Extrait des *Annales de la Société scientifique de Bruxelles*
Tome LVII, série I, p. 99.

Les récentes conceptions théoriques sur la lumière

PAR

LOUIS DE BROGLIE (1)

Je voudrais parler aujourd'hui des théories récentes sur la Lumière développées au cours de ces toutes dernières années. Je vous parlerai surtout de la théorie que j'ai développée en partant des idées analysées à la fin de ma précédente conférence. Je vous parlerai aussi un peu d'une autre théorie, assez analogue d'aspect au premier abord, qui a été proposée par M. Pascual Jordan sous l'inspiration de mes premiers travaux et qui a été ensuite étudiée par divers savants (MM. de Kronig, Born, etc.). Ces deux théories sont au fond si différentes l'une de l'autre qu'il convient, pour éviter toute confusion, de leur donner des noms différents mettant bien en relief ce qui les oppose. J'appellerai donc la théorie que j'ai proposée et que je continue à développer du nom de « théorie du photon » parce qu'elle admet essentiellement l'existence du photon en tant qu'unité physique réelle et cherche à décrire le comportement de cette unité physique. Au contraire, je désignerai du nom de « théorie neutrinienne de la lumière » la théorie due à M. Jordan, traduisant le nom même de « Neutrinotheorie des Lichtes » que lui a donné son auteur : la caractéristique essentielle de la théorie de M. Jordan est, en effet, de nier l'existence réelle du photon et de considérer les quanta de lumière comme une apparence due au mode d'action sur la matière d'un ensemble de neutrinos *indépendants*.

Je veux d'abord retracer la marche de ma pensée depuis que j'ai commencé à m'occuper de la théorie de la lumière, et résumer les principes directeurs qui m'ont guidé dans mes premières recherches. Comme je l'ai déjà expliqué dans ma précédente conférence (2), une théorie de la particule « photon » ne peut reposer que sur une Mécanique ondulatoire relativiste introduisant des éléments de symétrie analogues à la polarisation et per-

(1) Conférence faite à l'Institut de Physique de l'Université de Louvain, le 3 mars 1937.
(2) Cette première conférence faite à l'Université de Louvain, le 2 mars 1937, sous le titre « Vue générale sur l'histoire des théories de la Lumière » est publiée par la *Revue des Questions scientifiques*, 20 mai 1937, pp. 361-381.

mettant de définir des champs électromagnétiques attachés à la particule. La Mécanique ondulatoire de l'électron de Dirac remplit en partie ces conditions, parce qu'elle est relativiste et applicable à des particules ayant toutes les vitesses jusqu'à c, parce qu'elle introduit le spin dont l'existence est expérimentalement établie et que le spin a une certaine analogie avec la polarisation, enfin parce qu'elle définit un moment magnétique et un moment électrique dont les densités de volume ont les dimensions physiques, respectivement, d'un champ magnétique et d'un champ électrique. La première idée que j'ai eue a été d'admettre que le photon est un corpuscule de charge électrique nulle et de masse propre nulle ou évanouissante obéissant aux équations de la théorie de Dirac, est un corpuscule de Dirac comme nous dirons pour abréger. Après quelques succès partiels, je me suis trouvé complètement arrêté dans cette voie. Les raisons de cet échec sont les suivantes. D'abord le spin d'un corpuscule de Dirac a bien une certaine parenté avec la polarisation de la lumière, mais il ne lui est pas identique ; ensuite on peut bien attacher à un corpuscule de Dirac un champ électromagnétique, mais ce champ n'a pas les caractères nécessaires pour pouvoir représenter la lumière. Si on définit en effet le champ électromagnétique comme attaché à un état du photon, il ne peut représenter l'action du photon sur la matière, car toute action de ce genre fait nécessairement varier l'état du photon. Si au contraire, introduisant une idée qui est devenue essentielle dans ma conception, nous cherchons à lier le champ électromagnétique au changement d'état subi par le photon quand il agit sur la matière, alors il faudra connaître l'état initial et l'état final du photon pour pouvoir préciser la valeur de son champ électromagnétique, de sorte que le photon considéré dans son état initial supposé donné aura une infinité de champs électromagnétiques possibles variables suivant l'état final qu'on lui attribuera. Or, en fait, une onde lumineuse possède toujours un champ électromagnétique parfaitement déterminé : dans le cas général, ce champ électromagnétique n'est pas monochromatique et doit être représenté par un développement de Fourier, mais les coefficients de ce développement de Fourier ont toujours une valeur parfaitement déterminée. L'identification du photon avec un seul corpuscule de Dirac se heurte donc à des difficultés insurmontables quant à la définition du champ électromagnétique qui l'accompagne. Après cette tentative infructueuse, j'ai considéré comme établis les deux points essentiels suivants : 1° Le champ électromagnétique du photon, traduisant la manière dont il peut agir sur la matière, doit être lié au changement d'état, à la transition quantique, que le photon subit quand il agit sur la matière ; 2° Le champ électromagnétique d'une onde lumineuse étant toujours unique et bien déterminé, il faut donc que l'état final du photon soit déterminé par son état initial, c'est-à-dire que l'état initial supposé donné du photon doit impliquer en quelque sorte l'état final où il doit se trouver après son action sur la matière.

Le problème étant ainsi posé, j'ai fait immédiatement un rapprochement avec un fait physique auquel j'avais souvent réfléchi dans mes études antérieures, et sur lequel d'ailleurs mon frère à la suite de ses recherches expérimentales sur l'effet photoélectrique des Rayons X avait plus d'une fois appelé mon attention. Ce fait physique, c'est le caractère tout à fait particulier, tout à fait exceptionnel, que présente dans l'ensemble des phénomènes d'interaction entre particules l'interaction entre photon et particule matérielle auquel on donne le nom d'effet photoélectrique. En général, quand il y a interaction entre deux particules matérielles, choc au sens le plus général du mot, le résultat final est un échange d'énergie entre ces particules avec conservation de l'énergie totale, mais après le choc on retrouve les deux particules avec des énergies variables suivant les circonstances du choc. L'action photoélectrique d'un photon sur un électron se présente tout autrement : il y a toujours cession totale de son énergie par le photon à l'électron avec disparition, annihilation au point de vue énergétique, du photon. Il n'y a jamais effet photoélectrique partiel où le photon céderait une grande partie de son énergie sans la céder toute. Sans doute, il y a l'effet Compton, mais c'est un phénomène très différent de l'effet photoélectrique où la perte d'énergie du photon est généralement minime. D'ailleurs, d'après la théorie de l'effet Compton faite par la Mécanique ondulatoire, il semble qu'on doive considérer l'effet Compton comme résultant de l'absorption photoélectrique d'un photon incident suivi de l'émission d'un autre photon, les deux processus ayant pour résultat final la conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement, ce qui justifie la théorie élémentaire de l'effet Compton. Le seul mode d'action direct de la lumière sur la matière, le seul processus élémentaire, par lequel la lumière puisse produire des effets observables, paraît bien être l'effet photoélectrique où il y a annihilation énergétique du photon avec cession totale de son énergie à la matière. La conséquence nécessaire de cette constatation est alors qu'il doit y avoir dans la structure du photon une particularité, n'existant pas dans celle des particules matérielles ordinaires, qui lui permet, quand il en a l'occasion au contact de la matière, de s'annihiler complètement au point de vue énergétique en cédant toute son énergie à l'extérieur. Or une telle structure est aujourd'hui assez facile à concevoir, depuis que le développement de la théorie de Dirac nous a suggéré l'idée de corpuscules complémentaires, et depuis surtout que l'expérience a prouvé l'existence réelle du corpuscule complémentaire de l'électron : le positon ou électron positif.

Comme je l'ai rappelé dans la conférence précédente, les équations qui forment la base de la théorie de Dirac admettent des solutions à énergie négative, et M. Dirac a été amené à concevoir l'existence d'électrons positifs comme constitués par une « lacune », une place inoccupée, dans la distribution des états à énergie négative qu'il suppose être tous normalement occupés par des électrons inobservables. L'électron positif conçu de cette façon doit posséder la propriété de pouvoir être neutralisé par un électron négatif si celui-ci vient combler la lacune, la place vide, dont le positon n'est que la manifestation observable. Il y a alors annihilation réciproque et simultanée des deux électrons avec mise en liberté de leur énergie totale. De plus, on sait qu'il existe réellement des électrons positifs, et tout porte à croire qu'ils possèdent bien les propriétés pour eux prévues par M. Dirac. En particulier, il est très vraisemblable qu'un couple formé d'un électron positif et d'un électron négatif est réellement susceptible, conformément aux prévisions théoriques, de se « dématérialiser » en cédant la totalité de son énergie à l'extérieur. Nous dirons que l'électron positif est le corpuscule complémentaire de l'électron négatif et qu'une paire de corpuscules complémentaires est susceptible d'annihilation totale. Plus généralement pour tout corpuscule, quelles que soient sa masse propre et sa charge électrique, qui obéit à des équations de la forme de Dirac (et par suite possède comme l'électron un spin $\frac{h}{4\pi}$), doit exister aussi un corpuscule complémentaire dans le même sens du mot et une paire formée par un tel corpuscule et un corpuscule complémentaire devra être susceptible d'annihilation totale.

Dès lors, après tout ce que je viens de dire, il apparaît comme probable que nous devons essayer de concevoir le photon comme une paire formée par deux corpuscules complémentaires l'un de l'autre obéissant chacun aux équations de Dirac. Cette paire possédera, en effet, la propriété très exceptionnelle de pouvoir s'annihiler complètement quand, se trouvant en présence de la matière, elle pourra lui céder la totalité de son énergie et ceci expliquera parfaitement le caractère essentiel si particulier de l'effet photoélectrique. Cette hypothèse apparaît d'ailleurs comme très séduisante à d'autres points de vue. D'abord, chacun des deux corpuscules élémentaires constituants (nous les nommerons, pour ne rien préjuger de leur nature, des demi-photons) ayant par hypothèse un spin $\frac{h}{4\pi}$, le photon aura trois valeurs possibles par son spin, savoir $+\frac{h}{2\pi}$, 0 et $-\frac{h}{2\pi}$ suivant que les spins des deux demi-photons s'ajouteront dans le sens positif, se retrancheront ou s'ajouteront dans le sens négatif. Or il y a des raisons, connues avant le développement de ma théorie, pour attribuer au photon un spin égal à $\pm\frac{h}{2\pi}$. Le résultat ici obtenu est donc satisfaisant, mais il reste à interpréter la valeur 0 du spin : nous verrons qu'elle correspond à des ondes longitudinales de potentiel dont l'intervention, possible même en théorie de Maxwell, avait déjà été remarquée. Un autre avantage très important de l'hypothèse photon = paire de corpuscules complémentaires vient du fait suivant : nous sommes absolument sûrs que les photons obéissent à la statistique de Bose-Einstein, et non à celle de Fermi-Dirac comme les électrons, car la statistique de Bose-Einstein peut seule mener à la loi de Planck pour le rayonnement noir. Or, si l'on admet que tous les corpuscules élémentaires de spin $\frac{h}{4\pi}$ obéissent à la statistique de Fermi, un théorème général de Mécanique ondulatoire nous apprend que toute particule complexe formée d'un nombre *pair* de corpuscules élémentaires doit obéir à la statistique de Bose. Pour démontrer ce théorème, on part de ce fait que la fonction d'onde d'un système de corpuscules élémentaires obéissant à la statistique de Fermi est antisymétrique, c'est-à-dire qu'elle change de signe quand on permute le rôle dans le système de deux corpuscules. Si alors on considère une assemblée de particules complexes formées chacune de N corpuscules élémentaires, pour permuter le rôle de deux de ces particules dans cette assemblée, il faudra permuter le rôle de chacun des N corpuscules de la première et du corpuscule correspondant de la seconde, ce qui multipliera la fonction d'ondes du système total par le facteur $(-1)^N$, donc par 1 si N est pair. La permutation de deux particules ne modifie donc pas la fonction d'onde, et par suite les particules suivent la statistique de Bose. L'hypothèse que le photon est une particule complexe formée de deux corpuscules élémentaires entraîne donc qu'il obéit à la statistique de Bose, et le passage de la statistique de Fermi valable pour le demi-photon à celle de Bose valable pour le photon se fait ici exactement comme pour toute particule complexe à nombre pair de constituants, comme par exemple les particules α. Nous verrons qu'il n'en est pas de même dans la théorie neutrinienne de la lumière de M. Jordan.

Pour développer la théorie du photon, une fois admise l'hypothèse que le photon est formé de deux corpuscules complémentaires, j'ai cherché à définir un champ électromagnétique lié à la « transition d'annihilation » où le demi-photon vient combler la lacune constituée par le demi-photon complémentaire. Cette transition étant parfaitement déterminée puisqu'elle est donnée dès qu'on se donne l'état initial du photon, c'est-à-dire l'état initial d'un des demi-photons et de la lacune complémentaire, on est sûr de trouver un champ électromagnétique parfaitement défini en accord avec les propriétés réelles de la lumière. En m'inspirant de la théorie de Dirac, je suis en effet arrivé ainsi à construire un champ électromagnétique associé au photon, champ électromagnétique univoquement défini qui, dans le cas où le mouvement du photon est rectiligne et uniforme, reproduit toutes les propriétés de l'onde plane Maxwellienne, si du moins on suppose nulle ou négligeable la masse propre du demi-photon. Mais la théorie obtenue, bien que déjà beaucoup plus satisfaisante que celle obtenue primitivement par moi en identifiant le photon avec un seul corpuscule de Dirac, soulève encore des difficultés. En effet, chaque grandeur *électromagnétique y est représentée par une expression de la forme* $\Psi'^{*}F\Psi$ où Ψ est la fonction d'onde du demi-photon qui subit la transition et Ψ'^{*} la fonction conjuguée de la fonction d'onde du demi-photon complémentaire : F est un opérateur qui dépend de la grandeur électromagnétique envisagée. Or cette définition présente, comme on s'en rend compte aisément, l'inconvénient capital de ne pas être en accord avec le « principe de superposition », principe dont la validité est indispensable pour pouvoir rendre compte des phénomènes d'interférences de la lumière. A cette impossibilité de superposer les champs électromagnétiques définis par des expressions du type $\Psi'^{*}F\Psi$ se rattache le fait que les champs ainsi définis n'obéissent pas dans le cas général aux équations de Maxwell.

Quand on cherche l'origine de cette difficulté, on s'aperçoit qu'elle est reliée à la manière dissymétrique dont est définie la transition d'annihilation : on la considère en effet comme le passage d'un des demi-photons de son état initial à un état final déterminé à l'avance par l'existence de la lacune, et ceci amène à mettre les fonctions d'onde représentant le demi-photon et la lacune complémentaire de part et d'autre de l'opérateur F dans les expressions $\Psi'^{*}F\Psi$. Or, en réalité, la lacune existe dans l'état initial sous forme de demi-photon complémentaire et la transition résulte du passage d'un état initial où existent les deux demi-photons complémentaires à un état final où cette paire est énergétiquement annihilée. La forme exacte de l'expression des grandeurs électromagnétiques doit donc être $\Phi^{(o)}F\Phi$, où Φ est la fonction d'onde représentant l'état initial de la particule « photon » avec ces deux constituants élémentaires et où $\Phi^{(o)}$ représente l'état final d'annihilation que l'on peut supposer unique. Le principe de superposition est alors visiblement satisfait. De plus, comme il y a tout lieu d'admettre que la fonction $\Phi^{(o)}$ est indépendante des coordonnées d'espace et de temps, les expressions $\Phi^{o}F\Phi$ représenteront certaines combinaisons linéaires des composantes de la fonction d'onde Φ du photon. Ainsi, cette nouvelle forme de la théorie, qui traduit le rôle symétrique des deux constituants complémentaires dans l'état initial du photon, et qui est conforme au principe de superposition, *conduit à définir* toute grandeur électromagnétique liée au photon par une certaine combinaison linéaire des composantes de la fonction d'onde Φ du photon. Voyons comment on peut la développer.

Pour obtenir les équations de propagation pour l'onde associée au photon, j'ai employé une méthode qui m'a, je crois, conduit au but à atteindre, mais dont la véritable signification ne m'est apparue que plus tard. Je vais d'abord exposer cette méthode, quitte à revenir un peu plus loin sur sa signification réelle.

Puisque, avec le point de vue auquel j'étais parvenu, le photon doit être constitué de deux corpuscules de Dirac complémentaires l'un de l'autre, j'ai d'abord écrit les équations d'onde pour les corpuscules considérés isolément.

Pour la première corpuscule, j'écris donc l'équation ordinaire de Dirac, en désignant par $\frac{\mu_o}{2}$ la masse propre du demi-photon. Ceci me donne :

$$(1) \quad \frac{1}{c}\frac{\partial \Psi_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\sum_l (\alpha_1)_{il}\Psi_l + \frac{\partial}{\partial y}\sum_l (\alpha_2)_{il}\Psi_l + \frac{\partial}{\partial z}\sum_l (\alpha_3)_{il}\Psi_l + \frac{\kappa\mu_o c}{2}\sum_l (\alpha_4)_{il}\Psi_l$$

avec $i = 1, 2, 3, 4$ et $\kappa = \frac{2\pi\sqrt{-1}}{h}$. Les matrices α sont celles qu'on emploie habituellement en théorie de Dirac et qui jouissent de la propriété exprimée par la formule $\alpha_i\alpha_j + \alpha_j\alpha_i = 2\delta_{ij}$ où δ_{ij} est la matrice zéro pour $i \neq j$ et la matrice unité pour $i = j$. Pour le corpuscule complémentaire, des raisons que j'ai exposées dans mes travaux sur la question m'ont conduit à écrire l'équation :

$$(2) \quad \frac{1}{c}\frac{\partial \varphi_k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\sum_m (\alpha_1)_{km}\varphi_m - \frac{\partial}{\partial y}\sum_m (\alpha_2)_{km}\varphi_m + \frac{\partial}{\partial z}\sum_m (\alpha_3)_{km}\varphi_m - \frac{\kappa\mu_o c}{2}\sum_m (\alpha_4)_{km}\varphi_m$$

avec $k = 1, 2, 3, 4$. Puis j'ai cherché à traduire tant bien que mal le fait que les demi-photons ne sont pas indépendants, mais forment selon moi une sorte de particule complexe, en écrivant que les demi-photons participant au même mouvement d'ensemble, ont même énergie et même quantité de mouvement, ce qui m'a conduit à écrire les relations :

$$(3) \quad \varphi_k\frac{\partial \Psi_i}{\partial q} = \Psi_i\frac{\partial \varphi_k}{\partial q} = \frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial q}(\Psi_i\varphi_k) = \frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial q}\Phi_{ik}$$

q étant l'une quelconque des 4 coordonnées d'espace-temps x, y, z, t et $\Phi_{ik} = \Psi_i\varphi_k$ étant considérée comme définissant la fonction d'onde Φ à 16 composantes de la particule « photon ».

Définissons alors 8 matrices à 16 lignes et 16 colonnes par les formules :

$$(4) \quad (A_r)_{ik,lm} = (\alpha_r)_{il}\,\delta_{km}\,; \quad (B_r)_{ik,lm} = \begin{cases} (\alpha_r)_{km}\,\delta_{il} \text{ pour } r = 1 \text{ et } 3 \\ (-\alpha_r)_{km}\,\delta_{il} \text{ pour } r = 2 \text{ et } 4 \end{cases}$$

tous les indices pouvant varier de 1 à 4.

Enfin, nous inspirant d'une abréviation souvent employée en théorie de Dirac, posons :

$$(5) \quad A_r\,\Phi_{ik} = \sum_{lm}(A_r)_{ik,lm}\,\Phi_{lm} \text{ etc...}$$

Alors, en multipliant les équations (1) et (2) par φ_k et Ψ_i respectivement et en tenant compte de la relation (3) et des définitions (4) et (5), nous obtenons aisément les deux équations :

$$(6) \qquad \frac{1}{c}\frac{\partial \Phi_{ik}}{\partial t} = \left(\frac{\partial}{\partial x}A_1 + \frac{\partial}{\partial y}A_2 + \frac{\partial}{\partial z}A_3 + \kappa\mu_o c\, A_4\right)\Phi_{ik}$$

$$(7) \qquad \frac{1}{c}\frac{\partial \Phi_{ik}}{\partial t} = \left(\frac{\partial}{\partial x}B_1 + \frac{\partial}{\partial y}B_2 + \frac{\partial}{\partial z}B_3 + \kappa\mu_o c\, B_4\right)\Phi_{ik} \qquad (i\,,k = 1 \cdots 4)$$

Mais, à la place des deux groupes de 16 équations (6) et (7) ainsi obtenus, nous pouvons aussi bien employer les deux groupes de 16 équations suivantes que nous considérerons désormais comme les équations de base de la théorie du photon :

$$(\mathrm{A}) \qquad \frac{1}{c}\frac{\partial \Phi_{ik}}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x}\frac{A_1 + B_1}{2} + \frac{\partial}{\partial y}\frac{A_2 + B_2}{2} + \frac{\partial}{\partial z}\frac{A_3 + B_3}{2} + \kappa\mu_o c\,\frac{A_4 + B_4}{2}\right]\Phi_{ik}$$

$$(\mathrm{B}) \qquad 0 = \left[\frac{\partial}{\partial x}\frac{A_1 - B_1}{2} + \frac{\partial}{\partial y}\frac{A_2 - B_2}{2} + \frac{\partial}{\partial z}\frac{A_3 - B_3}{2} + \kappa\mu_o c\,\frac{A_4 - B_4}{2}\right]\Phi_{ik}$$

Les 16 équations (A) contenant chacune une dérivée $\frac{\partial \Phi_{ik}}{\partial t}$ déterminent entièrement l'évolution de la fonction d'onde Φ au cours du temps à partir d'une forme initiale donnée. Ce sont donc des équations d'évolution tout à fait comparables aux équations en $\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ et en $\frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$ de la théorie électromagnétique. Au contraire les 16 équations (B) ne contiennent pas de dérivées par rapport au temps et expriment 16 conditions auxquelles doivent satisfaire les Φ_{ik} à tout instant : elles sont entièrement comparables aux équations en div $\vec{E}$ et div $\vec{H}$ de la théorie électromagnétique. On peut démontrer, tout comme en théorie électromagnétique, que les deux systèmes (A) et (B) sont compatibles en ce sens que, si l'on se donne à un instant initial quelconque la forme initiale de la fonction Φ satisfaisant à cet instant initial aux équations de condition (B), ces équations (B) resteront satisfaites pour toute valeur ultérieure du temps en vertu même des équations (A) qui règlent l'évolution du Φ.

On peut démontrer également que chaque Φ_{ik} satisfait à l'équation du second ordre :

$$(\mathrm{C}) \qquad \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \Phi_{ik}}{\partial t} - \Delta\Phi_{ik} = \kappa^2\mu_o^2 c^2 \Phi_{ik} \; (i\,,k = 1 \cdots 4)$$

qui se réduit à $\Box\,\Phi_{ik} = 0$ quand les termes en μ_o^2 sont nuls ou négligeables.

Nous avons encore ici un passage des équations (A) et (B) du premier ordre aux équations (C) du second ordre tout à fait comparable à celui qu'on effectue en théorie de Maxwell quand on démontre que les composantes du champ électromagnétique, solutions des équations du premier ordre de Maxwell dans le vide, satisfont chacune à une équation de propagation du type $\Box f = 0$.

Indiquons maintenant rapidement comment les équations (A) et (B) permettent de définir, d'une façon qui paraît satisfaisante, le champ électromagnétique Maxwellien du photon. Nous avons déjà été amené à penser qu'il fallait définir les grandeurs électromagnétiques liées au photon par des combinaisons linéaires des composantes de la fonction Φ. Nous avons besoin de 10 telles combinaisons linéaires indépendantes, que nous nommerons E_x, E_y, E_z, H_x, H_y, H_z, A_x, A_y, A_z, V pour représenter les trois composantes du champ électrique, les trois composantes du champ magnétique, les trois composantes du potentiel vecteur et le potentiel scalaire. Mais, comme il y a 16 Φ_{ik} indépendants, nous pourrons encore trouver 6 autres combinaisons linéaires indépendantes de ces Φ_{ik}. Nous aurons ainsi 16 combinaisons linéaires des Φ_{ik} dont 10 seulement auront un sens dans la théorie électromagnétique de la lumière de Maxwell (nous les nommerons les grandeurs Maxwelliennes) et dont 6 n'auront pas de sens connu dans cette théorie (nous les appellerons les grandeurs non Maxwelliennes). Ces 16 grandeurs obéissent à 32 équations qu'on obtient à partir des 32 équations (A) et (B) par des combinaisons linéaires et dont l'une d'ailleurs se réduit à une identité. Sur les 31 équations non identiques ainsi obtenues, 15 contiennent seulement les grandeurs Maxwelliennes et ont la forme suivante :

$$(8)\quad \begin{cases} -\dfrac{1}{c}\dfrac{\partial \vec{H}}{\partial t} = \text{rot}\,\vec{E} \quad ; \quad \text{div}\,\vec{H} = 0 \quad ; \quad \vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}}\,V - \dfrac{1}{c}\dfrac{\partial \vec{A}}{\partial t} \\ \dfrac{1}{c}\dfrac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \text{rot}\,\vec{H} - \kappa^2\mu_0^2c^2\vec{A} \quad ; \quad \text{div}\,\vec{E} = \kappa^2\mu_0^2c^2\,V \quad ; \quad \vec{H} = \text{rot}\,\vec{A} \end{cases}$$

$$\frac{1}{c}\frac{\partial V}{\partial t} + \text{div}\,\vec{A} = 0$$

Si on suppose les termes en μ_0^2 nuls ou négligeables, on retrouve exactement les équations de Maxwell. Les 16 autres équations non identiques contiennent uniquement les grandeurs non Maxwelliennes et n'ont aucun sens électromagnétique connu. Nous verrons tout à l'heure que ces grandeurs non Maxwelliennes sont liées aux ondes longitudinales de potentiel qui, en théorie de Maxwell, existent en principe, mais sont sans intérêt parce qu'elles ne correspondent à aucun champ observable. Dans notre théorie du photon, les équations de Maxwell pour la lumière dans le vide se présentent donc comme contenues dans un ensemble plus vaste d'équations, et ce fait pourrait avoir de l'importance pour les élargissements futurs possibles de la théorie électromagnétique.

Il est très intéressant, pour préciser les idées, de faire le calcul complet des grandeurs Maxwelliennes et non Maxwelliennes dans le cas simple d'un photon en mouvement rectiligne et uniforme, où l'on doit retrouver l'onde monochromatique plane. On trouve d'abord que l'onde Φ dépend en ce cas de 4 constantes complexes C_1, C_2, C_o et C'_o. Si la constante C_1 est seule différente de zéro, on a un état de mouvement correspondant à un spin $+\frac{h}{2\pi}$ dans la direction de propagation ; si la constante C_2 est seule différente de zéro, on a un mouvement avec spin $-\frac{h}{2\pi}$ dans la direction de propagation ; enfin si les constantes C_o et C'_o sont seules différentes de zéro, on a un mouvement avec spin égal à 0. Dans le cas général on a une superposition de ces trois « cas purs » de spin. Nous retrouvons bien ainsi les trois valeurs 0, $\pm\frac{h}{2\pi}$ prévues pour le spin d'après la constitution admise pour le photon [1]. Une fois calculées les valeurs des 16 Φ_{ik} en fonction des constantes C_1, C_2, C_o et C'_o, il est aisé de calculer les valeurs des 10 combinaisons linéaires qui doivent représenter les grandeurs Maxwelliennes. On constate alors, en supposant toujours nuls ou négligeables les termes en μ_o^2, que le champ électrique et le champ magnétique liés au photon sont tous deux perpendiculaires à la direction de propagation et qu'ils sont égaux et perpendiculaires entre eux : ce sont bien là les propriétés fondamentales du champ électromagnétique d'une onde lumineuse plane et monochromatique. De plus, les deux champs ne dépendent que des constantes C_1 et C_2 : si $C_1 = 0$, on a une onde circulaire dextrogyre, si $C_2 = 0$ une onde circulaire lévogyre, de telle sorte que les ondes électromagnétiques à polarisation circulaire correspondent respectivement aux deux cas purs de spin où le spin a les valeurs $+\frac{h}{2\pi}$ et $-\frac{h}{2\pi}$. Ceci met très clairement en évidence la relation qui existe entre le spin et la polarisation et constitue un résultat très satisfaisant de la théorie. Si les constantes C_1 et C_2 sont toutes deux différentes de zéro, il y a superposition des deux cas purs de spin et l'onde électromagnétique est la superposition de deux ondes circulaires de sens inverses, c'est-à-dire est dans

---

(1) Le fait qu'il y ait deux constantes C_o et C'_o correspondant au cas du spin 0 tient à ce qu'il y a deux manières de réaliser ce spin nul,

$$+\frac{h}{4\pi}-\frac{h}{4\pi} \quad \text{et} \quad -\frac{h}{4\pi}+\frac{h}{4\pi}.$$

le cas général une vibration elliptique dont la forme est déterminée par le rapport des modules et la différence des arguments des constantes complexes C_1 et C_2 ; dans le cas particulier où le rapport des modules est égal à 1, on a le cas de la polarisation rectiligne, l'azimut de la vibration rectiligne étant déterminé par la différence des arguments de C_1 et de C_2. Tous ces résultats sont satisfaisants, et cette théorie du photon permet de représenter une onde lumineuse quelconque.

Restant toujours dans le cas du mouvement rectiligne et uniforme, examinons maintenant les valeurs que notre théorie fournit pour les potentiels $\vec{A}$ et V. On trouve, en dehors des potentiels qui correspondent aux champs électromagnétiques transversaux étudiés à l'instant et qui dépendent des constantes C_1 et C_2, d'autres potentiels correspondant à des ondes longitudinales (dans lesquelles le vecteur $\vec{A}$ est dirigé dans le sens de la propagation) qui dépendent des constantes C_0 et C_0'. En supposant toujours nuls ou négligeables les termes en μ_0^2, on voit qu'à ces potentiels correspondent des champs nuls. Ce sont des potentiels longitudinaux qu'on trouve déjà en théorie de Maxwell comme solutions analytiquement possibles, mais qui n'y jouent aucun rôle effectif puisque les champs correspondants seuls observables sont nuls (1). Les états de spin nul sont donc liés aux potentiels longitudinaux inobservables de la théorie de Maxwell, potentiels longitudinaux qui jouent un rôle important dans certains problèmes de la théorie quantique des champs (par exemple dans l'interprétation du champ Coulombien d'après M. Dirac). Enfin, si l'on calcule les grandeurs non Maxwelliennes attachées à un mouvement rectiligne et uniforme du photon, on constate que ces grandeurs sont indépendantes des constantes C_1 et C_2 et s'expriment à l'aide de C_0 et de C_0'. Elles n'interviennent donc pas dans la spécification du champ lumineux observable et sont reliées aux ondes longitudinales inobservables de potentiel. On comprend alors que la théorie de Maxwell puisse ignorer complètement ces grandeurs.

En résumé notre théorie du photon fondée sur les équations (A) et (B) paraît bien rendre compte des propriétés de la lumière dans le vide et conduit ainsi à des résultats très encourageants. Mais nous devons main-

(1) La direction de propagation étant prise comme axe des Z, les formes

$$A_x = A_y = 0 \,;\; A_z = Ce^{2\pi i\nu\left(t - \frac{z}{c}\right)} \,;\; V = De^{2\pi i\nu\left(t - \frac{z}{c}\right)}$$

satisfont à $\square \vec{A} = 0$ et $\square V = 0$. La condition de Lorentz donne $D = C$ et l'on trouve aisément

$$\vec{H} = \text{rot}\, \vec{A} = 0 \qquad \text{et} \qquad \vec{E} = -\,\text{grad}\, V - \frac{1}{c}\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = 0.$$

tenant nous demander quel est le sens véritable de ces équations (A) et (B) et examiner de plus près le raisonnement un peu gauche qui nous y a conduit. Cette critique va en effet nous amener à un point de vue nouveau qui paraît très intéressant.

Le problème qui se pose est de comprendre la signification véritable du raisonnement qui nous a conduit aux équations fondamentales (A) et (B). Ce raisonnement est évidemment sujet à critique, car nous avons commencé par écrire les équations [(1) et (2)] qui décrivent les mouvements des deux demi-photons supposés indépendants, puis nous y avons adjoint l'équation [(3)] pour exprimer que ces demi-photons sont complètement liés. Nous avons ainsi obtenu les systèmes (A) et (B) en utilisant des équations fondées sur des idées en apparence contradictoires, et je crois que le caractère hybride de ce raisonnement a été l'une des causes pour laquelle ma pensée n'a pas toujours été bien interprétée. En examinant de près ce raisonnement, on peut faire une remarque qui va nous conduire au point de vue que je crois aujourd'hui exact. Voici cette remarque : dans les équations (1) et (2), nous avons écrit x, y, z alors qu'en principe nous aurions dû écrire x_1 y_1 z_1 dans la première et x_2 y_2 z_2 dans la seconde, puisque nous considérons deux corpuscules ayant chacun ses coordonnées, et c'est précisement l'emploi d'un jeu unique de coordonnées x y z qui nous a permis d'arriver à des équations (A) et (B) qui représentent le mouvement d'une particule complexe, le photon, de coordonnées x y z. Or, quand on considère une particule complexe comme une unité physique et qu'on lui attribue des coordonnées x y z, ces coordonnées sont nécessairement celles d'un certain point central de la particule, par exemple de son centre de gravité. Nous sommes amenés à penser que les coordonnées x y z figurant dans les équations (A) et (B) sont les coordonnées du centre de gravité du photon. C'est là une idée sur laquelle un de mes jeunes collaborateurs, M. Jean-Louis Destouches, a le premier attiré l'attention, bien qu'elle soit implicitement contenue dans un intéressant mémoire antérieur de M. Gr. Wentzel. La fonction Φ à 16 composantes obéissant aux équations (A) et (B) serait donc la fonction d'onde représentant le mouvement du centre de gravité du photon, compte tenu des propriétés globales de spin de cette particule complexe. Il y a donc lieu, pour préciser cette vue, d'étudier la représentation du mouvement du centre de gravité en Mécanique ondulatoire relativiste pour un système de corpuscules doués de spin. Cette étude est actuellement difficile à faire en toute généralité, car la Mécanique ondulatoire relativiste des systèmes de corpuscules doués de spin n'est pas connue aujourd'hui et comme dans toute Mécanique relativiste la définition même du centre de gravité y soulève certaines difficultés. Heureusement le cas du photon est un cas particulièrement simple, car c'est celui d'un système formé de deux corpuscules seulement, dont de plus les masses sont égales (ce qui facilite la définition du centre de gravité). Une étude que j'ai entreprise depuis quelques mois m'a conduit à considérer comme très probable que les équations (A) et (B) sont bien les équations d'onde correspondant au mouvement du centre de gravité du photon et m'a fait comprendre comment le raisonnement fondé sur les équations (1), (2) et (3) m'avait conduit, bien qu'incorrect, au bon résultat. Je me suis aussi aperçu que l'interprétation de l'onde Φ comme étant l'onde du centre de gravité explique le fait suivant depuis longtemps signalé (en particulier par M. Pauli) : en théorie du photon, il ne peut pas exister d'expression générale toujours positive donnant la probabilité de présence du photon en chaque point, circonstance qui semble créer une différence essentielle et assez surprenante entre la théorie des photons et celle des autres particules matérielles. Examinons rapidement ces questions en commençant par la justification des équations (A) et (B).

Considérons d'abord une particule complexe formée de deux corpuscules de même masse m et dépourvue de spin et supposons que nous puissions négliger les corrections de relativité. Nous pourrons donc appliquer la Mécanique ondulatoire sous la forme des équations non relativistes de M. Schrödinger. La fonction d'onde $\Psi(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, t)$ de la particule sera une fonction des coordonnées des deux corpuscules constituants et du temps : l'équation de Schrödinger exprimera comment cette onde évolue dans l'espace de configuration à 6 dimensions formé à l'aide des variables $x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2$. Or, nous pouvons faire un changement de variables en introduisant les coordonnées du centre de gravité de la particule et les coordonnées relatives de ses deux constituants par rapport à ce centre de gravité, grâce aux formules :

$$(9) \qquad x = \frac{x_1 + x_2}{2} \qquad y = \frac{y_1 + y_2}{2} \qquad z = \frac{z_1 + z_2}{2}$$

$$(9') \quad \xi_1 = x_1 - x; \quad \eta_1 = y_2 - y; \quad \xi_1 = z_1 - z; \quad \xi_2 = -\xi_1 = x_2 - x;$$
$$\eta_2 = -\eta_1 = y_2 - y; \quad \xi_2 = -\xi_1 = z_2 - z$$

On démontre aisément que si la particule a un état interne bien déterminé (par exemple son état fondamental d'énergie minimum) et n'est soumise à aucun champ extérieur, l'état du mouvement du centre de gravité est représenté par une fonction d'onde $\Phi(x, y, z, t)$ telle que :

$$(10) \qquad \frac{1}{2M}\frac{\partial \Phi}{\partial t} = \frac{2\pi i}{h}\Delta\Phi \qquad (M = 2m)$$

Tout se passe donc comme si le centre de gravité était un point matériel, un corpuscule, de masse égale à la masse totale de la particule et l'on démontre que l'expression $|\Phi(x, y, z, t)|^2\, dx\, dy\, dz$ représente la probabilité de présence du centre de gravité à l'instant t dans l'élément de volume dx dy dz, également comme si ce centre de gravité était un corpuscule véritable. Donc, en Mécanique ondulatoire non relativiste, on peut définir d'une façon parfaitement correcte l'onde Φ représentant le mouvement du centre de gravité d'une particule formée par deux corpuscules de même masse : il suffit de partir de la propagation de l'onde associée au système des deux corpuscules dans l'espace de configuration $x_1 .... z_2$.

Mais il existe une méthode incorrecte, mais rapide, pour retrouver l'équation (10). Elle consiste à écrire les deux équations d'onde des deux constituants de la particule considérés comme indépendants sans distinguer x_1, y_1, z_1 de x_2 y_2 z_2, soit à écrire :

$$(11) \qquad \frac{2\pi i}{h} \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{1}{2m} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \Psi \quad (1^{\text{er}} \text{ corpuscule})$$

$$(12) \qquad \frac{2\pi i}{h} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{1}{2m} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \varphi \quad (2^{\text{e}} \text{ corpuscule})$$

Puis, pour exprimer tant bien que mal le fait que les corpuscules sont liés en une seule particule, on admettra les relations :

$$(13) \qquad \varphi \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \Psi \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} (\varphi \Psi) ; \quad \Psi \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = \frac{\partial \Psi}{\partial x} \frac{\partial \varphi}{\partial x} = \varphi \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} = \frac{1}{4} \frac{\partial (\Psi \varphi)}{\partial x^2}$$

En posant alors $\Phi = \Psi \varphi$, multipliant (11) par φ et (12) par Ψ et ajoutant on retrouve aisément l'équation (10).

En raison de l'analogie de (1) et (11), (2) et (12), (3) et (13) respectivement, on voit que le procédé incorrect, mais couronné de succès, que nous venons d'employer est tout à fait semblable à celui qui a fourni les équations (A) et (B). On devine donc que, pour démontrer correctement les équations (A) et (B), il faudrait partir d'une fonction d'onde qui représenterait l'état du système des deux demi-photons dans l'espace de configuration à 6 dimensions qui leur correspond ; puis, après avoir introduit les coordonnées du centre de gravité du photon par les équations (9) (ou des équations analogues), il faudrait retrouver les équations (A) et (B) comme définissant la fonction d'onde Φ (x, y, z, t) de ce centre de gravité. Ce programme est en réalité assez difficile à exécuter correctement car nous avons là un problème de Mécanique ondulatoire relativiste d'un système de corpuscules à spin. Néanmoins les calculs que j'ai faits dans ce sens me permettent de penser qu'en représentant le système « photon » par une fonction d'onde Ψ $(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, t)$ à 16 composantes dans l'espace de configuration à 6 dimensions formé par les coordonnées des deux demi-photons, puis en introduisant les coordonnées du centre de gravité du photon par les relations (9), on est bien conduit à définir pour ce centre de gravité une fonction d'onde Φ (x, y, z, t) à 16 composantes obéissant aux équations fondamentales (A) et (B). La démonstration des systèmes d'équations (A) et (B) à l'aide des équations (1), (2) et (3) apparaît alors comme un procédé en principe incorrect mais donnant le bon résultat, tout à fait analogue (en plus compliqué à cause des 16 composantes des fonctions d'onde) au procédé qui permet d'obtenir (10) à partir de (11), (12) et (13) dans le problème non relativiste.

Sans insister sur les difficultés que présente encore le développement rigoureux des idées précédentes, je veux encore indiquer comment elles paraissent fournir une explication d'une caractéristique étrange de toute théorie du photon : la non-existence d'une expression définie positive pour la densité. Dans toutes les branches de la Mécanique ondulatoire des corpuscules matériels, il existe en effet toujours une expression construite à l'aide de la fonction d'onde qui est partout positive ou nulle et donne en chaque point de l'espace la probabilité de présence du corpuscule en ce point (ou la densité si l'on a affaire à un nuage de corpuscules identiques et sans interaction). Cette expression est de la forme $|\Psi|^2$, c'est-à-dire qu'elle est égale au carré du module de la fonction d'onde Ψ quand celle-ci n'a qu'une composante comme en Mécanique ondulatoire non relativiste et à la somme des carrés des modules des composantes du Ψ s'il a plusieurs composantes comme en Mécanique de Dirac (où il en a 4). Or, pour le photon, on peut montrer en s'appuyant sur l'expression électromagnétique de l'énergie que, si le mouvement peut être représenté par une certaine fonction d'onde monochromatique Φ, la grandeur $|\Phi|^2$ devra représenter la densité moyenne de l'énergie lumineuse et non pas la densité en photon. Si l'onde Φ est une onde plane monochromatique de fréquence ν, la probabilité de présence du photon en un point (ou la densité d'un nuage de photons) sera donc donnée par $\frac{|\Phi|^2}{h\nu}$ puisqu'un photon associé à une telle onde a l'énergie $h\nu$ d'après la relation d'Einstein ; mais si l'onde Φ est formée par une superposition d'ondes monochromatiques et a par suite un développement de Fourier de la forme $\Phi = \sum_\nu \Phi_\nu$, la probabilité de présence du photon en un point sera $\sum_\nu \frac{|\Phi_\nu|^2}{h\nu}$ et elle ne sera pas exprimable en fonction du Φ, mais seulement en fonction des termes de sa décomposition de Fourier. Cette impossibilité de trouver pour le photon une expression de la probabilité de présence en fonction du Φ, cette nécessité d'opérer la décomposition de Fourier de la fonction d'onde, créent une différence, en apparence essentielle, entre la Mécanique ondulatoire du photon et celle des particules matérielles. D'où vient cette différence qui semble rompre la symétrie entre la lumière et la matière ? C'est ce que les conceptions vont nous permettre, me semble-t-il, d'entrevoir.

En effet, si l'état du photon est représenté par une fonction d'onde $\Psi(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, t)$ dans l'espace de configuration à 6 dimensions des demi-photons, d'après les règles générales de la Mécanique ondulatoire la probabilité de présence du point figuratif du système dans un élément de volume $d\tau$ de l'espace de configuration est donnée par l'expression $|\Psi|^2 d\tau$. Pour passer de là à la probabilité de présence du centre de gravité du photon dans un élément de volume dx dy dz de l'espace, il faut introduire les variables (9 et (9'), puis *intégrer* sur les variables (9') qui correspondent à la structure interne du photon et ne nous intéressent pas quand nous fixons notre attention seulement sur le centre de gravité. En faisant cette opération dans le cas où l'onde Φ est plane et monochromatique, j'ai trouvé pour la probabilité de présence du photon l'expression $|\Phi|^2 \sqrt{1-\beta^2}$ où βc est la vitesse du mouvement rectiligne et uniforme correspondant à Φ ; on peut d'ailleurs aussi écrire cette expression $|\Phi|^2 \frac{\mu_0 c^2}{h\nu}$ en raison de la relation $h\nu = \frac{\mu_0 c^2}{\sqrt{1-\beta^2}}$. L'apparition du facteur $\sqrt{1-\beta^2} = \frac{\mu_0 c^2}{h\nu}$ est due essentiellement au fait que l'intégration sur les variables $\xi_1 \ldots \zeta_2$ décrivant la structure interne du photon n'est pas une opération invariante et fait intervenir la contraction de Lorentz exprimée par un facteur de la forme $\sqrt{1-\beta^2}$ quand on passe d'un système de référence à un autre. Mais, quand on considère une onde Φ non monochromatique, on s'aperçoit qu'il y a une contraction de Lorentz différente pour chaque composante de Fourier du Φ, et il en résulte qu'il n'y a pas en ce cas d'expression construite à l'aide du Φ global qui donne correctement en chaque point la probabilité de présence du photon (ou la densité en photon). La circonstance particulière qu'on rencontre en théorie du photon s'expliquerait donc par le fait que le photon est une particule complexe subissant dans sa structure interne une contraction de Lorentz variable avec le mouvement dont elle est animée.

Pour bien comprendre ce résultat, plaçons nous à un point de vue général. Nous considérons une particule complexe formée de corpuscules élémentaires et non soumise à un champ extérieur. La Mécanique classique nous apprend que le centre de gravité de cette particule se déplace comme un point matériel réel qui serait doué de la masse totale de la particule. Ce résultat se retrouve en Mécanique ondulatoire non relativiste, c'est-à-dire pour les particules animées d'une vitesse faible par rapport à c : de même que le mouvement d'un corpuscule unique peut se décrire à l'aide d'une fonction d'onde Ψ, la grandeur $|\Psi|^2$ mesurant en chaque point la probabilité de présence du corpuscule, de même le mouvement du centre de gravité d'une particule complexe peut se représenter par une onde Φ, la grandeur $|\Phi|^2$ donnant la probabilité de présence du centre de gravité en chaque point, et cette onde Φ est la même que celle d'un corpuscule qui serait doué de la masse totale de la particule. Donc en Mécanique ondulatoire non relativiste comme en Mécanique classique, nous pouvons assimiler le centre de gravité de la particule complexe à un corpuscule réel ayant la masse totale de cette particule. C'est ce résultat qui ne me paraît pas subsister en Mécanique ondulatoire relativiste. Pour une particule animée d'une vitesse voisine de c, il est bien encore possible, au moins dans des cas simples comme celui du photon dans ma conception, de définir une onde Φ liée au centre de gravité de la particule et décrivant son mouvement, mais, en raison des contractions de Lorentz, il n'est plus en général possible d'exprimer la probabilité de présence de ce centre de gravité par la grandeur $|\Phi|^2$, de sorte que le mouvement de ce point fictif n'est plus entièrement assimilable à celui d'un corpuscule réel : l'assimilation n'est possible qu'à l'approximation Newtonienne, quand les contractions de Lorentz s'évanouissent. Si ces idées sont exactes, ce serait seulement parce que les particules matérielles ont dans les conditions usuelles des vitesses faibles par rapport à c qu'on pourrait entièrement assimiler le mouvement de leur centre de gravité à celui d'un corpuscule réel : on voit donc que toute différence de principe se trouverait ainsi disparaître entre la Mécanique ondulatoire des particules matérielles et celle des photons.

Terminons cet exposé de la théorie du photon par quelques remarques. Dans les équations (A) et (B) figure une constante μ_0 qui doit être interprétée comme étant la masse propre du photon. Si μ_0 n'est pas nulle, à chaque fréquence ν du photon correspondra un vitesse différente du photon dans le vide par la relation $h\nu = \dfrac{\mu_0 c^2}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}$; les photons iront d'autant plus vite que leur fréquence est plus élevée. Or, les observations astronomiques ont établi depuis longtemps qu'il n'existe pas de dispersion appréciable dans le vide. Il est facile de voir que cela impose à μ_0 une valeur énormément plus petite que celle, déjà si petite, de la masse propre de l'électron (10^{-28} gramme environ) : μ_0 doit être certainement inférieur à 10^{-44} ou 10^{-45} gramme. Avec une aussi petite valeur de μ_0, toutes les radiations dont le quantum $h\nu$ sera décelable correspondront à des vitesses indiscernables de c. Ceci n'entraîne pas de difficulté essentielle car nous pouvons, en l'absence de toute donnée sur sa valeur, supposer μ_0 aussi petite que nous voulons. Nous pouvons même passer à la limite et supposer μ_0 rigoureusement nulle, la vitesse du photon devenant alors rigoureusement égale à c, quelle que soit sa fréquence. Si l'on admet que μ_0 est nulle, il est cependant utile, pour bien faire raccord avec la Mécanique ondulatoire, de raisonner d'abord comme si μ_0 était différente de zéro, puis de faire ensuite dans les formules tendre μ_0 vers zéro. Le passage à la limite, bien qu'un peu délicat, ne paraît pas soulever d'objection essentielle. Si μ_0 n'était pas nulle, il y aurait là une constante physique dont la mesure présenterait un grand intérêt, si elle était possible.

Le raisonnement incorrect qui conduit aux équations (A) et (B) à partir des équations (1), (2) et (3) semble indiquer que la masse propre du photon est le double de la masse propre du demi-photon; mais par contre la méthode plus correcte que nous avons indiquée pour obtenir (A) et (B) semble montrer qu'en réalité la masse propre μ_0 du photon peut être inférieure à la somme des masses propres des deux demi-photons à cause du lien énergétique qui doit unir ces deux constituants à l'intérieur de la particule « photon ». Donc, même si nous admettons $\mu_0 = 0$, nous ne pouvons pas en conclure que les demi-photons soient de masses propres nulles. Il paraît même possible d'admettre que les deux demi-photons complémentaires soient l'un un électron négatif et l'autre un électron positif, ces deux électrons se neutralisant presque complètement avec destruction presque complète de leurs masses. Néanmoins on peut sans doute considérer comme plus probable que les deux demi-photons considérés isolément aient chacun une masse très faible par rapport à celle de l'électron. Les demi-photons pourraient alors être identifiables avec ces « neutrinos » dont on invoque l'existence pour sauver la conservation de l'énergie dans l'émission du spectre continu β des corps radioactifs. Mais cette hypothèse n'est nullement essentielle pour ma théorie du photon. Celle-ci repose essentiellement sur l'idée de définir le champ électromagnétique de la lumière grâce aux propriétés d'une particule complexe formée par deux corpuscules complémentaires de Dirac, et de relier ainsi la polarisation au spin : elle est donc en principe tout à fait indépendante de l'existence ou de la non existence des neutrinos dans les émissions radioactives.

Le moment est venu pour moi de parler un peu en terminant de la théorie neutrinienne de la lumière due à M. Jordan. A mon grand regret, je vais en parler surtout pour la critiquer. Cela ne veut pas dire, bien entendu, que j'en méconnaisse l'originalité et l'intérêt, mais elle me paraît se heurter à de graves difficultés en ce qui concerne la représentation des propriétés réelles de la lumière.

Partant d'une conception au fond très différente de la mienne, M. P. Jordan suppose que la lumière est formée par des neutrinos indépendants qu'il imagine comme des corpuscules de masse propre nulle obéissant aux équations de Dirac : pour lui, le photon est une apparence due à la façon dont agit sur la matière une telle assemblée de neutrinos. Sans se préoccuper tout d'abord de construire un champ électromagnétique lumineux, M. Jordan a surtout cherché à retrouver la loi de Planck. Pour cela, il a imaginé que l'action sur la matière de l'ensemble de neutrinos auquel il assimile la lumière peut se faire par deux processus entièrement distincts : l'annihilation par paires et l'effet Raman sans changement de direction. Dans le processus d'annihilation par paires, deux neutrinos d'énergies $h\nu_1$ et $h\nu_2$ pourraient s'annihiler l'un l'autre en cédant à la matière le quantum $h\nu = h\nu_1 + h\nu_2$: le quantum $h\nu$ serait donc alors la somme des énergies des neutrinos qui s'annihilent. Dans l'effet Raman sans changement de direction, un neutrino d'énergie $h\nu_1$ passerait à une énergie inférieure $h\nu_2$ en cédant à la matière le quantum $h\nu = h\nu_1 - h\nu_2$, sans que la direction de son mouvement soit modifiée: ici donc, chose essentielle, l'action lumineuse serait due à un processus mettant en jeu un seul neutrino. Combinant très ingénieusement les deux processus d'annihilation par paires et d'effet Raman, M. Jordan est parvenu à retrouver la loi de Planck comme traduisant l'action « lumineuse » sur la matière d'un ensemble de neutrinos en équilibre thermodynamique. Les neutrinos, étant des corpuscules de Dirac, obéiraient aux lois de la statistique de Fermi, mais les actions lumineuses de ces neutrinos sur la matière seraient les mêmes que s'il existait des photons suivant la statistique de Bose. Se servant des algorithmes de la théorie de la seconde quantification, M. Jordan a cherché à montrer comment on peut passer à ce point de vue de l'une des statistiques à l'autre. Cette partie de l'œuvre de M. Jordan a été récemment contestée du point de vue mathématique, et il se peut qu'une erreur se soit glissée dans les calculs de l'éminent physicien. Je ne discuterai pas ici cette question purement mathématique, car j'ai contre la théorie de M. Jordan des objections d'un tout autre ordre.

Tout d'abord, je veux écarter un argument d'ordre plutôt sentimental que l'on a donné en faveur de la conception de M. Jordan. On a dit que cette conception est très belle parce qu'elle ramène la statistique de Bose-Einstein à celle de Fermi-Dirac. Je ne suis pas personnellement très sensible à cette beauté, et je vais vous expliquer pourquoi. Nous connaissons des particules matérielles complexes, par exemple les particules α, qui obéissent à la statistique de Bose : en admettant, comme on a des raisons de le faire, que ces particules sont formées d'un nombre pair de corpuscules obéissant à la statistique de Fermi, on peut expliquer, par un raisonnement que j'ai reproduit plus haut, pourquoi elles suivent la statistique de Bose. Dans la théorie de M. Jordan, on explique d'une façon tout à fait différente la raison pour laquelle les photons suivent, ou paraissent suivre, la statistique de Bose et la loi de Planck. Si donc l'on admet ce point de vue, il y aurait deux manières *totalement distinctes* d'expliquer le passage d'une des statistiques à l'autre, suivant qu'il s'agirait de particules matérielles ou de photons. Au point de vue esthétique, je trouve au contraire beaucoup plus élégant d'admettre, comme dans ma théorie du photon, que le passage de l'une à l'autre statistique doit s'expliquer exactement de la même façon pour une particule matérielle à nombre pair de constituants et pour le photon.

Mais l'objection physique essentielle qui me paraît s'opposer à la conception neutrinienne de la lumière, c'est le fait qu'il est impossible de définir pour l'effet Raman sans changement de direction un champ électromagnétique ayant un développement de Fourier bien déterminé. Dès le début de mes recherches, je l'ai déjà dit, je m'étais aperçu de l'impossibilité d'associer un tel champ électromagnétique à un processus d'action lumineuse sur la matière qui mette en jeu un seul corpuscule de Dirac : or l'effet Raman sans changement de direction est précisément un processus de ce type. Comme cet effet Raman serait selon M. Jordan un des processus qui interviendrait essentiellement dans l'action de la lumière sur la matière, on arrive ainsi à des contradictions avec les propriétés réelles de la lumière. Nous allons le montrer en raisonnant sur un cas concret.

Considérons un nuage de neutrinos ayant tous la même énergie $h\nu_m$. Selon M. Jordan, un tel nuage de neutrinos peut exercer des effets photoélectriques sur la matière lorsqu'un neutrino subit un effet Raman sans changement de direction : le faisceau de neutrinos pourra donc produire des effets photoélectriques correspondant à tous les quanta de lumière dont les valeurs sont comprises entre 0 et $h\nu_m$. Un expérimentateur qui observe les faits sans faire de théories dira, après avoir étudié ce faisceau : « Je suis en présence d'un faisceau de lumière contenant toutes les fréquences depuis 0 jusqu'à la fréquence maximum ν_m ». Soit alors un corps matériel dont les atomes ne peuvent absorber que certains quanta de lumière, par exemple un corps ne pouvant absorber que les quanta de valeur $h\nu$. Nous supposerons, pour simplifier l'exposé, que l'on a $h\nu_m > h\nu > \frac{h\nu_m}{2}$. Alors chaque neutrino du faisceau considéré pourra, en traversant ce corps, subir une fois et seulement une fois l'effet Raman correspondant à l'absorption du quantum $h\nu$. Si donc nous faisons traverser par notre faisceau de neutrinos une épaisseur suffisamment grande d'un écran formé par le corps considéré, les neutrinos au sortir de l'écran auront pratiquement tous l'énergie résiduelle $h(\nu_m - \nu)$. Le faisceau transmis ne pourra donc plus produire que les effets photoélectriques correspondant aux quanta de lumière de valeurs comprises entre 0 et $h(\nu_m - \nu)$. L'expérimentateur qui ne fait pas de théories constatera donc le résultat de l'expérience que nous venons d'imaginer en disant : « Avant la traversée de l'écran, j'avais affaire à un faisceau de lumière qui contenait toutes les fréquences depuis 0 jusqu'à ν_m. Après la sortie de l'écran, dont les atomes ne peuvent absorber que le quantum $h\nu$, je retrouve un faisceau de lumière que ne contient plus que les fréquences comprises entre 0 et $\nu_m - \nu$. En d'autres termes, la traversée de l'écran a décapité le spectre de la lumière incidente en lui enlevant toutes les fréquences comprises entre $\nu_m - \nu$ et ν_m ». Voilà ce que dirait l'expérimentateur pour traduire ses observations. Mais, en réalité, les faisceaux de lumière ne se comportent jamais de cette façon. Quand un faisceau de lumière contenant plusieurs fréquences traverse un écran dont les atomes n'absorbent que le quantum $h\nu$, la composante de fréquence ν de cette lumière est affaiblie ou même supprimée par le passage à travers l'écran *sans que les autres composantes spectrales soient aucunement modifiées.* Ceci vient de ce que le développement de Fourier d'une onde lumineuse quelconque est toujours bien déterminé, chaque fréquence ν possédant son intensité propre : c'est précisément parce que le processus de l'effet Raman sans changement de direction défini par le changement d'état d'un seul neutrino ne peut être associé à un développement de Fourier bien déterminé que l'on ne retrouve pas ici les propriétés réelles de la lumière. Je crois pouvoir en conclure que ce processus n'existe pas et, comme cet effet Raman joue un rôle essentiel dans la théorie de M. Jordan, je suis ainsi conduit à rejeter cette théorie.

Il existe encore d'autres objections dont certaines s'appliquent même au processus d'annihilation par paires tel que M. Jordan le conçoit. Considérons par exemple l'expérience classique suivante : un faisceau de lumière de fréquence ν tombe normalement sur un écran plan percé d'un trou circulaire. L'expérience prouve qu'après l'écran la lumière est diffractée, c'est-à-dire répartie d'une manière compliquée que l'optique ondulatoire nous apprend à calculer en fonction de la fréquence ν. Dans ma théorie de la lumière, on retrouvera un calcul analogue, puisque le mouvement d'ensemble du photon est ici représenté par la propagation d'une onde Φ de fréquence ν tout à fait analogue à l'onde considérée par l'optique classique. Mais dans la conception neutrinienne, la lumière incidente serait en réalité formée par un ensemble de neutrinos indépendants dont les fréquences individuelles n'ont en général nullement la valeur ν. Il est alors très difficile de comprendre comment la diffraction des ondes individuelles des neutrinos, de fréquences en général différentes de ν, pourra donner lieu au phénomène réel de diffraction qui correspond à la diffraction d'une onde de fréquence ν.

M. Scherzer, dans un mémoire paru l'an dernier, a signalé incidemment d'autres difficultés encore. Il a montré notamment que, comme la diminution de l'intensité lumineuse en raison inverse du carré de la distance à la source reste vérifiée sur les distances astronomiques, les directions d'émission des deux neutrinos émis simultanément par un atome dans une étoile doivent coïncider avec une précision inimaginable. Or, dire que les paires de neutrinos sont émis dans la même direction, avec une telle précision, cela me paraît bien fortement suggérer l'hypothèse que ces deux corpuscules sont en réalité liés l'un à l'autre et forment une particule complexe.

Pour ces raisons et d'autres encore que je ne puis développer, il me paraît difficile d'accepter le point de vue de la théorie neutrinienne de la lumière. Jusqu'à plus ample informé, je préfère m'en tenir à la conception d'après laquelle le photon est une unité physique réelle, une véritable particule complexe, constituée par deux corpuscules complémentaires du type de Dirac.