

Interférences et périodicité

XAVIER OUDET

Fondation Louis de Broglie, 23 rue Marsoulan, 75012 Paris, France
Laboratoire de Magnétisme et d'Optique de l'Université de Versailles
C.N.R.S., 45 Avenue des Etats-Unis, 78035 Versailles, France
E-mail: Xavier.Oudet@physique.uvsq.fr

Les fondements de la science sont plus durables que le granit ; ses murs, salles et escaliers se reconstruisent d'eux-mêmes quand, ça et là, quelques travaux de maçonnerie, enfantinement édifiés, s'écroulent, Groddeck [1].

RESUME. Les interférences observées avec la lumière sont interprétées comme le reflet des propriétés périodiques des électrons des atomes du lieu du phénomène et de la quantité de mouvement des photons eux-mêmes. De cette manière, après absorption, une partie des photons ont leur énergie dissipée sous forme de chaleur ou sont réémis par émission spontanée ; ils sont trop peu nombreux par unité de temps pour être observables. Les autres ont une durée de vie qui leur permet d'attendre d'être en nombre suffisant pour être réémis par émission stimulée et observables. Ces deux parties sont fonction de la différence de chemin optique des photons. De cette manière les difficultés de compréhension des expériences, avec des photons arrivant un par un, disparaissent.

ABSTRACT. The interferences observed with the light are supposed to reflect the periodic properties of the electrons of the atoms in the place of the phenomenon and of the momentum of the photons themselves. In this way, after absorption, a part of the photons have their energy dissipated as heat or are reemitted spontaneously; they are in a too small number to be observed. The other has a life time allowing them to wait to be in sufficient number to have a probability to be reemitted in a stimulated manner. These two parts

are function of the optical way difference of the photons. In this way the difficulties of understanding the one by one photon experiments disappear.

1 Introduction

Les phénomènes d'interférences, observés lorsque deux faisceaux du domaine du visible arrivent sur un écran révèlent une propriété périodique. Leur compréhension reste aujourd'hui une question ouverte. Au 19^{ième} siècle avec Fresnel la théorie ondulatoire de la lumière [2], proposant une interprétation simple de la diffraction et des interférences, a semblé l'emporter sur la conception corpusculaire de Newton publiée en 1704 [3]. Mais avec Einstein l'hypothèse du photon en 1905 fait rebondir le débat [3]. La découverte de l'onde associée au corpuscule électron par de Broglie en 1924 n'a pas permis jusqu'ici de réunir un large consensus sur le rôle respectif de ces deux aspects. Récemment j'ai proposé d'interpréter la fonction d'onde comme la fonction génératrice de la quantité de mouvement et de l'énergie sur un élément différentiel de temps et d'espace [5]. Avec cette approche l'onde, tout en étant distincte de l'électron, le pilote le long de sa trajectoire et le modèle de Dirac nous montre les conditions différentielles pour qu'il en soit ainsi. Ainsi les électrons dans les atomes ont des trajectoires fermées ou presque fermées.

Grâce à Taylor depuis 1909 nous savons que les franges d'interférences subsistent avec une très faible intensité lumineuse [6]. Depuis de nombreuses expériences ont confirmées ce résultat [7-12]. L'aspect le plus surprenant fut la possibilité d'observer des interférences avec des laser indépendants [8] résultat mainte fois confirmé [9-12]. Ce casse tête suggéra à Dirac dès 1930 l'hypothèse ou position suivante : "Each photon then interferes only with itself. Interference between two different photons never occurs" souvent cité dans les discussions et les introductions des travaux relatifs aux interférences [13]. Cette position déconcertante ne semble pas jusqu'ici avoir été sérieusement mise en défaut. Pourtant sur le plan expérimental elle est hautement critiquable. En effet les photons sont émis par des atomes, par suite dans les directions perpendiculaires à celle de la propagation, il ne semble pas raisonnable de leurs attribuer des dimensions très supérieurs à celles de des atomes émetteurs, soit quelques angströms au plus. Or les trous d'Young qui donnent naissance aux interférences peuvent être distant de plusieurs millimètres.

L'étude des interférences en particulier avec l'expérience des trous d'Young montre que la distance qui sépare deux franges, appelée interfrange, est directement liée à la différence de marche entre les deux chemins optique. L'interprétation classique des interférences suppose par exemple que deux faisceaux puissent arriver sur le lieu du phénomène simultanément en un

même point où il y aurait interaction directe entre eux. Cette approche est l'héritage de la théorie ondulatoire de la lumière qui attribue à la lumière une propriété périodique.

Pourtant la seule chose que nous pouvons affirmer est que l'interaction de la lumière avec l'écran révèle une propriété périodique. L'étape suivante est de déterminer si la propriété périodique ainsi révélée appartient à la lumière seule, à l'écran seul ou aux deux. Les difficultés à comprendre les interférences d'Young conduisent à penser que la propriété périodique ainsi mise en évidence est liée à celles des électrons des atomes de l'écran où elles sont observées. Pour cela il y a lieu de supposer que les photons sont absorbés pendant un certain temps par les atomes de la matière qui constitue le lieu de l'expérience. Pendant la durée de l'absorption chaque photon communique à l'atome une composante périodique au mouvement de l'atome. Les photons sont ensuite émis à nouveau avec une probabilité qui est liée à la différence de marche. Pendant ce temps les interactions entre les atomes absorbeurs et les autres sont responsables des interférences. Nous nous proposons dans cette étude de montrer que les phénomènes d'interférences sont bien liés au mouvement périodique des électrons des atomes du lieu du phénomène après absorption de photons d'une même énergie.

2 Interférences et probabilité

Dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation, nous supposons que les dimensions du photon sont de l'ordre de grandeur de celles l'atome qui l'a émis. Considérons alors les atomes de la source présents dans un volume d'épaisseur de quelques distances inter-atomiques et de section égale à celle de la source perpendiculairement à la direction de propagation de la lumière. Supposons qu'ils soient tous porteurs d'une même énergie thermique susceptible d'être émise sous la forme d'un photon. De ce fait il ne peut arriver simultanément sur le lieu du phénomène qu'un nombre de photons au plus égal à l'ordre de grandeur du nombre de ces atomes.

Considérons les interférences obtenues avec les trous d'Young et de la lumière monochromatique. Dans un tel système pour observer des interférences il faut qu'une source primaire S donne naissance à deux sources secondaires S_1 et S_2 (figure 1). Ces deux sources génèrent chacune un faisceau qui interfèrent sur un écran placé à une distance D . Les deux sources secondaires sont dites cohérentes car les faisceaux qu'elles génèrent interfèrent. Pour une source primaire classique tel le corps noir, nous savons de plus que la cohérence disparaît si la différence de marche entre les deux faisceaux est de l'ordre d'une dizaine de mètres. Cette propriété conduit à supposer que dans

une source cohérente les photons lors de l'émission sont émis par trains successifs d'une certaine durée dans lesquels les photons sont distants de multiples entiers de la longueur d'onde λ des photons.

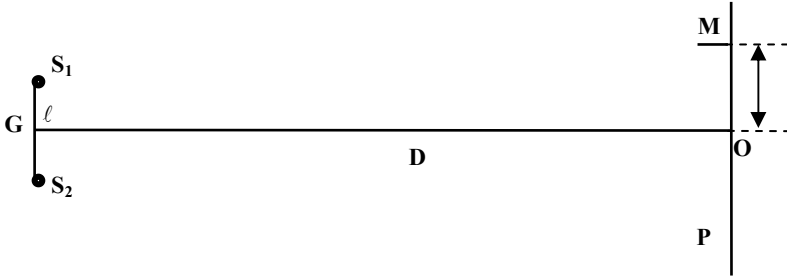


Figure 1. Schéma d'un dispositif d'interférences. Un système optique donne d'une source S deux images S_1 et S_2 séparées par une distance ℓ . On observe les franges d'interférence dans un plan P perpendiculaire à l'axe symétrie GO du système.

Si maintenant nous comparons la surface de la source à celle du lieu du phénomène des interférences il est clair qu'il arrive simultanément que très peu de photons. Pour une source de 0,1mm de côté et une surface d'observation de 100mm de côté, sans compter les pertes, le rapport des surfaces est de l'ordre de un pour un million. Il apparaît ainsi que pour qu'il y ait interactions il faut admettre que les photons sont absorbés sur le lieu du phénomène et émis à nouveau par émission stimulée lorsqu'ils sont en nombre suffisant. Il est important également de se rappeler que la distance de l'ordre de 10 mètres au dessus de laquelle disparaît la cohérence, correspond à un temps de l'ordre de 10^{-7} seconde pour la vitesse de la lumière, ce que confirment des expériences avec une source laser [14]. Ce temps est justement celui en dessous duquel il n'y a plus de corrélations dans les expériences de photon un par un [9]. Il ressort donc de cette analyse que l'interprétation des interférences repose sur la notion de stockage des photons cohérents. Il reste à expliquer comment se forment les franges brillantes et les franges noires. Dans ce but considérons d'abord la liaison synchrone.

3 La liaison synchrone

Il y a dans les solides un mécanisme d'ordre désordre qui est la clé pour comprendre les interférences. Pour la simplicité considérons d'abord un solide cristallisé. Dans son site cristallographique l'atome prend une position ordonnée à basse température liée aux mouvements synchrones des électrons externes entre atomes voisins. Nous dirons qu'il forme avec ses voisins des liaisons synchrones qui sont directionnelles. Lorsque la température croît les atomes sont supposés vibrer dans leur site.

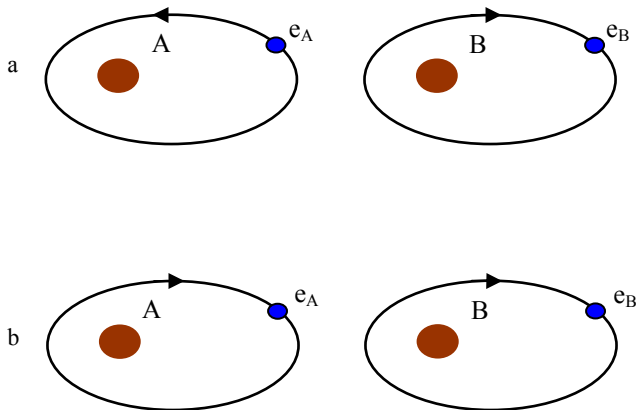


Figure 2. Le mouvement synchrone : a) couplage antiferromagnétique, b) couplage ferromagnétique.

Pour caractériser la synchronisation des mouvements considérons dans un cristal une chaîne d'atomes d'une même espèce chimique et d'un même site cristallographique. Considérons de plus sur deux atomes voisins un électron dans un même état quantique. Pour simplifier les figures nous supposons leurs mouvements fermés et périodiques mais les raisonnements qui suivent restent valables avec des mouvements presque fermés. Pour chacun de ces électrons la période du mouvement associé est donc la même. Soit dans cette chaîne A et B deux atomes voisins et sur chacun d'eux un électron e_A et e_B (figure 2).

Il y a deux cas de figure à considérer suivant que, par rapport à un plan de référence, les deux électrons tournent en sens opposés (figure 2a) couplage antiferromagnétique ou qu'ils tournent dans le même sens (figure 2b) cou-

plage ferromagnétique. En l'absence de désordre à zéro degré Kelvin il y a corrélation entre les mouvements des électrons de liaison de manière à ce que l'énergie de cohésion soit maximum. Par exemple l'électron e_A passe entre A et B lorsque e_B est le plus éloigné possible de e_A . L'électron e_A est par suite attiré par le cœur de l'atome B mais la présence de e_B lui interdit de quitter son atome. De même pour e_B par rapport à son autre voisin dans cette chaîne et ainsi de suite. Ainsi chaque électron de liaison est plus attiré par le cœur de son propre atome que par celui d'un atome voisin. Il en est de même pour l'ensemble des directions où il y a des chaînes d'atomes identiques. Il y a synchronisation du mouvement des électrons qui se trouvent dans le même état quantique sur un atome d'une même espèce chimique situé dans même site cristallographique. Notons que cette notion de synchronisation reste valable, de proche en proche par voisinages successifs, dans les solides non cristallisés tels les verres et les solides amorphes en général. Par suite toutes les considérations relatives à la synchronisation pour expliquer les interférences restent valables dans ces solides.

Considérons alors le solide à température suffisamment basse pour que l'énergie absorbée conserve la synchronisation entre le plus grand nombre d'électrons homologues. La synchronisation a un rôle dans le transfert de l'énergie. En effet lors de l'interaction d'un atome de gaz avec la paroi du solide une partie de l'énergie de translation de l'atome du gaz est transférée sur un ou plusieurs électrons de un ou plusieurs atomes du solide. Considérons un électron e_A qui a absorbé de l'énergie. L'énergie de liaison E_ℓ à son atome a varié. La synchronisation avec ses voisins n'est plus respectée. L'électron e_A a tendance, après un certain nombre de révolutions, à passer entre les atomes A et B à la même époque que e_B . Cette tendance a pour effet de modifier la période de l'électron e_B par transfert d'énergie. De proche en proche les électrons homologues d'un même site tendent à conserver la synchronisation. C'est ce que montre l'étude de la chaleur spécifique des solides à basse température [15]. Pour que la tendance à conserver la synchronisation ait lieu, il faut toutefois que l'énergie transférée pour une direction reste faible par rapport à l'énergie E_ℓ . Il y a de telles liaisons avec l'ensemble des électrons les plus externes dans les différentes directions de l'espace, les énergies correspondantes n'étant pas a priori les mêmes. Considérons alors un atome, lorsque l'énergie thermique est supérieure à une barrière de potentielle E_g , nous supposons que les liaisons synchrones sont brisées et que l'atome bascule dans un état désordonné.

4 L'absorption des photons dans un solide

Pour aborder l'absorption des photons dans les solides, considérons d'abord l'absorption de l'énergie thermique. L'étude de la loi de Dulong et Petit montre comment les atomes désordonnés stockent une quantité d'énergie égale à $3kT$ [16]. L'énergie thermique est stockée par les noyaux tout autant que par les électrons qui tournent autour du noyau de leur atome. En effet comme nous l'avons supposé le mouvement d'un électron est le résultat d'un échange de matière sous forme de grains entre le potentiel et l'électron [5]. Un même atome dans un solide peut de plus recevoir, à des époques différentes, de l'énergie provenant d'une même direction mais de sens opposés. Les solides stockent ainsi sur les atomes désordonnés une énergie thermique double de celle des gaz. Les atomes en position désordonnée forment en fait un gaz dont chaque atome tout en ayant un mouvement désordonné est bloqué dans son site par les atomes voisins. Les atomes ordonnés servent pour ce gaz de transmetteurs de l'énergie thermique. Ainsi l'atome en position désordonnée reçoit une énergie thermique dont la valeur moyenne est $3kT$. A l'inverse lorsqu'il retourne à l'état ordonné il doit perdre cette énergie thermique soit $3kT$ en valeur moyenne. Il le fait par émission d'un photon ayant en moyenne cette énergie. L'étude du corps noir permet de vérifier a posteriori cette analyse [16].

Considérons alors un solide à la température ambiante et l'absorption par ses atomes de photons de même énergie dans le domaine du visible. L'énergie qu'ils transportent est relativement élevée, nous supposons que l'absorption de cette énergie rompt certaines liaisons synchrones de l'atome absorbeur. Les atomes absorbeurs prennent de ce fait une orientation différente par rapport à leurs voisins ordonnés.

Par orientation différente nous entendons que l'atome n'est plus dans le système de liaisons qui donne au solide l'énergie minimum. Pendant la durée du stockage les atomes ayant absorbés un photon sont en nombre suffisant pour pouvoir interagir. Pour comprendre l'absorption il est utile de garder à l'esprit qu'elle est le phénomène inverse de l'émission. C'est deux phénomènes ne sont pas instantanés, ils ont lieu dans la durée. Les grains qui composent le photon quittent par suite l'atome émetteur progressivement, ce qui permet de supposer qu'avant l'émission ils sont répartis dans le volume de l'atome. Pendant l'absorption ils se répartiront donc de même dans le volume de l'atome absorbeur. Une fois absorbé l'énergie du photon, c'est à dire la quantité de grains correspondante, se partage sous forme de masse et d'énergie cinétique, principalement entre le noyau atomique et les électrons qui l'ont absorbé. Ce supplément de grains modifie la densité de grains de l'atome dans la direction de propagation du photon de telle sorte que les

variations de la quantité de mouvement des électrons qui gravitent dans ce voisinage en soient le reflet. Il en résulte une composante oscillatoire périodique du mouvement de l'atome. Ces variations sont obtenues par les flux entrant et sortant que nous avons considéré dans l'étude du mouvement de l'électron dans un potentiel central [5]. Pour l'électron, par flux entrant nous entendons les grains qui entrent dans le volume de l'électron et flux sortant ceux qui en sortent. A la composante oscillatoire du mouvement de l'atome sont associés un flux entrant et un autre sortant pour l'atome et pour chaque électron concerné.

En un point M de l'écran sur le quel sont observées les interférences les photons arrivent à des époques différentes qui sont de deux types : soient elles diffèrent d'un multiple n entier de périodes T , soient elles diffèrent de $(n+x)T$ si x est la fraction de l'interfrange correspondante au point M considéré. Par suite dans une même zone du lieu du phénomène, les atomes qui ont absorbés un photon se divisent en deux groupes correspondant à cette différence temporelle. Au moment initial de l'absorption les atomes sont ordonnés, le déphasage fait qu'ils se divisent en deux types et que juste après l'absorption leurs orientations par rapport au reste du solide sont de deux types. En particulier leur mouvement oscillatoire présente un déphasage. Ils sont par ailleurs dans une position qui n'est pas celle de l'état ordonné mais dans ce nouvel état il y a une position d'énergie minimum. Une fois le photon absorbé les atomes absorbeurs vont tendre vers cette nouvelle position. La compréhension des interférences est celle du mécanisme qui permet d'atteindre ce nouvel équilibre.

5 Le mécanisme

Considérons les atomes absorbeurs dans le voisinage d'un point M d'observation des interférences. Le désordre thermique et structural et leur mouvement oscillatoire les mettent dans deux situations possibles. En effet considérons les interactions résultant des mouvements oscillatoires des atomes voisins. Si ces interactions sont majoritairement en phase elles permettent à ces atomes de conserver un certain temps le supplément d'énergie que représente le photon, ces atomes tendent vers une position d'équilibre temporaire. Il y a lieu de supposer que c'est cette situation qui permet le stockage, l'absorption étant relativement stable les photons seront réémis par émission stimulée, plus ou moins longtemps après l'absorption. A l'inverse si ces interactions sont majoritairement en opposition de phase ces atomes sont dans une situation qui ne leurs permet pas de conserver le supplément d'énergie que représente le photon. L'énergie des photons absorbés sera dissipée sous forme de chaleur phénomène inverse de l'émission du corps noir ; elle peut

aussi être réémis spontanément dans un temps de l'ordre de grandeur de la période du mouvement des électrons. Les photons qui sont réémis par émission stimulée sont par suite beaucoup plus nombreux par unité de temps lors de l'émission. Les photons éventuellement réémis spontanément restent invisibles, ils sont trop peu nombreux par unité de temps. La luminosité des franges est donc liée à la proportion des atomes susceptibles de prendre une position d'équilibre temporaire.

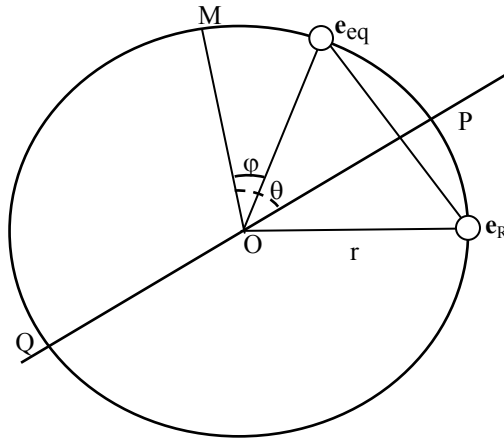


Figure 3. Le calcul de l'action lors du mouvement de l'atome absorber vers sa position d'équilibre transitoire

Soit alors sur l'atome absorber e_R la charge résultante des électrons ayant rompu leurs liaisons. Pour la charge e_R tout se passe comme si, à une distance angulaire φ à une époque t et à une distance radiale égale il y avait une charge e_{eq} en interaction avec elle (figure3). Cette charge e_{eq} est le reflet des deux types d'atomes absorbeurs juste après l'absorption. Elle est positive si la charge des noyaux est dominante les interactions sont majoritairement en phase. Dans ce cas les atomes absorbeurs tendent vers leur position d'équilibre temporaire, les photons seront réémis par émission stimulée. La charge e_{eq} est négative si la charge des électrons est dominante, les interactions sont majoritairement en opposition de phase. Dans ce cas les atomes absorbeurs tendent à tourner en sens opposé à la position d'équilibre temporaire, l'énergie du photon absorbé est alors dissipée sous forme de chaleur ou réémise spontanément. Lorsque les charges e_R et e_{eq} se rapprochent ou

s'écartent leurs mouvements engendrent une action mécanique. Il nous faut donc calculer l'action générée par le rapprochement ou l'éloignement pour déterminer les probabilités des photons de contribuer à la luminosité des franges.

Soit alors i l'interfrange et x la fraction de l'interfrange correspondant au point M considéré. En M l'angle de déphasage entre les deux types de charges e_R est $\theta = \pi x/i$ pour le déphasage initial et φ celui à une époque intermédiaire compté positivement lorsque e_R et e_{eq} se rapprochent. Pendant le temps dt l'angle φ varie de $d\varphi$. Si r est la distance entre l'électron et le centre O du potentiel, le déplacement de l'électron est $rd\varphi$, il s'est rapproché de la charge e_{eq} de $r \sin \varphi d\varphi$. De même si \vec{p} est la quantité de mouvement du photon, sa projection sur la direction $e_R - e_{eq}$ est $\vec{p} \cos \varphi$.

Soit A_{sti} l'action reçue par la charge e_R correspondant aux atomes qui génèrent l'émission stimulée. Une fois l'équilibre temporaire atteint, l'action reçue est $A_{sti} = \int \vec{p} dl$. Nous supposons que les mouvements transitoires vers la position d'équilibre temporaire sont répartis symétriquement par rapport à un plan. Ce plan coupe par suite le segment $e_R - e_{eq}$ en son milieu. La trace de ce plan sur la figure 3 est la droite PQ. Par suite l'action à calculer se répartie sur une demi période. Le mouvement des électrons est régi par l'action de la rotation propre qui reste toujours égale à h pendant la période orbitale [5]. De ce fait l'action à considérer ne dépend que de la différence des coordonnées angulaires, il vient :

$$A_{sti} = \frac{1}{2}h \int_0^{\theta} \cos \varphi \sin \varphi d\varphi = \frac{1}{2}h \cos^2 \theta \quad (1)$$

Soit A_{spo} l'action reçue par la charge e_R correspondant aux atomes avec lesquels l'énergie du photon se dissipe sous forme de chaleur ou qui génèrent l'émission spontanée. Pour ces atomes les charges e_R et e_{eq} s'écartent, l'angle φ est négatif et l'intégration est à effectuer entre $\pi - \theta$ égale dans ce cas à l'intégration entre 0 et $\pi - \theta$. Il vient:

$$A_{spo} = \frac{1}{2}h \int_0^{\pi-\theta} \cos \varphi \sin \varphi d\varphi = \frac{1}{2}h \sin^2 \theta \quad (2)$$

La somme des actions étant égale à $\frac{1}{2}h$ l'intensité lumineuse en un point de l'écran est proportionnelle à $\cos^2 \theta$. Nous retrouvons la loi de variation de l'intensité lumineuse le long de l'interfrange.

6 Conclusion

Il y a cent ans Einstein proposait l'hypothèse du photon pour expliquer l'effet photoélectrique. Il supposa que l'énergie du photon obéit à la relation $E = h\nu$ ce qui peut s'écrire $h = ET$. C'est cette relation qui impose que l'action engendrée sur une période par le mouvement de l'électron par rapport au proton soit justement h . C'est cette propriété, attachée à la rotation de l'électron, qui permet de calculer l'action sur une période et de comprendre les variations d'intensité lumineuse le long de l'interfrange.

Il y a environ quatre vingt ans, Louis de Broglie proposait pour l'électron l'existence d'une longueur d'onde λ donnée par la relation $h = p\lambda$ où p est la quantité de mouvement. Ces deux relations sont le reflet au travers de l'action mécanique du lien entre le temps et l'espace. Elles expriment pour le mouvement de l'électron par rapport au proton, que l'action mécanique sur une période est $h = p\lambda = ET$. C'est ce lien entre l'espace et le temps qui permet à l'atome et à ses électrons d'absorber le photon tout en conservant la même action et la même énergie. Cette conservation de l'énergie impose que la masse en mouvement soit une variable. Cette hypothèse suggérée par l'émission et l'absorption des photons relève également de la notion de relativité dont nous sommes redevable à Einstein. En effet la cause du mouvement dans le proton ou l'électron doit être la même, ce qui implique une masse variable comme nous l'avons discuté par ailleurs [5].

Ainsi si les interférences nous montrent une propriété periodique celle-ci est le reflet de la rotation des électrons des atomes et du lien $h = p\lambda = ET$ entre le temps, l'espace et l'énergie. Au bout du compte il faut bien reconnaître que les mystères de la nature ne se laissent pas facilement appréhender, et si c'est bien l'onde qui pilote l'électron elle doit nous inciter à la plus grande prudence.

Références

- [1] G. Groddeck, *Das Buch Vom Es* (1923), Le livre du ça, Traduit de l'allemand par L. Jumel, chapitre 6, page 90, tel gallimard, (2001).
- [2] A. Fresnel, Le premier mémoire date de 1815. La quasi intégralité de son œuvre a été publiée sous la direction de Messieurs Henri de Senarmont, Emile Verdet et Léonor Fresnel, par le Ministère de l'Instruction publique de 1866 à 1870.
- [3] I. Newton, *Optiks or a treatise of the reflection, refraction, inflection and colours of light* (1704), new edition based on the fourth edition London, 1730, Dover Publications. Version française: *Traté d'optique*, Reproduction fac-similé de l'édition de 1722, Gautier-Villard, (1955).
- [4] A. Einstein, *Ann. Phys.* 17, 367 (1905).

- [5] X. Oudet, Ann. Fond. Louis Broglie, **29**, 493-512, (2004).
- [6] G. I. Taylor, Proc. Cambridge Phil. Soc., **15** 14 -115 (1909).
- [7] A. J. Dempster and H. F. Batho, Phys. Rev. **30** 644-648 (1927).
- [8] G. Magyar and L. Mandel, **198** 255-256 (1963).
- [9] Morley S. Lipsett and L. Mandel, Nature, **199** 553-555 (1963).
- [10] Yu. P. Dontsov and A. I. Baz', Soviet Physics JEPT, **25** 1-5 (1967).
- [11] R. L. Pfleegor and L. Mandel, Phys. Rev., **159** 1084-1088 (1967).
- [12] R. L. Pfleegor and L. Mandel, J. Optical Soc. America, **58**, 946-950 (1968).
- [13] P.A.M. Dirac, "The principle of quantum mechanics" Oxford University Press chapter 1, page 9, (1958). Ainsi chaque photon interfère uniquement avec lui-même. Des interférences entre deux photons ne se produisent jamais.
- [14] D.A. Berkley and G.J. Volga, Phys. Rev. Letters, **9**, 479, (1962).
- [15] X. Oudet, Ann. Fond. Ann. Fondation Louis de Broglie, **26** 63-651, (2001) <http://www.ensmp.fr/aflb/AFLB-264/aflb264p639.htm> En français and in English.
- [16] Oudet X., "Le corps noir et la loi de Dulong et Petit." Annales de la Fondation Louis de Broglie, **29**, 733-745, (2004). <http://www.ensmp.fr/aflb/AFLB-294/aflb294m322.htm>, English version 30, 97-108, (2005) <http://www.ensmp.fr/aflb/AFLB-301/aflb301m322e.htm>.

Reçu le 27 janvier 2005, révisé le 5 décembre 2005