

La loi de Bragg, le continu et le discontinu

XAVIER OUDET

Fondation Louis de Broglie
23, rue Marsoulan, F-75012 Paris, France.
xavier-oudet@wanadoo.fr

RESUME. La découverte de la fonction d'onde associée à l'électron, par la richesse de ses applications, a conduit souvent à oblitérer l'aspect corpusculaire de particules comme le photon ou l'électron entre autres. Pourtant sur le plan de la réalité physique c'est le discontinu qui prime sur le continu, tout objet occupant un volume bien défini. Si l'onde nous permet une description de certains phénomènes, il y a lieu de l'associer à un flux de particules sans oublier de décrire l'aspect corpusculaire. Nous proposons une approche corpusculaire concernant la réflexion de Bragg.

ABSTRACT. The discovery of the wave function associated to the electron, due to the abundance of its applications, has often led to obliterate the corpuscular aspect of particles as the photon or the electron among others. But the prevailing aspect in the physical reality is the discontinuous, since each object occupies a certain volume. If the wave allows a description of several phenomena, one appropriately associates it to a flux of particles without to forget to describe the corpuscular aspect. We propose a corpuscular approach concerning the Bragg reflection.

1 Introduction

Jusqu'au début du vingtième siècle la masse d'un corps a été conçue comme invariable. Cette conception est liée à la notion d'inertie, c'est-à-dire à la résistance d'un corps à une variation de vitesse. L'inertie semble coïncider avec la masse du corps. Pourtant après avoir proposé en juin 1905 la théorie de la relativité restreinte [1] Einstein a montré, en septembre de la même année, que « si un corps subit une perte d'énergie L sous forme de radiation, sa masse diminue de L/c^2 » [2]. Il y a là une clef qui permet de

supposer que l'accélération peut se décrire comme un échange de masse sous forme de grains de matière de volume et de masse très inférieurs aux particules telles que l'électron et le proton. Cette approche a permis de compléter, en s'appuyant sur les propriétés magnétiques de différents corps, l'interprétation de l'atome hydrogénoïde du modèle corpusculaire [3]. L'accélération d'une particule devient ainsi un aspect de la relativité restreinte et l'espace qui permet de décrire nos observations se définit uniquement en présence de matière. Le mouvement d'un corps ne peut se décrire que par rapport à un autre et la notion de champ se décrit avec des flux de matière entre les corps étudiés. Cette approche souligne la difficulté à étudier les phénomènes à partir de l'aspect discontinu de la matière à côté de la notion d'espace continu, en particulier en optique avec la notion d'onde. A l'échelle macroscopique l'espace nous apparaît essentiellement continu, pourtant nous avons appris que le milieu cristallin est discontinu si bien que les notions de point, de droite et de surface lorsqu'il nous faut comprendre les phénomènes à l'échelle des atomes et des électrons sont insuffisantes, c'est le problème du continu et du discret récemment discuté par Bocvarski, Baudon et Reinhardt [4].

Quelle est alors la matière à considérer, par exemple, dans l'interaction de la lumière et d'un solide la réfléchissant ou la diffractant ? Faut-il considérer la lumière constituée de photons ayant une énergie et une quantité de mouvement toutes deux bien définies, dans des volumes limités ? Pour aborder cette question commençons par revenir sur le mouvement synchrone des électrons dans leurs états quantiques.

2 La liaison synchrone

L'étude de l'état quantique conduit à reconnaître l'existence d'un quantum d'action h qui impose à l'action du mouvement d'être un multiple entier de quanta sur une période du mouvement de chaque électron. Le tableau périodique donne une synthèse remarquable de cette propriété. En particulier il montre que chaque élément au travers d'un nombre important de ses propriétés garde la marque de l'état quantique correspondant à sa place. Cet état quantique est en particulier celui de l'électron additionnel de cet élément. Ce fait s'interprète en supposant que les interactions résultent d'échanges de masse sous forme de grains entre les atomes, c'est-à-dire entre le noyau et les électrons [3]. Ces échanges permettent ainsi de modifier la période et la trajectoire des électrons en interaction de manière à respecter le nombre de quanta de la trajectoire.

Considérons les atomes d'un même site cristallographique, c'est-à-dire dans un environnement spatial identique. A l'état solide, les électrons de

différents atomes, d'un même site et dans un même état quantique ont un mouvement synchronisé [5]. Considérons par exemple une trajectoire elliptique d'un atome d'hydrogène. 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. Dans cette chaîne soit deux atomes voisins A et B et sur chacun d'eux un électron dans un même état quantique e_A et e_B (figure 1). Pour simplifier la figure nous supposons leurs mouvements fermés et périodiques mais les raisonnements qui suivent restent valables avec des mouvements presque fermés.

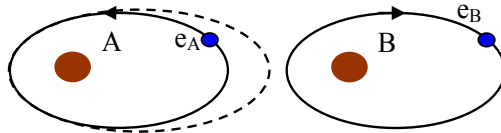


Figure 1. La contraction de la trajectoire avec l'interaction entre l'électron d'un atome A et la charge positive d'un atome voisin B. En tiret la trajectoire sans interaction, en trait plein celle avec interaction.

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.

Du fait de la cohésion, l'énergie de liaison de l'électron au noyau de son atome est plus élevée et la trajectoire se contracte comme l'indique la figure 1, ceci pour respecter le nombre de quanta de son état, c'est-à-dire la valeur constante de l'action le long de sa trajectoire. 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.

3 La réflexion et le photon

Considérons une surface métallique composée d'une seule espèce d'atomes éclairée par un faisceau de lumière monochromatique et cohérente dans le visible. Du fait de la faible énergie des photons, ceux-ci pénètrent peu le métal et seuls les atomes de la surface réfléchissent les photons du domaine du visible. Pour expliquer les interférences avec un très faible flux de photons nous avons supposé que chaque photon est absorbé durant un certain temps sur un atome entraînant la rupture des liaisons synchrones correspondantes, de telle sorte qu'après un certain temps ils sont en nombre suffisant pour interférer [6]. Cette hypothèse est à rapprocher du fait qu'il n'y a pas de cristal parfait et que la symétrie d'un site est une approximation, comme nous l'avons récemment souligné avec la violation des règles de sélection [7]. Par suite, pendant l'absorption, l'électron qui absorbe un photon peut modifier sa trajectoire. Il y a donc lieu dans le cas de la réflexion de reprendre cette hypothèse de l'absorption des photons. Pour mieux comprendre cette propriété il est utile de donner une description du photon.

Nous supposons le photon correspondre à un flux de grains se déplaçant à la vitesse c de la lumière, tout comme celles des grains dans les échanges entre proton et électron. Le flux de matière du photon est émis dans une direction précise durant le mouvement de l'électron autour du noyau ; notons que, du fait des interactions, ce flux provient de l'atome émetteur c'est-à-dire principalement d'un électron mais aussi du noyau et du voisinage atomique. Le photon ne possède pas de masse inerte mais la somme de ses grains possède une masse équivalente liée à son énergie par la relation $E = mc^2$. Pendant l'émission l'électron émetteur et le noyau de l'atome autour duquel il tourne perdent une quantité de mouvement donnée p qui est celle que transmettra le photon à l'électron et l'atome qui l'absorberont.

Les photons seront réémis, plus ou moins longtemps après l'absorption. Pour qu'un photon soit réémis en laissant l'électron dans un mouvement synchrone avec les autres électrons non absorbeurs des atomes voisins, il est nécessaire que les composantes orbitales de l'électron soient celles qu'il avait avant l'absorption. Ce processus peut avoir lieu si la composante de translation parallèle additionnelle communiquée par le photon à l'absorption peut être soustraite lors de l'émission. Ceci implique que le photon quitte l'électron avec un angle de réflexion égal à celui d'incidence. Ils donnent ainsi naissance au faisceau réfléchi d'où la loi de réflexion à partir de la notion de photons.

4 L'émission cohérente

Cette approche de la réflexion laisse de côté la capacité des photons à interférer. Pour comprendre cette propriété considérons les photons qui arrivent sur la surface, nous supposons qu'ils forment un faisceau cohérent c'est-à-dire qu'ils sont séparés dans le temps d'un nombre entier de fois la période T . Ayant été émis par des atomes différents, ils sont spatialement séparés, ce qui implique que tout plan qui coupe le faisceau de lumière est traversé par les photons en une multitude de petites surfaces distinctes. En arrivant sur la surface de réflexion ils sont stockés sur différents atomes voisins et, pour chaque atome, sur un électron dans un état quantique identique.

Durant l'absorption du photon l'électron e_A qui l'absorbe modifie sa trajectoire, diminue son énergie de liaison au noyau de son atome dont une partie sous forme de masse et change ses composantes de la quantité de mouvement. La trajectoire en l'absence du photon correspond au maximum d'énergie de liaison ; une fois le photon absorbé l'électron e_A est dans un nouvel état d'équilibre où les liaisons de l'atome avec son voisinage sont différentes et les atomes absorbeurs sont alors dans un site distinct de ceux qui n'ont pas absorbé de photon. La quantité de mouvement de l'électron absorbeur a une composante orbitale de rotation, une autre de translation parallèle à l'axe de rotation et une composante radiale. Par action et réaction les grains qui constituent la matière du photon modifient les composantes de la quantité de mouvement de l'électron dans la direction de propagation du photon. Les électrons ayant absorbé un photon ont une période différente mais tendent à avoir un mouvement synchrone entre eux, *il y a cohérence*. Ils confèrent à leur atome un caractère différent ce qui leur permet, tant qu'ils ne sont pas trop nombreux, d'ignorer leur voisinage. Ceci est possible pour les photons absorbés cohérents. En effet de tels photons arrivent tous séparés dans le temps par la même période ; par ailleurs les électrons absorbeurs dans leur site commencent l'absorption dans les mêmes conditions spatiales, la direction du faisceau restant la même.

Les photons réémis donnent ainsi naissance *une émission cohérente* ce qui permet de comprendre la cohérence des photons réfléchis lors de réflexion. En effet le grand nombre de photons absorbés n'est pas compatible à long terme avec l'état solide du métal et dès qu'un photon quitte l'atome absorbeur il entraîne un déséquilibre qui entraîne à son tour l'émission de toute une série de photons.

5 La loi de Bragg

La diffraction X est régie par la même loi de réflexion avec une condition restrictive du fait de la pénétration en profondeur des photons X. Considérons un faisceau de rayons X qui tombe sur un cristal *figure 2*. Les rayons X pénètrent dans le cristal. Chaque plan cristallin peut réfléchir le faisceau, les photons réfléchis par les différents plans seront réémis dans la même direction de réflexion si la distance temporelle qui sépare les plans considérés correspond à un nombre entier de fois la période. Les électrons ayant absorbé un photon ont alors entre eux un mouvement synchrone. Soit d la distance entre les plans passant par A et A_1 . Soit π_i et π_r les plans perpendiculaires aux rayons incidents et réfléchis. Le rayon réfléchi en A_1 , par rapport à celui réfléchi en A, parcourt un chemin supplémentaire qui est : $m A_1 + A_1 n$:

$$m A_1 + A_1 n = 2d \sin \theta \quad (1)$$

Le supplément de distance temporelle est :

$$\frac{2d \sin \theta}{c} = nT \quad (2)$$

Soit : $2d \sin \theta = n\lambda \quad (3)$

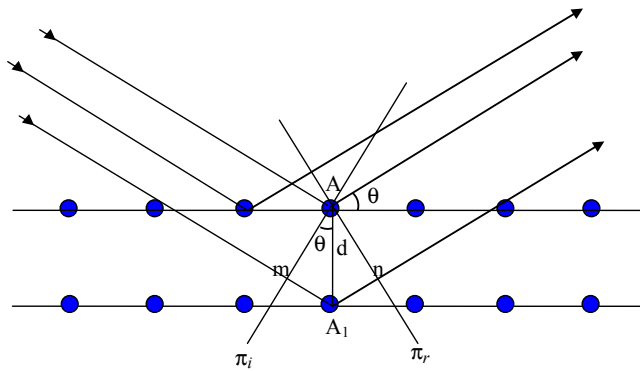


Figure 2. La loi de Bragg.

Ici encore les atomes absorbeurs deviennent différents par leurs liaisons avec le voisinage et les photons absorbés peuvent rester absorbés un certain temps. Les photons seront réémis par émission cohérente dans les directions obéissant à la loi de Bragg.

6 Conclusion

L'hypothèse de Louis de Broglie d'une onde associée à l'électron a conduit à la découverte des équations d'onde. Elle conduit à prolonger la notion de continu à l'échelle des interactions entre les constituants de l'atome. Le continu nous apparaît ainsi toujours intimement lié au discontinu. Mais il y a lieu de garder à l'esprit que le point est un objet mathématique qui n'a pas de volume, qui de ce fait n'a pas de réalité physique [7]. Le continu apparaît par suite une commodité mais il ne faut pas perdre de vue que la réalité matérielle reste le discontinu. Ce fut d'ailleurs en constatant que la lumière nous venait des atomes, donc émise par un ensemble fini d'atomes qu'Einstein fut amené à proposer l'hypothèse du Photon [8]. Revenons alors à la symétrie entre le mouvement d'un mobile et la propagation d'une onde qui conduisit de Broglie à associer une onde à l'électron [9], il est tout aussi possible d'associer un flux de particules matérielles à l'onde, par exemple de lumière, rejoignant ainsi l'hypothèse du photon d'Einstein. Par contre si le nombre des photons devient faible, alors le support du continu qu'est l'onde ne permet plus d'interpréter les interférences, il faut alors considérer le stockage des photons là où sont observées les interférences [6].

Références

- [1] Einstein A., Ann. der Physik, 17, 891-921, 1905.
- [2] Einstein, A., Ann. der Physik 18, 639-643, (1905).
- [3] Oudet X., Ann. Fondation Louis de Broglie, 36, 137-157, (2011).
- [4] Bocvarski V., J. Baudon et J. Reinhardt, Ann. Fondation Louis de Broglie, 35, 105-140, (2010).
- [5] Oudet X., Ann. Chim. 435-468, (2008).
- [6] Oudet X., Ann. Fondation Louis de Broglie, 30, 397-408, (2005) voir *page 403*.
- [7] Oudet X., Ann. Fondation Louis de Broglie, 37, 239-241, (2012).
- [8] Einstein A., Ann. der Physik, 17, 132-148, (1905). English version on [Wikipedia](http://fr.wikipedia.org/wiki/Photon-cite_ref-Einstein1905_2-3#cite_ref-Einstein1905_2-3). http://fr.wikipedia.org/wiki/Photon-cite_ref-Einstein1905_2-3#cite_ref-Einstein1905_2-3
- [9] De Broglie L., Thèse 1924, voir chapitre II.

(Manuscrit reçu le 24 avril 2012, modifié le 22 mai 2013)