

Jacques Vigué est directeur de recherche au laboratoire Collisions agrégats réactivité - Irsamc de l'université Paul-Sabatier et du CNRS à Toulouse. jacques.vigue@irsamc.ups-tlse.fr

Une expérience est réalisée soixante-dix ans après sa prédiction théorique

La lumière dévie bien les électrons

Jacques Vigué

La nature ondulatoire des particules élémentaires a été confirmée à la fin des années 1920 par la diffraction d'un faisceau électronique par des cristaux. Comme la lumière est aussi constituée de particules, des physiciens ont prévu dès 1933 que celles-ci pourraient diffracter des électrons. Ils n'ont observé ce phénomène qu'après de longs détours.

La comédienne s'avance vers le public, et ses cheveux flottants s'illuminent lorsqu'elle traverse le

Faisceau d'un projecteur : c'est la dif-

fraction des rayons lumineux par chaque cheveu qui est à l'origine de cet effet spectaculaire. Le même phénomène de diffraction de la lumière est l'une des principales sources de limitation des performances des instruments d'optique, par exemple du pouvoir de résolution des microscopes. Or, en 1933, Piotr Kapitza et Paul Dirac, tous deux à l'université de Cambridge, annoncèrent que, réciproquement, un faisceau de matière,

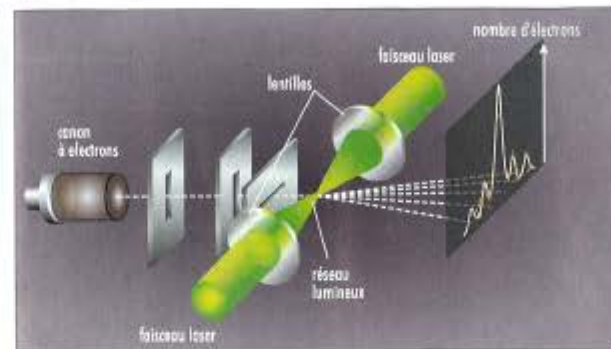
en l'occurrence d'électrons, pourrait être diffracté par un obstacle formé par une onde lumineuse⁽¹⁾. Cette proposition, qui se fondait en particulier sur l'équivalence entre particules et ondes énoncée neuf ans plus tôt par Louis de Broglie, a suscité un très grand intérêt, mais les efforts expérimentaux menés depuis près de soixante-dix ans viennent seulement de mettre en évidence de façon convaincante cet « effet Kapitza-Dirac »⁽²⁾.

Émission stimulée. Pour Kapitza et Dirac : « l'intérêt principal de cette expérience vient tout de la possibilité d'observer l'émission stimulée de la lumière » prévue par Albert Einstein dès 1905 mais qui n'avait jamais été confir-

mée expérimentalement. L'émission stimulée est le fait que, si on éclaire avec un faisceau lumineux des particules qui peuvent émettre de la lumière à la même longueur d'onde, cette émission se produit dans la direction du faisceau, amplifiant ce dernier. Ils proposèrent donc de diffracter un faisceau d'électrons par une onde lumineuse stationnaire, obtenue par la superposition de deux faisceaux lumineux identiques mais dirigés dans des sens opposés. Un électron peut donc, au passage, absorber un photon dans une onde ou dans l'autre, puis le réémettre par émission stimulée, aussi dans l'une de ces deux ondes. Si le photon est réémis dans le

même sens que celui qui a été absorbé, il emporte l'impulsion apportée par ce dernier, et l'électron n'est pas diffracté. Si le photon est réémis en sens contraire, l'impulsion de l'électron s'accroît de deux fois celle du photon qu'il a absorbé : l'électron est donc dévié de sa trajectoire initiale. Kapitza et Dirac avaient calculé que la probabilité de diffraction était proportionnelle au carré de l'intensité de la lumière, et inversement proportionnelle à la puissance quatrième de la fréquence : les électrons interagissent avec les photons de toutes les fréquences, mais d'autant plus que la fréquence est faible. Avec la lumière d'une lampe à arc au mercure, la

Le montage expérimental construit par Herman Batelaan et par son équipe à l'université du Nebraska permet de diffracter un faisceau électronique par une onde stationnaire lumineuse formée par deux faisceaux laser verts identiques qui se propagent en sens inverse. Les pics de diffraction primaires et secondaires observés de part et d'autre du faisceau principal (points rouges) correspondent aux prévisions théoriques (courbe blanche). © H. Batelaan



probabilité de diffraction des électrons est de 10^{-14} seulement. L'expérience était donc quasi infaisable, d'autant que, l'angle entre les faisceaux direct et diffracté étant seulement de 0,05 degré, le faisceau diffracté serait noyé dans le halo qui entoure le faisceau direct.

L'ironie du sort a fait que cette expérience conçue pour tester l'émission stimulée n'est devenue réalisable qu'avec la mise au point de lasers puissants, lasers dont le fonctionnement est justement fondé sur l'émission stimulée de lumière. La découverte du laser n'a cependant pas diminué l'intérêt pour l'effet Kapitza-Dirac. Au contraire, dans les années 1960, plusieurs expériences ont été tentées pour le mettre en évidence, avec des résultats contradictoires.

En 1967, M.V. Fedorov⁽³⁾, de l'Institut Lebedev à Moscou, reprend et complète le calcul de Kapitza et de Dirac, montrant que la probabilité de diffraction est une fonction oscillante de l'intensité du laser et qu'elle peut même s'annuler. De plus, aux fortes intensités, l'émission stimulée de photons peut se produire plusieurs fois durant le passage de l'électron dans l'onde stationnaire, ce qui fait apparaître une série de faisceaux diffractés, correspondant au transfert de 2, 4, 6... impulsions de photons. En 1975, H. Schwarz⁽⁴⁾, du

Rensselaer Polytechnic Institute, à Hartford, dans le Connecticut, présente des résultats expérimentaux convaincants sur l'intensité du premier faisceau diffracté et, en analysant les expériences antérieures, il montre que deux d'entre elles ont utilisé une intensité laser qui annule la probabilité de diffraction.

Devant les difficultés prévues par les théoriciens, seuls quelques expérimentateurs courageux ont persisté

Un deuxième article théorique de M.V. Fedorov⁽⁵⁾, en 1974, montre que d'autres effets peuvent réduire fortement l'efficacité de diffraction. A-t-il découragé les expérimentateurs les plus téméraires ? Toujours est-il que plusieurs articles de revue s'accordent pour considérer que l'effet Kapitza-Dirac n'a jamais été observé de manière certaine : aucune expérience n'a vraiment donné une vue très complète de cette diffraction (par exemple, aucune n'a observé l'ensemble des faisceaux diffractés) et la situation est confuse. Parallèlement, dès 1966, des théoriciens⁽⁶⁾ ont l'idée de généraliser l'effet Kapitza-Dirac. Ils font remarquer que les atomes, comme les électrons libres, peuvent absorber et réémettre un photon et

qu'ils devraient aussi être diffractés par une onde stationnaire lumineuse. De plus, cet effet doit être très intense, car les atomes réagissent fortement à une certaine fréquence de la lumière, différente pour chaque élément, qui est appelée fréquence de résonance atomique. La première observation détaillée de la diffraction d'atomes par la lumière sera faite en 1983, au Massachusetts Institute of Technology, par l'équipe de David Pritchard⁽⁷⁾. Ce phénomène est aujourd'hui un outil essentiel de l'optique et de l'interférométrie atomiques, domaine qui occupe plusieurs centaines de physiciens dans le monde et qui a été distingué par deux prix Nobel de physique, en 1997 et en 2001.

Première expérience. C'est justement sur la diffraction d'atomes par la lumière que Herman Batelaan a d'abord travaillé, avec Anton Zeilinger à l'université d'Innsbruck. En 1999, il a fondé à l'université du Nebraska, un groupe de recherche centré sur les fondements de la mécanique quantique, et l'observation de l'effet Kapitza-Dirac avec les électrons est sa première expérience. Le montage, aussi simple que soigné, utilise un faisceau d'électrons de basse énergie très fortement collimaté, qui traverse une onde stationnaire issue d'un



Piotr Kapitza (en haut) et Paul Dirac (à droite) n'ont écrit ensemble qu'un seul article, celui de 1933 sur la diffraction des électrons, ils ont reçu, séparément, le prix Nobel de physique pour d'autres travaux. © CERN/Science Photo Library/Corbis



- (1) D.L. Tederman et al., Nature, 43, 142, 2001.
- (2) P.E. Kapitza et P.A.M. Dirac, Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 28, 297, 1955.
- (3) M.V. Fedorov, Soviet Physics Usp., 25, 952, 1982.
- (4) H. Schwarz, Physics Letters, 44, 457, 1973.
- (5) M.V. Fedorov, Optics Communications, 12, 205, 1974.
- (6) S. Abdullatipov et al., Phys. Rev. Lett., 67, 251, 1991.
- (7) P.E. Moskowitz et al., Phys. Rev. Lett., 51, 570, 1983.

Pour en savoir plus :

- H.J. Metcalf et P. van der Straten, Laser Cooling and Trapping, Springer, 1999.
- H. Batelaan, Contemporary Physics, 41, 369, 2000.