et l'inertie mécanique des centres matériels qui forment les systèmes atomiques. On connaît depuis fort longtemps déjà et avec une grande précision les rapports numériques des masses et des charges de l'électron et du proton, mais la signification théorique de ces rapports reste à trouver. Les progrès de la théorie des quanta apporteront peut-être, à cet égard, les éclaircissements désirables.

Dans son dernier degré de développement, la physique se trouve enrichie d'un principe entièrement distinct des principes mentionnés jusqu'ici. De même que l'électromagnétisme avait

été, au début, placé en opposition avec la mécanique classique, l'étude de la structure des atomes et de l'émission et de l'absorption de l'énergie rayonnante a mis en évidence des lois qui semblèrent étranges et contraires aux conceptions plus anciennes (11). Comme nous l'avons vu, on arrivait, entre autres, à attribuer à l'énergie rayonnante électromagnétique une structure corpusculaire, car ce qu'on supposait être des ondes se comportait manifestement à d'autres égards comme un essaim de centres de condensation d'énergie qu'on a appelés les « photons ». De même que Einstein, en acceptant purement et simplement le verdict de l'expérience pour en dégager les conclusions théoriques, avait créé la mécanique de relativité, Louis de Broglie a tiré de l'existence des photons et de la théorie ondulatoire de la lumière leur conséquence logique, la mécanique ondulatoire, et a apporté ainsi des éclaircissements qui ont eu une influence décisive sur le développement ultérieur de la physique atomique (12).

Un essaim de centres de condensation d'énergie doit produire statistiquement les mêmes effets qu'une onde homogène, pourvu qu'on associe à chaque centre une onde élémentaire. Or, du point de vue de la mécanique relativiste, un point matériel n'est autre chose qu'un centre de condensation d'énergie. On peut donc associer, réciproquement, à tout point matériel une onde dont les pulsations sont d'autant plus fréquentes que la masse du point matériel est plus grande *. Je me borne à mentionner cette belle théorie, ainsi que lès applications extraordinairement importantes pour la mécanique atomique qu'en a tirées E. Schrödinger (13).

En ce qui concerne l'électromagnétisme, il importe de signaler ici une indication que donne la théorie des quanta sur la nature de l'agent assez mystérieux qui transmet à travers le vide les effets électromagnétiques.

Ignorant complètement les propriétés de cet agent, on était, au fond, dans une position assez délicate, lorsque la poursuite

* Ce fait résulte, d'une part de la loi fondamentale de la théorie des quanta énoncée par Planck, d'autre part, du principe de l'inertie de l'énergie, conséquence de la mécanique relativiste.

des recherches sur les relations existant entre la matière et l'énergie rayonnante conduisit à des difficultés constamment renouvelées. Malgré toute l'ingéniosité dépensée pour maintenir l'accord entre la théorie et les résultats des observations, la théorie se montrait de moins en moins capable d'introduire de l'ordre dans la complexité des données expérimentales, et il devint évident qu'il fallait apporter une correction aux conceptions théoriques en vigueur, pour ne pas se perdre dans une obscurité de plus en plus épaisse.

Or, il est très remarquable qu'au milieu de ces complications et de ces incertitudes, on n'a jamais mis en doute la validité entière des équations de Maxwell. Ces équations devaient leur position exceptionnelle surtout à leur relation étroite avec le principe de relativité d'Einstein et avec l'espace-temps de Minkowski dont elles étaient les représentants les plus manifestes.

En fait, les renseignements récents fournis par la mécanique ondulatoire n'apportent qu'une très légère modification à la conception de l'action du champ sur laquelle reposent les équations de Maxwell. Pour les lois, dites « macroscopiques », caractérisant les propriétés électromagnétiques de la matière, la théorie de Lorentz a montré qu'elles ont une signification statistique, puisqu'elles sont, dans chaque cas, l'expression de l'effet moyen produit par un nombre énorme d'électrons. A ce degré du développement de la théorie, on était peut-être déjà amené à se poser la question de savoir si les équations fondamentales de la théorie de Maxwell, celles qui se rapportaient au champ produit dans le vide et, par suite, aux actions intra-atomiques, n'avaient pas une signification analogue. A cette question, la théorie des quanta nous permet maintenant de donner une réponse affirmative. Non seulement les équations de l'électromagnétisme mais toutes les lois de la physique ont une signification statistique et ne peuvent avoir d'autre signification. Dans la mécanique ondulatoire de de Broglie et de Schrödinger, les grandeurs mécaniques apparaissent affectées d'une certaine imprécision, qui est caractérisée par la relation d'indétermination de Heisenberg indiquant la limite de la plus grande exactitude pouvant être atteinte dans les mesures

mécaniques *. Puisque toute la physique repose, en définitive, sur des mesures mécaniques, l'existence de la relation d'indétermination a, pour la physique tout entière, une importance fondamentale (14, 15). Elle limite la tâche de la théorie, en lui imposant l'obligation de se borner à des considérations statistiques, car les spéculations théoriques ne doivent en aucun cas être portées au-delà des possibilités de vérification expérimentale.

VII. — Parmi les principes mis en évidence par l'étude des lois de l'électromagnétisme, c'est incontestablement le principe de relativité qui a contribué le plus aux progrès récents de la physique théorique. Joint au principe de l'action du milieu, il a inspiré la magnifique théorie de la gravitation universelle d'Einstein. Toutefois, la gravitation ne joue aucun rôle appréciable dans les phénomènes intramoléculaires et intra-atomiques sur lesquels se concentrent actuellement les efforts des physiciens et des chimistes. C'est donc la théorie de la relativité restreinte, et non pas la théorie générale de la relativité, qui s'est montrée particulièrement utile pour guider les recherches expérimentales et théoriques relatives à la façon dont se comportent les électrons à l'intérieur des atomes.

La théorie de la relativité restreinte a inspiré pour une grande part les raisonnements qui se trouvent à la base de la mécanique ondulatoire. De bonne heure déjà, M. Sommerfeld a tiré de la théorie de la relativité restreinte l'interprétation de la structure fine du spectre de l'atome de l'hydrogène. Plus récemment, Dirac a réussi à obtenir les équations relativistes de la mécanique ondulatoire de l'électron. Cette question présente une grande importance pour le sujet qui nous occupe ici, car nous touchons là à l'origine de tous les phénomènes électromagnétiques. L'équation de Dirac, venant à la suite de celle de Schrödinger, et perfectionnant la théorie des quanta en plusieurs points importants, a apporté une vive clarté dans la complexité vraiment effrayante des lois spectroscopiques (16).

* Cette limite d'indétermination est de l'ordre de grandeur du « quantum d'action ». Voici à quoi se réduit, en dernière analyse, le principe du quantum d'action de Planck.

Elle a confirmé la théorie relativiste de Sommerfeld, en fournissant, de plus, à cette théorie, les compléments nécessaires pour la mettre en accord avec toutes les constatations expérimentales. On savait déjà, par l'étude des spectres, sans pouvoir rattacher ce fait à la théorie générale, que l'électron joue non seulement le rôle de l'atome de l'électricité négative, mais qu'il porte en même temps — grâce à sa structure particulière — le moment magnétique élémentaire universel, le magnéton de Bohr. Cette propriété de l'électron avait été énoncée sous la forme d'une hypothèse hardie, l'hypothèse du « spin » de l'électron, par Goudsmit et Uhlenbeck. Elle a été introduite par Pauli dans la théorie du magnétisme, précisant l'ancienne notion des « courants moléculaires d'Ampère » (17).

L'équation de Dirac (18), basée essentiellement sur la théorie mathématique de la transformation de Lorentz, permet de démontrer que le « spin de l'électron » est une conséquence nécessaire du postulat de l'invariance relativiste, auquel doivent satisfaire les équations fondamentales de la mécanique quantique. De plus, on peut espérer que la continuation de ces recherches très récentes et entourées actuellement encore de grandes incertitudes aboutira, grâce à la nouvelle conception relativiste de la mécanique ondulatoire, à l'abolition de toute séparation entre l'électromagnétisme et la mécanique. Ce sera là un exemple très réjouissant du triomphe toujours renouvelé de la physique théorique qui, à travers le désordre apparent des faits variés mis en évidence par l'observation, poursuit victorieusement sa marche vers l'unité.

BIBLIOGRAPHIE

1. R. Reiff et A. Sommerfeld. *Standpunkt der Fernwirkung. Elementargesetze.* Encyklopädie der math. Wissenschaften. Vol. V, 2. Leipzig (Teubner), 1904.
2. M. Planck. *Einführung in die theoretische Physik.* 5 volumes. Leipzig (Hirzel), 1920-1930. Vol. 3. *Einführung in die Theorie der Elektrizität und des Magnetismus*, 1922.
3. H. Poincaré. *Electricité et optique. La lumière et les théories électrodynamiques.* 2me édit. Paris (Carré et Naud), 1901.

4. L. Boltzmann. *Vorlesungen über Maxwells Theorie der Elektrizität und des Lichtes.* 2me édit. Leipzig (Barth), 1908.
5. H.-A. Lorentz. *Maxwells elektromagnetische Theorie.* Encyklop. d. math. Wiss., Vol. V, 2. Leipzig (Teubner), 1904.
6. L. de Broglie. *Ondes et mouvements.* Paris (Gauthier-Villars), 1926.
7. H.-A. Lorentz, A. Einstein, H. Minkowski. *Das Relativitätsprinzip.* Leipzig-Berlin (Teubner), 1920.
8. H. Weyl. *Raum. Zeit. Materie.* 5me édit. Berlin (Springer), 1923. Traduct. de G. Juvet et R. Leroy. *Temps. Espace. Matière.* Paris (Blanchard), 1922.
9. W. Pauli. *Relativitätstheorie.* Leipzig-Berlin (Teubner), 1921.
10. H.-A. Lorentz. *Weiterbildung der Maxwellschen Theorie. Elektronentheorie.* Encyklopädie d. math. Wiss., Vol. V, 2. Leipzig (Teubner), 1904.
11. A. Sommerfeld. *Atombau und Spektrallinien.* 4me édit. Braunschweig (Vieweg), 1924.
12. L. de Broglie. *Introduction à l'étude de la mécanique ondulatoire.* Paris (Hermann), 1930.
13. E. Schrödinger. *Abhandlungen zur Wellenmechanik.* Leipzig, 1927.
14. A. Sommerfeld. *Atombau und Spektrallinien. Wellenmechanischer Ergänzungsband.* Braunschweig (Vieweg), 1929.
15. E. Bloch. *L'ancienne et la nouvelle théorie des quanta.* Paris (Hermann), 1930.
16. A. Haas. *Materiewellen und Quantenmechanik.* 3me édit. Leipzig, 1930. Traduct. de A. Bogros et F. Esclangon. *La mécanique ondulatoire et les nouvelles théories quantiques.* Paris (Gauthier-Villars), 1930.
17. H. Weyl. *Gruppentheorie und Quantenmechanik.* Leipzig (Hirzel), 1928.
18. P.-A.-M. Dirac. *The Principles of Quantum Mechanics.* Oxford (University Press), 1930.