

Sur quelques expériences d'optique et leur interprétation théorique

C. CORMIER-DELANOUE

Fondation Louis de Broglie,
23 quai de Conti, 75006 Paris, France

RESUME. La lumière est décrite dans la littérature scientifique de manières très diverses. Dans cette étude, on confronte à l'expérience les concepts de photons comme corpuscules d'existence permanente entre émission et absorption, d'ondes directement associées, ou au contraire, vides, et d'ondes intrinsèquement énergétiques. Quelques dispositifs optiques simples sont proposés permettant une discrimination entre ces différentes hypothèses.

ABSTRACT. Light is described in scientific literature in various terms. Several conceptions, such as corpuscular photons of permanent existence between emission and absorption, waves, either closely associated with these particles, or empty, or even endowed with proper energy, are confronted with experiment. Different optical systems are proposed allowing a discriminatory test of these concepts.

1. INTRODUCTION

Aucune solution au problème du dualisme onde-corpuscule de la lumière ne semble encore près de faire l'unanimité, si l'on en juge par la floraison continue de publications sur le sujet.

En termes parfois ambigus, on voit évoquer les photons comme particules “sticto sensu”, se propageant selon de réelles trajectoires, ou à l'autre extrême, comme manifestations éventuelles et localisées de l'énergie radiante au sens large, la nature de la radiation elle-même n'étant pas autrement précisée.

La variété dans les descriptions n'épargne pas les ondes, qui sont vues, soit comme entités objectives porteuses de l'énergie radiante, soit

comme vides de toute énergie et impulsion, voire même de nature purement mathématique et subjective.

Prenant à la lettre certaines hypothèses avancées par Louis de Broglie [1], on a même pu penser que les ondes “vides”, c’est-à-dire non porteuses de photons, et donc dénuées d’énergie observable, étaient susceptibles de déclencher une transition radiative dans des atomes préalablement excités [2]. Malgré diverses tentatives, cette dernière supposition ne semble pas avoir reçu de confirmation expérimentale.

Les ondes, même imaginées “vides”, peuvent toutefois se manifester par d’autres effets que la stimulation d’une hypothétique émission radiative, comme l’expérience le montre.

Plus ou moins abstraite dans sa démarche et son formalisme, la physique demeure, pour citer Louis de Broglie: “...une science portant sur certains phénomènes observables dans la nature. Elle repose donc essentiellement sur l’observation et l’expérience, et son rôle est de rendre compte de la véritable nature des phénomènes observés.” [3]

Dans cet esprit, il paraît souhaitable d’étudier sans relâche de nouvelles dispositions expérimentales permettant la confrontation sélective des hypothèses avancées avec la réalité observable. Seules, les tentatives d’explication confortées par ces expériences peuvent éventuellement conduire à une description d’ensemble cohérente, dans l’espace et le temps. C’est l’objet de la présente analyse.

Certains points spécifiques de diverses théories de la lumière seront d’abord succinctement rappelés. Partant de là, différentes dispositions expérimentales seront proposées comme épreuves discriminatoires entre ces théories.

2. QUELQUES POINTS SPECIFIQUES DE DIVERSES THEORIES DE LA LUMIERE

Théorie électromagnétique de Maxwell.

Les ondes sont étendues, et l’énergie qu’elles propagent de façon diffuse est définie en tout point par son flux, le vecteur de Poynting. Il n’y a pas d’ondes transversales anénergétiques que l’on puisse qualifier de “vides”. Il n’y a pas non plus d’actions à distance, toute perturbation électromagnétique ne pouvant se propager qu’à la vitesse limite c .

Cette description classique permet de traiter avec succès tous les cas de l'optique ondulatoire mettant en jeu des faisceaux lumineux suffisamment intenses. Elle constitue, d'une certaine manière, la limite des théories quantiques quand les rayons lumineux propagent un grand nombre de quanta.

Par ailleurs, on a pu démontrer que pour respecter la simple covariance relativiste, toute radiation classique finie se propageant dans une direction unique, devait avoir une énergie E quantifiée au sens large, c'est à dire de la forme $E = Q\nu$, Q étant une constante dont la valeur est fixée par les émetteurs et absorbeurs de l'énergie radiante [4].

Théorie Einstein-de Broglie.

C'est Albert Einstein, dans son célèbre article de 1905, qui introduisit cette conception de la lumière selon laquelle un quantum de radiation, plus tard baptisé photon, est assimilable à un corpuscule quasi-ponctuel, d'existence permanente entre son émission et son absorption, sa création et son annihilation. Ces corpuscules concentrent chacun une énergie $h\nu$, et son associés à des ondes anénergétiques de fréquence ν , ondes fantômes ou "Gespensterwellen" selon les termes d'Einstein.

Selon la théorie de la double solution, ultérieurement élaborée par Louis de Broglie, il existe deux ondes distinctes associées au photon corpusculaire. L'une, l'onde ψ , permet de calculer la probabilité $P(r, t)$ d'observer un photon en un point donné $P(r, t) = |\psi|^2$, et est donc subjective et arbitrairement normable. L'autre, l'onde v , est réelle, obéit aux équations de Maxwell, mais n'est que d'une très faible intensité. Le photon est intrinsèquement une singularité de l'onde régulière v dont les champs prennent une très grande intensité dans une petite région de l'espace. Ces deux ondes sont reliées par la relation $\psi = Cv$, C étant une constante très supérieure à 1, telle que $\int_V |\psi|^2 dv = 1$ dans le volume V occupé par l'onde. Les ondes réelles v guident donc le photon en permanence, et ce dernier a en outre une masse non-nulle, bien qu'extrêmement petite.

On peut, en principe, séparer une fraction de l'onde associée à un photon, à l'aide d'un miroir semi-transparent, par exemple. La détection ultérieure du photon corpusculaire dans un des faisceaux, transmis ou réfléchi, laisse subsister dans l'autre faisceau une onde que l'on pourrait qualifier de "vide", en ce sens qu'elle n'est associée à aucune énergie observable [5].

Electrodynamique quantique.

Cette théorie moderne est limitée dans son pouvoir descriptif par l'indétermination spécifique de la physique quantique.

Elle ne peut, en outre, décrire les processus intermédiaires entre création et annihilation d'un photon, faute des données physiques observables pour ce faire.

Le photon n'est que l'excitation élémentaire d'un mode d'oscillation particulier du système global considéré, tout comme la vibration propre d'une cavité résonante classique. Cette occupation d'un mode est définie par un vecteur d'état $|\psi\rangle$.

Les opérateurs de champ E et H se superposent linéairement, et sont des fonctions sinusoïdales de l'espace et du temps, ce que l'on peut rapprocher d'une propagation ondulatoire.

L'action de l'opérateur d'annihilation a sur l'état de Fock $|n\rangle$, par exemple, traduisant la détection d'un photon, entraîne la modification instantanée et à distance des entités mathématiques afférentes à un quantum d'énergie dans le système global considéré.

Par ailleurs, il n'existe pas dans le formalisme quantique d'opérateur de position relatif à une particule de masse nulle comme un photon [6]. Ce dernier ne peut donc en aucun cas être vu, en théorie quantique comme un corpuscule permanent suivant une trajectoire définie dans l'espace et le temps.

Ce même formalisme ne peut faire référence à des ondes vides, mais seulement à d'éventuels états vides $|0_k\rangle$ d'un mode k , ne comportant pas d'énergie directement observable.

Hypothèse de la réduction des ondes électromagnétiques.

Cette solution semi-classique et descriptive a été proposée une première fois dans l'analyse de l'énergie électromagnétique stationnaire confinée dans une cavité résonante [7].

Selon cette hypothèse, les radiations sont formées par des ondes électromagnétiques réelles et énergétiques, suivant la théorie de Maxwell, et se propageant donc dans le vide selon l'équation de d'Alembert. Les photons, comme corpuscules permanents entre émission et absorption, n'existent pas. La détection d'un photon n'est que la réduction localisée d'une quantité $h\nu$ de l'énergie ondulatoire diffuse, et ce, de façon instantanée et à distance.

La nécessaire conservation, à tout instant, d'une divergence nulle, tant pour les courants de déplacement que pour les champs électromagnétiques, est à la base de ce processus instantané de réduction.

La constante de Planck h , qui quantifie l'énergie émise ou réduite, provient des entités qui émettent ou absorbent la radiation, et n'est donc pas intrinsèque à cette dernière.

Il n'existe pas, selon cette hypothèse, d'ondes que l'on puisse appeler "vides".

3. EXPERIENCE A1

Un faisceau lumineux monochromatique, de faible intensité, et bien parallèle, issu d'un laser stable, pénètre en I dans le dispositif représenté sur la Figure 1.

Le faisceau incident est d'abord préparé dans un état de polarisation circulaire par un polariseur plan P_1 suivi d'une lame quart d'onde Q_1 dont l'axe neutre forme un angle de 45° avec l'axe du polariseur.

Le faisceau ainsi préparé passe ensuite dans un prisme polariseur BS_1 , où il est classiquement divisé en un rayon ordinaire o et un rayon extraordinaire e .

Ces deux rayons sont recombinaisonnés dans un second prisme polariseur BS_2 identique au premier, après des parcours de longueurs sensiblement égales, BS_1 , M_1 , M_2 , BS_2 , pour le rayon ordinaire, BS_1 , M_3 , M_4 , M_5 , M_6 , BS_2 , pour le rayon extraordinaire. De plus, un compensateur de Bravais C est incorporé entre M_1 et M_2 pour ajuster finement la différence des distances optiques parcourues par les deux rayons o et e , avant leur recombinaison.

Le faisceau recombinaisonné, issu de BS_2 sort du dispositif en O après avoir traversé un analyseur de polarisation circulaire constitué par une lame quart d'onde Q_2 suivie d'un polariseur plan P_2 dont l'axe fait un angle de 45° avec l'axe neutre de Q_2 .

Les polariseurs plans orientables P_1 et P_2 sont tels, que seul le rayon extraordinaire en émerge, le rayon ordinaire y étant éliminé par absorption.

Dans ce premier dispositif, comme dans les suivants, les prismes polariseurs représentés sont cubiques, et les réflecteurs M sont des prismes à réflexion totale. Bien entendu, les prismes BS peuvent être des prismes de Glan-Foucault, par exemple, et les réflecteurs M des miroirs plans.

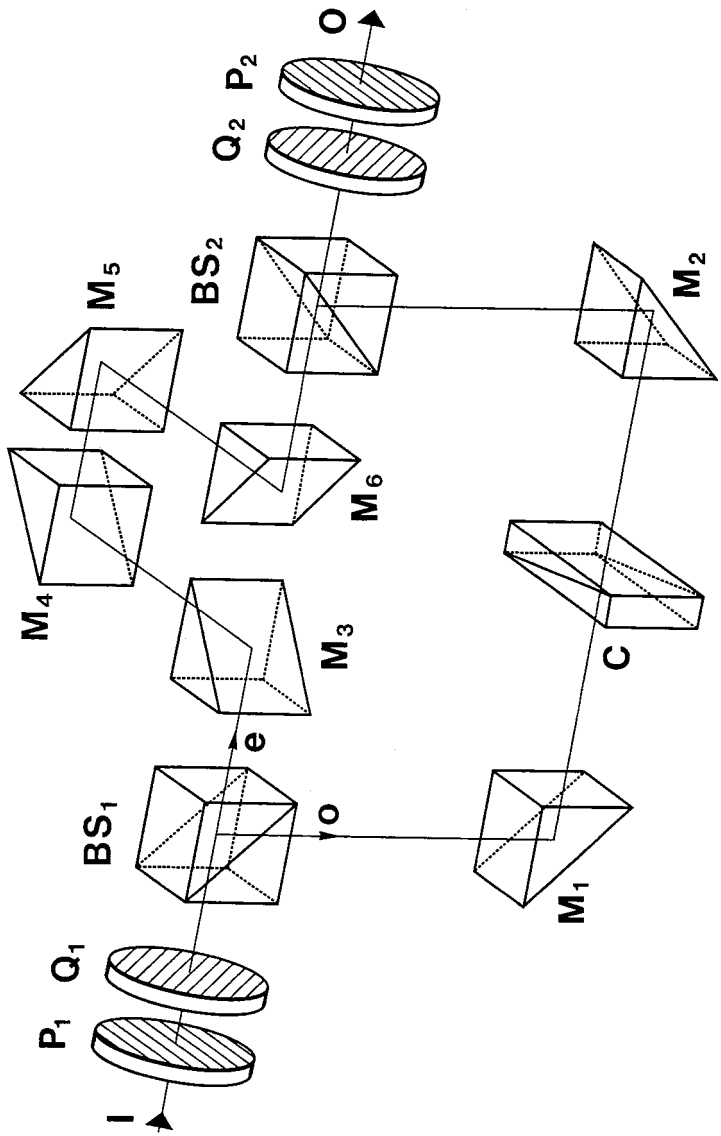


Figure 1.

On suppose par ailleurs, qu'idéalement, l'absorption dans les éléments optiques de l'ensemble, b tout comme les réflexions parasites, sont négligeables.

A cette dernière condition, le fait que la lumière incidente sur BS_1 est polarisée circulairement entraîne que les rayons o et e ont, en théorie classique, même amplitude, ou en d'autres termes, même intensité moyenne. Classiquement, l'intensité de chaque rayon décomposé est en outre égale à la moitié de l'intensité globale de l'onde primitive polarisée circulairement.

Cette expérience rappelle par bien des points celle de Fresnel et Arago [8]. On sait que ces derniers avaient employé un dispositif de Billet [9] pour observer d'éventuelles interférences entre deux faisceaux polarisés dans des plans orthogonaux à l'aide de lames de tourmaline.

Le dispositif décrit ici est plus élaboré, en ce qu'il permet de faire varier la phase relative $\Delta\varphi$ des deux faisceaux qui se recombinent dans le prisme BS_2 , soit par ajustement géométrique de la longueur de l'un des chemins optiques, soit, plus finement, à l'aide du compensateur C . Les résultats expérimentaux de Fresnel et Arago sont immédiatement applicables au dispositif décrit ici.

Il faut d'abord bien insister sur le fait que les rayons o et e ressortant de BS_2 vers O sont polarisés dans des plans orthogonaux et qu'ils ne peuvent donc pas interférer entre eux par recombinaison, mais seulement se superposer l'un à l'autre.

Si les trajets optiques suivis par les deux rayons o et e entre BS_1 et BS_2 sont rigoureusement de même longueur, compensation étant faite des différents parcours dans la matière des prismes, le faisceau recombiné sortant de BS_2 sera polarisé circulairement avec la même hélicité que le faisceau incident sur BS_1 . Il traversera donc intégralement l'analyseur de polarisation circulaire Q_2 - P_2 si celui-ci est réglé pour la même hélicité que le polariseur P_1 - Q_1 .

Les trajets optiques suivis par les deux rayons o et e étant égaux, la longueur de cohérence de la lumière incidente en I sera sans importance, la phase relative $\Delta\varphi$ des deux faisceaux demeurant constante même si la phase de I fluctue.

Par l'action du compensateur ajustable C on peut faire varier la valeur de la phase relative des rayons o et e avant leur recombinaison dans BS_2 . Selon cette phase relative $\Delta\varphi$ on obtiendra à la sortie de BS_2 un faisceau de polarisation elliptique, de polarisation circulaire pour

$\Delta\varphi = (n + 1/2)\pi$, avec $|n| = 1, 2, \dots$, et même de polarisation plane si $\Delta\varphi = n\pi$.

C'est ce dernier cas qui va être examiné à présent.

4. EXPERIENCE A2

Reprenant le dispositif décrit pour l'expérience A1, on règle le compensateur C de façon à introduire une différence de $\pi/2$ entre les phases respectives des rayons o et e issus du prisme BS_1 . La lumière incidente sur ce dernier étant polarisée circulairement, les deux faisceaux seront donc rigoureusement en phase en se superposant dans le prisme BS_2 , et à la sortie de celui-ci, on aura $\Delta\varphi = 0$. Le faisceau recombinaison sera donc polarisé plan à 45° du plan défini par o et e .

On supprime à présent la lame quart d'onde Q_2 , ne conservant que le polariseur orientable P_2 comme analyseur de polarisation plane (Figure 2).

Dans un premier temps on oriente P_2 de façon que son axe forme un angle de 45° avec le plan défini par o et e , cet axe étant, de plus, dans le plan de polarisation du faisceau sortant de BS_2 dans les conditions définies ci-dessus.

Le faisceau recombinaison traversera donc le polariseur P_2 vers O sans être absorbé en aucune façon.

On sait bien en théorie classique, et ceci est vérifié par l'expérience de Fresnel et Arago, que deux vibrations dans des plans perpendiculaires donnent une vibration résultante dont l'intensité globale est indépendante de la phase relative des deux vibrations composantes. En termes d'ondes électromagnétiques classiques, comme dans le cas de l'expérience A1, l'intensité du faisceau sortant du dispositif vers O est égale à l'intensité du faisceau incident sur BS_1 .

Imaginons alors, que selon la théorie Einstein-de Broglie, toute l'énergie $nh\nu$ d'un faisceau lumineux soit concentrée dans des photons corpusculaires permanents et insécables, se propageant en association étroite avec des ondes, totalement ou presque complètement anénergétiques.

Que peut-on dire, selon cette théorie, si de I ne parvient sur le prisme BS_1 , qu'un seul photon à la fois ?

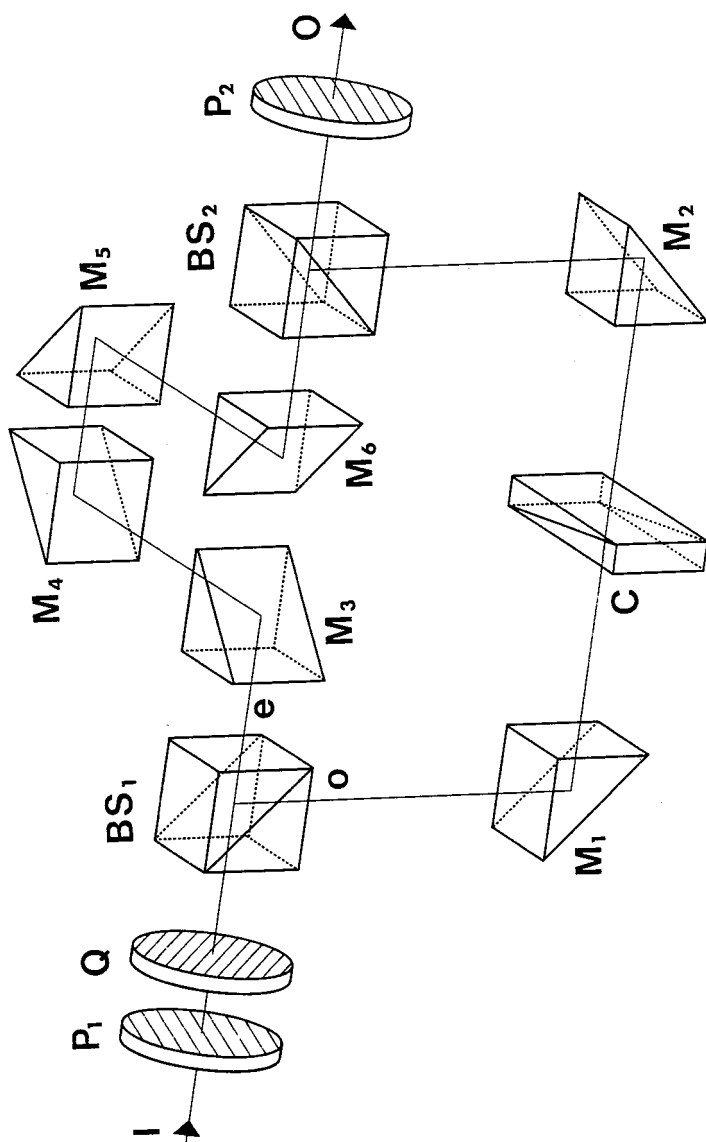


Figure 2.

Dans BS_1 , ce photon unique changera de polarisation, de circulaire, celle-ci devenant plane, et le corpuscule suivra l'un ou l'autre des chemins optiques distincts o ou e . En effet, l'énergie n'apparaît pas à priori divisée entre les deux faisceaux, conformément à l'interprétation simple de l'expérience de Clauser [10]. Selon l'autre chemin optique, e ou o , se propagera donc une partie de l'onde associée que l'on ne peut imaginer que "vide", selon l'expression usitée. Cette onde vide aura toutefois une influence très nette sur le photon, par l'onde qui lui est directement associée, lors de la recombinaison de l'ensemble dans le prisme BS_2 . Si l'onde, qui se propagerait à l'état vide dans l'une des branches du dispositif, était inactive dans la recombinaison de l'ensemble, chaque photon, qui lui se propagerait dans l'autre branche, n'aurait qu'une probabilité $1/2$ de traverser P_2 puisque l'axe de cet analyseur est dans le cas présent à 45° des plans de polarisation respectifs, tant du rayon o que du rayon e . Dans ce cas, l'intensité du faisceau sortant en O ne serait que la moitié de celle du faisceau incident sur BS_1 , contrairement à la théorie classique.

Si ensuite, on tourne l'analyseur P_2 de 90° de façon que son axe soit perpendiculaire au plan de polarisation de l'onde recombinaison après BS_2 , cette dernière ne pourra pas traverser l'analyseur P_2 . En d'autres termes, un photon sortant de BS_2 aura une probabilité nulle de traverser P_2 .

Si toutefois on occultait l'un des faisceaux, o ou e , par un écran opaque, la probabilité pour qu'un photon de l'autre faisceau puisse traverser P_2 redeviendrait égale à $1/2$. Comme l'intensité moyenne dans chaque branche est la moitié de l'intensité globale de l'onde polarisée circulairement incidente sur BS_1 , la probabilité pour un photon incident sur BS_1 de sortir finalement vers O ne serait plus que de 25%.

On voit donc que l'influence de l'onde dite vide est cependant bien réelle. Il en était de même dans l'expérience A1 où les deux ondes incidentes sur BS_2 déterminent par leur phase relative $\Delta\varphi$ l'hélicité du faisceau polarisé circulairement issu du prisme de recombinaison BS_2 .

Les deux ondes o et e , qui ne peuvent pas interférer entre elles, ont cependant une action commune, quand elles sont recombinaison, sur les photons que l'une ou l'autre peut porter, puisqu'étant cohérentes, elles réorientent le plan de polarisation de ces photons selon leur résultante.

Une conclusion que l'on peut donc tirer de ces expériences A est que les photons $h\nu$ éventuels, considérés en théorie Einstein-de Broglie

comme des corpuscules permanents entre émission et absorption, se comportent vis-à-vis des analyseurs de polarisation, comme les ondes globales auxquelles ils sont associés, en considérant ces ondes suivant le schéma classique, et donc linéairement superposables.

Supposons ensuite, que les deux rayons o et e étant toujours en phase, $\Delta\varphi = 0$, l'analyseur P_2 soit orienté de façon que son axe soit dans le plan de polarisation de l'un des rayons o ou e , o par exemple. Le faisceau sortant finalement vers O aura une intensité réduite de 50% par rapport à l'intensité incidente sur BS_1 , et il y aurait à cela deux explications possibles:

1/ Tous les photons corpusculaires issus de BS_2 sont polarisés comme l'onde globale associée, et ont donc une probabilité 1/2 de pouvoir traverser P_2 .

2/ Si il n'existe pas de photons, mais exclusivement des ondes énergétiques en elles-mêmes, la composante o du faisceau global issu de BS_2 traversera P_2 à coup sûr, la composante e sera toujours bloquée.

Ces deux interprétations sont en accord avec les expériences A décrites ci-dessus, sans que l'on puisse à ce stade trancher entre l'une ou l'autre de ces explications. Pour ce faire, il nous faut envisager un autre dispositif.

5. EXPERIENCES B - DISPOSITIF GENERAL

Dans cette seconde série d'expériences, on considère la disposition générale suivante, directement inspirée des expériences A, mais en utilisant à présent deux sources au lieu d'une seule (Figure 3).

Un faisceau lumineux I_1 monochromatique, de faible intensité, et bien collimaté, est préparé dans un état de polarisation circulaire à l'aide d'un polariseur plan P_1 suivi d'une lame quart d'onde Q_1 . Il est ensuite décomposé par un prisme polariseur BS_1 en un rayon ordinaire o_1 et un rayon extraordinaire e_1 , tous deux polarisés plans.

Un faisceau lumineux I_2 , identique à I_1 et de même fréquence, est préparé de la même façon par un polariseur plan P_2 suivi d'une lame quart d'onde Q_2 , et est ensuite décomposé par un prisme BS_2 en un rayon ordinaire o_2 et un rayon extraordinaire e_2 .

Les rayons e_1 et o_2 sont tous deux incidents sur un troisième prisme polariseur BS_3 de manière à pouvoir se superposer l'un à l'autre.

Les rayons o_1 et e_2 sont respectivement mesurés par les détecteurs D_1 et D_2 .

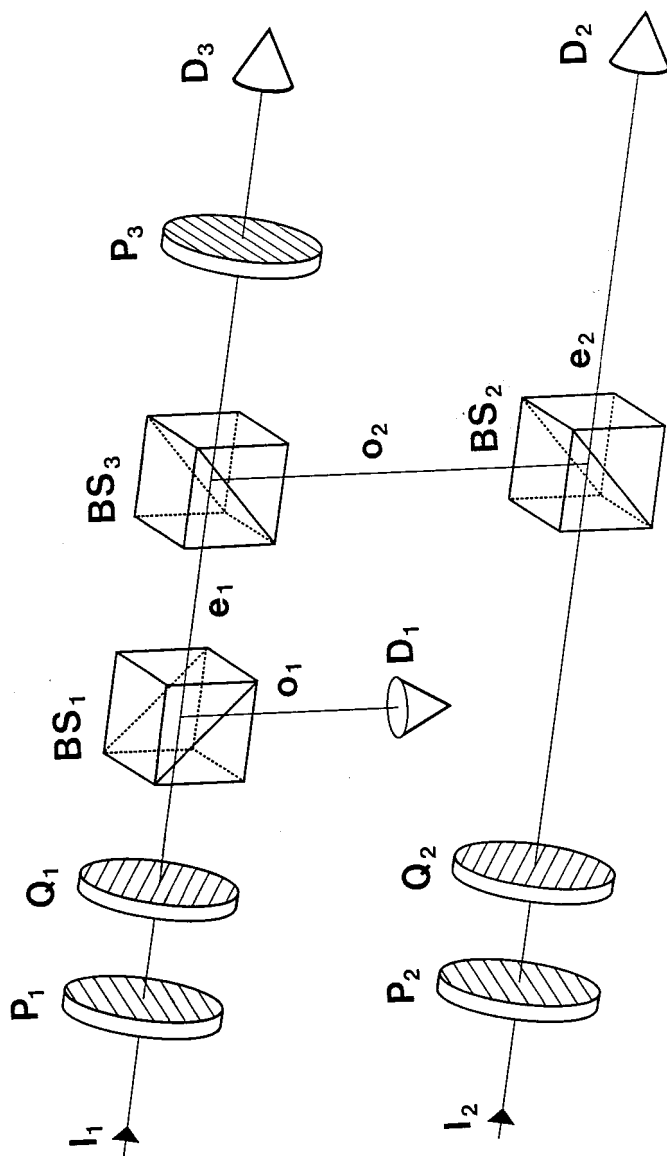


Figure 3.

Le faisceau sortant de BS_3 est analysé à l'aide d'un polariseur plan orientable P_3 suivi d'un détecteur D_3 . Dans toutes les expériences décrites ci-après, l'analyseur P_3 est orienté de façon que son axe soit orthogonal au plan défini par e_1 et o_1 , c'est à dire perpendiculaire au plan de polarisation de e_1 .

Pour que les phases respectives de I_1 et I_2 soient définies, bien que totalement aléatoires et indépendantes, et ce, pendant des temps d'expérience très brefs, les sources des faisceaux I_1 et I_2 sont deux lasers identiques et bien stabilisés. On peut alors considérer les faisceaux incidents sur le prisme BS_3 comme étant dans des états cohérents distincts $|\alpha_1\rangle$ et $|\alpha_2\rangle$ ne donnant pas en D_1 , D_2 , et D_3 , des détections de photons en grappe (bunching).

Si d'abord on enlève l'analyseur P_3 , la source de I_1 étant seule allumée, et si le faisceau I_1 est bien polarisé circulairement, on aura pour les taux de comptage moyens:

$$N_{o1} = N_{e1}$$

N_{o1} et N_{e1} étant respectivement comptés par les détecteurs D_1 et D_3 . En effet le rayon e_1 peut traverser le prisme BS_3 vers D_3 sans être affecté.

Dans l'autre cas, où la source de I_2 est seule en marche, on aura de même pour les taux de comptage moyens:

$$N_{o2} = N_{e2}$$

N_{o2} et N_{e2} étant respectivement comptés par les détecteurs D_3 et D_2 puisque le rayon ordinaire o_2 sera réfléchi par BS_3 vers D_3 .

Raisonnant selon la théorie corpusculaire Einstein-de Broglie, on suppose en outre que les deux sources étant en marche, le faisceau I_2 soit suffisamment faible pour que statistiquement, il n'y ait, en provenance de ce faisceau, qu'un seul photon à la fois dans l'ensemble du dispositif.

On peut alors estimer que quand un photon se propagera selon e_2 vers le détecteur D_2 , il y aura simultanément le long de o_2 une onde vide qui sera réfléchi par BS_3 vers D_3 .

Comme dans les premières expériences A, précédemment décrites, on peut alors penser que, dans certaines conditions de phase relative $\Delta\varphi$ entre e_1 et o_2 , ces deux rayons puissent se superposer dans BS_3 pour donner une onde résultante polarisée elliptiquement, ou à la limite, polarisée plane ou circulaire.

Si comme on l'a vu, les photons corpusculaires ont même comportement vis-à-vis des analyseurs de polarisation que les ondes auxquelles ils sont associés, il se peut donc que certains photons du rayon e_1 ne soient plus, après combinaison avec le rayon o_2 dans BS_3 , des photons polarisés strictement dans le plan e_1-o_1 .

Ceci avait déjà pu être constaté dans l'expérience A2, avec toutefois une onde vide qui avait été séparée du train d'ondes global initialement associé au photon, et donc cohérente avec l'onde demeurée associée au corpuscule après séparation. La phase relative $\Delta\varphi$ était alors fixée à l'aide du compensateur C .

Dans le cas présent, il s'agit de la superposition de l'onde associée à un photon et de l'onde vide séparée d'un autre photon. Les interférences entre deux telles ondes de même fréquence, et donc leur cohérence mutuelle, sont envisageables, et ont été décrites comme responsables des résultats de l'expérience de Mandel et Pfleegor [11] par Louis de Broglie et J. Andrade e Silva [12].

Les phases propres des faisceaux I_1 et I_2 sont parfaitement aléatoires dans la disposition décrite ici, mais dans tous les cas où $\Delta\varphi \neq 0$, même pendant un temps très court, inférieur au temps de diffusion de la phase de chaque faisceau, on est en droit de penser, selon la théorie Einstein-de Broglie, que certains photons associés au rayon e_1 puissent ne plus être bloqués par P_3 , et donc être détectés en D_3 .

Selon la théorie quantique toutefois, comme selon l'hypothèse semi-classique de la réduction, l'onde, quelle qu'elle soit se propageant selon o_2 ne doit plus exister après la détection d'un photon en D_2 .

Par contre, selon la théorie de la double solution de Louis de Broglie, l'onde réelle v , qui est pour partie dans la branche o_2 , continue d'exister après absorption d'un photon corpusculaire en D_2 [13].

On peut étudier ce dernier point par une disposition particulière de l'appareillage général B décrit ci-dessus.

6. EXPERIENCE B1

Les éléments de l'appareil sont disposés de façon que la distance séparant le prisme polariseur BS_2 du détecteur D_2 soit beaucoup plus courte que celle séparant BS_2 du prisme de superposition BS_3 . Cette dernière branche peut être allongée à l'aide d'un jeu de miroirs, par exemple. La disposition des autres éléments reste inchangée (Figure 4),

à l'exception d'un atténuateur A placé sur le faisceau I_2 . Les lasers sources sont figurés en L_1 et L_2 .

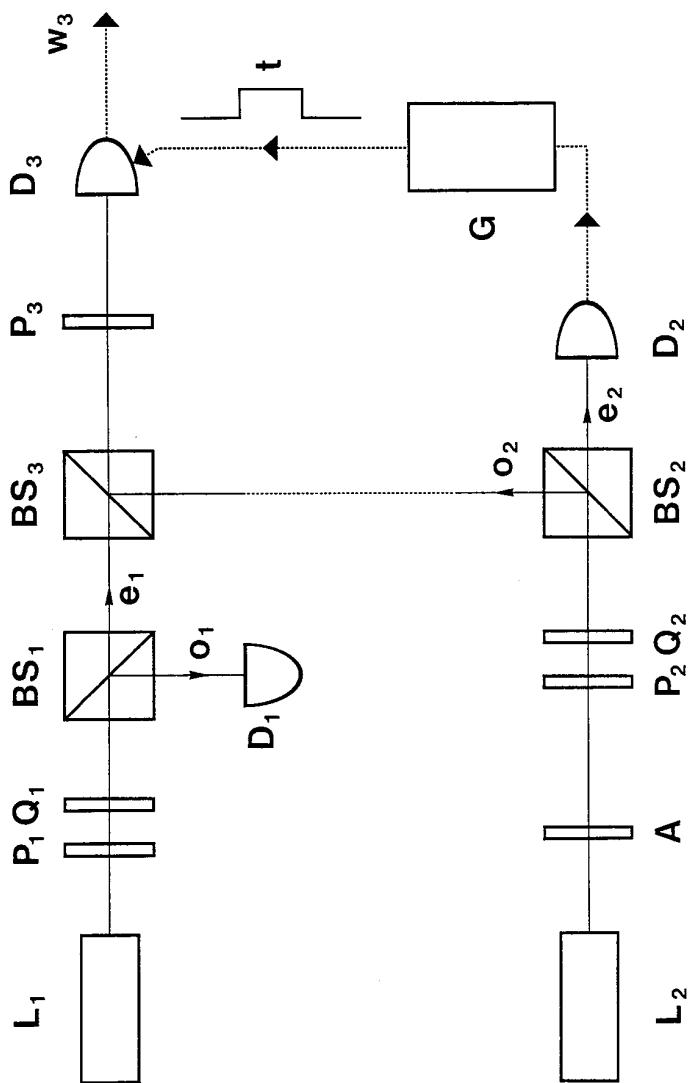


Figure 4.

Par ailleurs, pour éviter la détection éventuelle d'un photon se propageant selon o_2 par le détecteur D_3 , celui-ci est activé par un signal rectangulaire de durée t que déclenche l'observation d'un photon par le détecteur D_2 , au moyen d'un générateur d'impulsions G .

Dans ces conditions, l'interaction éventuelle de l'onde vide se propageant selon o_2 , avec l'onde e_1 , ne peut se produire qu'après la détection d'un photon en D_2 . La durée t du signal d'activation de D_3 devrait être de l'ordre du temps de cohérence du faisceau I_2 .

En appelant W_3 le taux de comptage moyen du détecteur D_3 , on peut, à l'aide de cette disposition expérimentale particulière, obtenir les deux résultats suivants:

$W_3 \neq 0$. Il existe bien une onde vide o_2 active, qui se superposant à l'onde e_1 , réoriente les photons corpusculaires de ce dernier faisceau, et leur donne une probabilité non-nulle de traverser l'analyseur P_3 . En outre, cette onde vide selon o_2 est permanente, et indépendante de la détection par D_2 du photon auquel elle était primitivement associée avant séparation par le prisme BS_2 . Ce résultat serait conforme à la théorie de Louis de Broglie.

$W_3 = 0$. En théorie corpusculaire, on est alors amené à penser que l'onde vide selon o_2 n'est plus active pour réorienter les photons du faisceau e_1 comme elle l'était selon l'interprétation de l'expérience A2. Contrairement au premier cas, cette onde aura donc été réduite simultanément à la détection du photon en D_2 .

On peut noter au passage, qu'il y aurait peut-être là une explication à l'échec des tentatives de détection des ondes vides par certaines autres méthodes. Pour être autorisé à considérer l'un des faisceaux issus d'un séparateur, miroir semi-transparent par exemple, comme "vide", il faut avoir détecté l'éventuel photon associé dans l'autre faisceau. Mais à l'instant où l'on détecte ce photon corpusculaire, alors, l'onde supposée vide n'existerait plus si elle avait été réduite simultanément à la détection de l'énergie $h\nu$.

Si le second résultat, $W_3 = 0$, est obtenu, on pourra donc penser qu'il n'existe pas d'onde associée à un photon, supposé corpusculaire, qui ne soit réductible, ce qui serait nouveau par rapport à la théorie Einstein-de Broglie usuellement comprise. Mais ceci conduit à une autre analyse.

7. EXPERIENCE B2

Les explications alternatives à l'expérience A2 montrent qu'en théorie corpusculaire, les photons ont toujours vis-à-vis des analyseurs le même comportement que les ondes auxquels ils sont associés, en considérant ces dernières comme des ondes électromagnétiques classiquement superposables.

En théorie corpusculaire toujours, l'onde globale résultant de la superposition du rayon e_1 et du rayon o_2 , ce dernier étant supposé vide, peut dans certains cas de phase relative $\Delta\varphi$ de ces deux composantes, réorienter un photon du rayon e_1 incident sur BS_3 et lui donner une probabilité non-nulle de traverser l'analyseur D_3 , comme on l'a vu précédemment.

L'onde selon o_2 étant vide par hypothèse, il pourrait donc y avoir quasi-simultanément à une détection en D_2 , détection en D_3 d'un photon provenant du rayon e_1 , si les deux chemins optiques BS_2 - D_2 et BS_2 - D_3 sont de même longueur.

Pendant un temps de l'ordre du temps de cohérence du faisceau I_2 , *on pourrait donc observer des coïncidences entre les détections en D_2 et D_3 , en D_3 avant D_2 si l'onde o_2 est réductible, et indifféremment, si l'onde o_2 est permanente.*

On dispose donc à présent les éléments du dispositif B de telle façon que les chemins optiques de BS_2 à D_2 et D_3 soient sensiblement égaux, et la distance de BS_3 à D_3 la plus courte possible. De plus les détecteurs D_2 et D_3 sont reliés à un compteur de coïncidences C (Figure 5).

Dans ces conditions, les résultats de l'expérience A2 (connus par l'expérience de Fresnel et Arago) montrent, sans aucun doute possible, que si une onde o_2 , même vide, pénètre dans BS_3 , elle pourra permettre à un photon corpusculaire du faisceau e_1 de traverser l'analyseur P_3 avec une probabilité non nulle. Autrement dit, des coïncidences entre les signaux issus de D_2 et D_3 seront sûrement observées si, dans le faisceau e_1 , existent des photons corpusculaires, selon la théorie Einstein-de Broglie.

On suppose toujours le faisceau I_2 très atténué par A , de telle sorte que statistiquement il n'y ait jamais dans le dispositif qu'un seul photon issu de L_2 à la fois. Un photon corpusculaire issu de L_2 ne peut passer que selon o_2 ou e_2 .

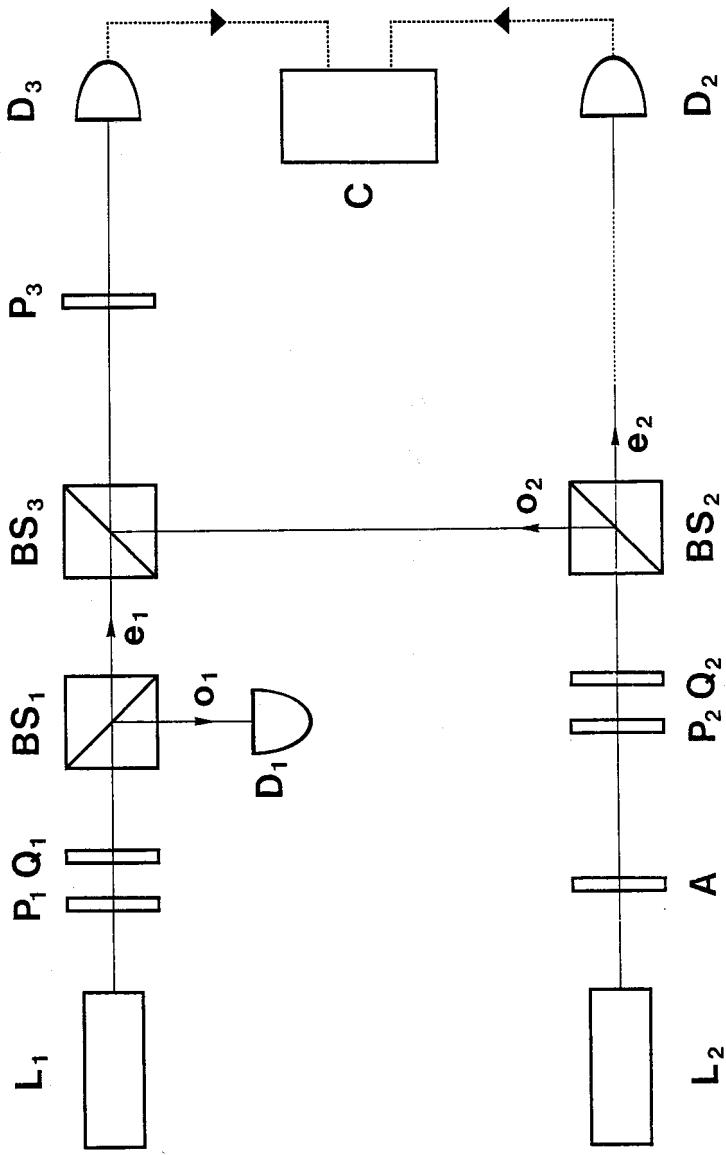


Figure 5.

Imaginons donc que l'on détecte par le compteur C , et ce pendant un temps très court, un photon en D_2 et un photon en D_3 presque simultanément. Ce serait bien alors, que l'onde o_2 , vide à cause de la détection en D_2 , aurait interagi avec le faisceau e_1 pour permettre la détection en D_3 à travers l'analyseur P_3 , la radiation e_1 ne pouvant en aucun cas traverser cet analyseur par elle-même.

On saurait après coup que l'onde o_2 était vide, puisque le photon détecté par D_2 était sûrement sur la branche e_1 pendant l'interaction o_2-e_1 .

Si l'onde selon o_2 n'était qu'une onde de probabilité, elle était purement subjective puisqu'afférente à un événement qui ne pouvait se produire effectivement. L'ignorance d'un fait certain pourrait-elle être la cause de la détection d'un photon de e_1 en D_3 ? Cela paraît douteux, voire impossible.

C'est donc que l'onde selon o_2 était bien réelle, quoique vide, et efficacement superposable à l'onde non-vide se propageant selon e_1 .

Pour Louis de Broglie, cette onde vide est une onde v , c'est à dire une très faible onde électromagnétique, et elle peut se superposer à l'onde non-vide e_1 de même nature [14].

Si, selon le résultat de l'expérience B1, cette onde était réductible instantanément et à distance, l'intensité de l'onde ne pouvant jouer un rôle dans ce processus, ce serait que les ondes électromagnétiques en général auraient cette propriété de réductibilité.

En suivant l'hypothèse de la réduction quasi-ponctuelle des ondes électromagnétiques, intrinsèquement énergétiques, les rayons o_2 et e_2 font partie d'un ensemble d'ondes étendues dans la partie du dispositif éclairé par I_2 , ondes éventuellement réductibles dans leur ensemble, et instantanément, soit en D_2 , soit en D_3 .

Si de plus, il n'y a statistiquement qu'une seule unité d'énergie à la fois dans les deux rayons e_2 et o_2 considérés globalement, les résultats prévisibles ne seront plus du tout les mêmes.

Dans ce cas, le faisceau e_1 , considéré comme composante de l'onde résultante sortant de BS_3 , ne pourrait en aucun cas traverser l'analyseur P_3 , vers le détecteur D_3 . Ce qui pourrait traverser P_3 à coup sûr, et exclusivement, c'est la branche o_2 de l'ensemble $e_2 + o_2$, réductible par un absorbeur avec une probabilité réelle jusqu'à la détection effective, soit en D_2 , soit en D_3 . Probabilité réelle comme potentialité, et non pas probabilité par ignorance d'un fait certain, comme dans l'autre cas.

Cette forme de probabilité, très différente de celle évoquée précédemment, n'a de sens que si l'onde, contenant par elle-même la totalité de l'énergie $h\nu$, occupe complètement les deux branches e_2 et o_2 , et est partout réductible.

Selon cette dernière hypothèse, d'après les résultats de l'expérience de Clauser, et conformément à la théorie quantique, *il ne pourrait en aucun cas être observé de coïncidences entre les détections par D_2 et D_3 .*

La recherche de coïncidences entre les détections de photons en D_2 et D_3 serait donc discriminatoire entre la théorie corpusculaire, et l'hypothèse de la réduction locale et instantanée d'ondes intrinsèquement énergétiques.

Si dans cette dernière expérience, on observait des coïncidences entre les détections par D_2 et D_3 , la théorie du photon corpusculaire associé à une onde anénergétique, partiellement dissociable, mais cependant active, se trouverait confortée.

Si à l'inverse, on n'observait jamais de coïncidences entre les détections par D_2 et D_3 , alors, ce serait la solution purement ondulatoire de l'expérience A2 qui serait validée, au détriment de la solution en termes de photons corpusculaires. De plus, on observerait toujours le résultat $W_3 = 0$ dans l'expérience B1.

8. CONCLUSION

Par ces diverses expériences simples, on peut espérer affiner la connaissance de quelques propriétés fondamentales de la lumière, et se rapprocher d'une véritable description des radiations électromagnétiques.

Selon les résultats, on obtiendra une information sur les points suivants:

1/ Réalité physique des ondes, qu'elles soient directement associées à d'éventuels photons corpusculaires, ou qu'elles soient au contraire "vides".

2/ Action éventuelle de l'onde vide séparée d'un photon corpusculaire, sur un autre photon indépendant par superposition à l'onde directement associée à ce second corpuscule.

3/ Réduction instantanée de toutes les ondes associées à un photon corpusculaire, simultanément à la détection de ce dernier, ou permanence des ondes, même vides, après cette détection.

4/ Nature de l'occupation des modes d'oscillation dans un dispositif optique, soit par des photons corpusculaires associés à des ondes anénergétiques, soit exclusivement par des ondes intrinsèquement énergétiques, réductibles instantanément et à distance.

Quels que soient les résultats de ces expériences, tant par le but poursuivi, que par la méthode d'analyse, cette étude est une tentative d'avancée selon la ligne indiquée par Louis de Broglie [3]:

“...rendre compte de la véritable nature des phénomènes observés.”

Références

- [1] L. de Broglie, C. R. Acad. Sciences Paris. 177 (1923) 548. Ann. Fond. L. de Broglie. 7 (1982) 101.
- [2] F. Selleri, in The Wave Particle Dualism, Reidel, Dordrecht, (1984) 101.
- [3] L. de Broglie, Discours prononcé le 23 avril 1974 à la première séance du Séminaire de la Fondation Louis de Broglie. Reproduit dans Jalons pour une Nouvelle Microphysique, Gauthier Villars, Paris (1978) p.4.
- [4] C. Cormier-Delanoue, Found. of Phys. 19 (1989) 1171.
- [5] L. de Broglie, La réinterprétation de la mécanique ondulatoire, Gauthier Villars, Paris (1971) p. 102.
- [6] T. D. Newton, E. P. Wigner, Rev. Mod. Phys. 21 (1949) 400.
- [7] C. Cormier-Delanoue, Ann. Fond. L. de Broglie. 15 (1990) 211.
- [8] G. Bruhat, Optique, 4e ed. rev. par A. Kastler, Masson, Paris (1954) p.305
- [9] M. Born, E. Wolf, Principles of Optics, Pergamon Press, 5th. ed.(1975) p.203.
- [10] J. F. Clauser, Phys. Rev. D9 (1974) 853.
- [11] R. L. Pfleegor, L. Mandel, Phys. Rev. Lett. 24A (1967) 766.
- [12] L. de Broglie, J. Andrade e Silva, Phys. Rev. 172 (1968) 1284.
- [13] L. de Broglie, La réinterprétation de la mécanique ondulatoire, op.cit. p.102
- [14] L. de Broglie, Ondes Electromagnétiques et Photons, Gauthier-Villars, Paris (1968) p. 29.

(Manuscrit reçu le 22 octobre 1991)