

Des faisceaux lumineux qui ne diffractent pas

Jean-Philippe Bourgoïn
Étudiant en physique
Université de Moncton, Canada
© www.unregardscientifique.com

Lorsqu'une onde comme la lumière se propage dans un milieu quelconque, elle a tendance à se disperser dans toutes les directions. Ce phénomène, appelé *diffraction*, est une conséquence directe du principe d'incertitude d'Heisenberg¹. Selon ce principe, il est impossible de connaître exactement à la fois la direction de propagation d'une onde et sa position dans l'espace : le mieux on connaît l'un, le moins bien on connaîtra l'autre. Par exemple, lorsqu'une onde plane passe par une fente, nous avons connaissance de sa position avec une incertitude donnée par la largeur de la fente; ce fait impose une incertitude dans la direction de propagation de l'onde après la fente : l'onde va se diffracter et se propager dans un certain angle. Un autre exemple de diffraction est la divergence d'un faisceau laser. Aucun rayon laser n'est parfaitement collimaté et directionnel; il y a toujours divergence. Cette divergence vient du fait que le faisceau qui sort du laser est confiné à l'intérieur d'un certain diamètre (comme s'il sortait d'un trou). Cette connaissance de la position de l'onde impose une incertitude sur la direction et donc une divergence.

Ce phénomène cause des problèmes lorsque, par exemple, nous voulons envoyer un signal sur de longues distances sans perdre trop d'intensité. Il existe cependant des faisceaux qui ne semblent pas respecter ce phénomène. Ils ne se diffractent pas. Plus surprenant encore, certains d'entre eux subissent un type d'accélération sans l'influence d'aucune force externe.

Les premiers faisceaux connus qui ne se diffractent pas sont les ondes planes. Celles-ci couvrent tout l'espace; aucune restriction sur la position. Ainsi, leur direction de propagation est bien précise. Bien sûr, le simple fait qu'une onde plane est infinie signifie qu'elle a une énergie infinie et qu'elle ne peut pas exister en pratique. Nous pouvons toutefois créer des ondes planes non infinies, mais très grande, qui diffractent très peu. Malgré tout, les ondes planes sont peu intéressantes car elles sont uniformes partout. Récemment, des faisceaux de lumière sans diffraction possédant un pic central d'intensité ont été découverts; ils sont non uniformes et ainsi plus intéressants. Ces ondes ont d'abord été découvertes grâce à l'équation de Schrödinger. L'équation de Schrödinger est une équation d'importance primordiale en mécanique quantique; elle permet de décrire la fonction d'onde d'une particule. Étonnamment, des solutions de cette équation ayant la propriété de ne subir aucune diffraction ont été découvertes.

¹ Voir www.unregardscientifique.com/incertitude.pdf

Deux formes de solutions ont été découvertes : une est une fonction de Bessel et l'autre est une fonction d'Airy. Ces deux fonctions sont des fonctions oscillatoires dont l'amplitude diminue exponentiellement selon l'axe négatif de la position (voir figure 1). Avec la bonne phase, un faisceau se propageant selon cette solution posséderait une largeur et une énergie infinie (comme pour l'onde plane), mais il aurait un pic central bien défini. De plus, les faisceaux ayant la forme d'une fonction d'Airy possèdent la particularité de subir une accélération transverse, donc une accélération dans la direction perpendiculaire à la direction vers laquelle ils se propagent, sans avoir de forces externes appliquées sur eux. Leurs maximums d'intensité se déplacent sur une trajectoire parabolique. Ceci est possible car le 'centre de masse' d'une onde de largeur et d'énergie infinie n'est pas défini. En effet, on peut définir le centre de masse d'une onde (même si l'onde n'a pas de masse) comme étant le centre de la distribution d'énergie. Normalement, le centre de masse doit rester à la même position mais puisque celui-ci n'est pas défini, sa position n'a pas besoin de rester constante.

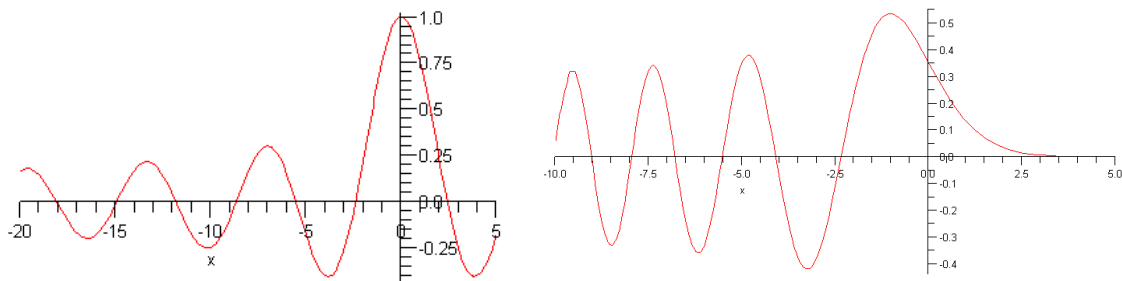


Figure 1 : Profils des fonctions de Bessel (à gauche) et d'Airy (à droite)

De nos jours, des faisceaux ayant ces propriétés ont été observés expérimentalement. Ceux-ci ne sont bien sûr pas parfaits et, par conséquent, la diffraction prend éventuellement le dessus. En effet, nous ne pouvons pas créer de telles ondes car nous ne possédons pas suffisamment d'espace ni d'énergie (rappelons-le, la largeur et l'énergie d'un faisceau parfait de ce genre est infinie). Cependant, il est possible de créer des faisceaux se comportant comme des faisceaux de Bessel ou d'Airy sur une distance relativement grande dans l'espace d'intérêt. Ceux-ci sont très peu diffractés et, dans le cas du faisceaux d'Airy, ils subissent une accélération sans force externe. Cette accélération est transverse au mouvement et courbe l'onde en une parabole. Nous pouvons voir ces propriétés à la figure 2 ci-dessous.

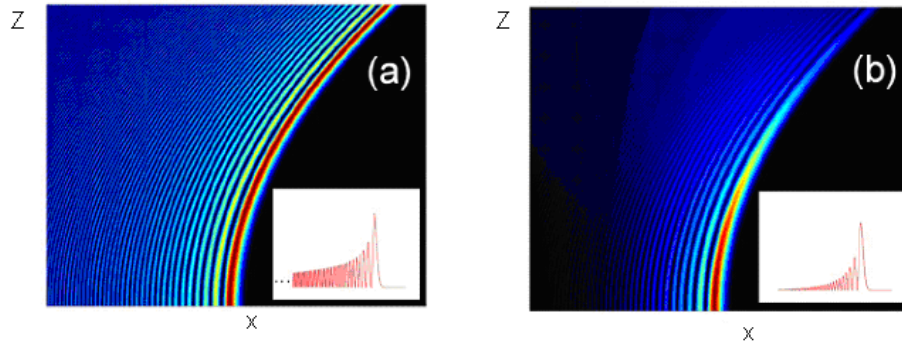


Figure 2 : Le graphique (a) représente des calculs de la propagation de l'onde si elle était une fonction d'Airy parfaite et le graphique (b) représente les données expérimentales. L'axe x est la position et z est l'axe de propagation. Finalement, la couleur représente l'intensité (les plus hautes intensités étant rouges et les plus basses étant bleues foncées).

Comme nous pouvons voir, l'onde est déplacée vers la droite durant la propagation. Elle fait donc une trajectoire parabolique comme un projectile qui serait accéléré par un champ gravitationnel. Il est bon de faire remarquer que l'onde expérimentale (qui n'est pas infinie) possède un centre de masse bien défini et que celui-ci ne se déplace pas. En fait, l'intensité du pic central diminue au profit des pics secondaires (les pics d'intensité autour du pic principal), alors que le centre de masse, qui correspond au centre de la distribution, demeure au même point. De plus, sur une onde parfaite, l'allure de la fonction ne changerait pas (donc, il n'y aurait pas de diffraction). Nous obtenons la même fonction avec des pics d'intensité séparés par des distances constantes, peu importe la distance de propagation (bien que les maximums soient déplacés et que l'intensité des pics change). Le profil de l'onde expérimentale change tout de même, mais beaucoup moins qu'une onde normale. Ce phénomène est représenté en deux dimensions à la figure 3.

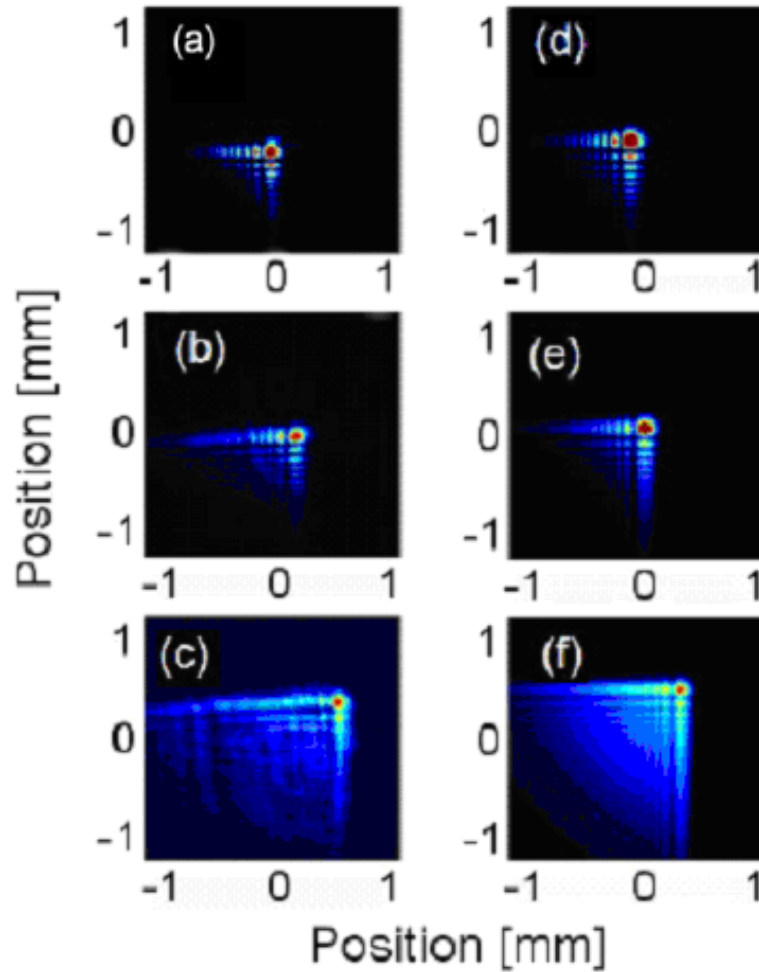


Figure 3 : distributions d'intensités d'un faisceau d'Airy en deux dimensions pour des déplacements de 0 cm (a et d), 10 cm (b et e) et 20 cm (c et f). Les courbes (a), (b) et (c) sont expérimentales, alors que les courbes (d), (e) et (f) sont théoriques.

Nous pouvons voir que les pics d'intensité restent présents peu importe la distance. Bien que les résultats expérimentaux ne soient pas parfaits, nous avons tout de même très peu de diffraction. De plus, l'onde se déplace à la fois vers la droite et vers le haut alors qu'il n'y a aucune 'force' appliquée sur elle. Si nous comparons le déplacement entre 0 cm et 10 cm avec le déplacement de 10 cm à 20 cm, nous remarquons que ce dernier est beaucoup plus grand, ce qui signifie une accélération et non un simple déplacement continu. Nous pouvons aussi voir grâce à cette figure l'énergie qui est transférée du pic central aux pics secondaires. Le centre de masse demeure ainsi au même point. À titre de comparaison, regardons la diffraction d'un faisceau gaussien, soit un faisceau dont la distribution d'intensité est une fonction gaussienne ordinaire (figure 4).

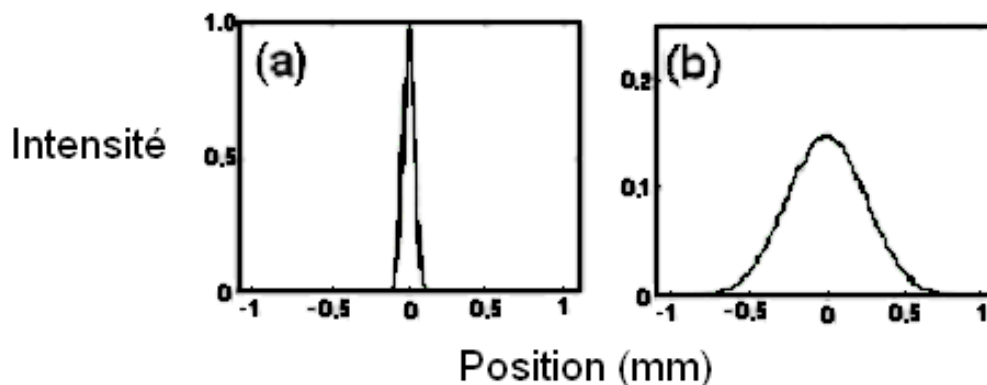


Figure 4 : Faisceau gaussien après un déplacement de 0 cm (a) et 25 cm (b).

Comme nous pouvons le voir, le pic initial d'environ 0,3 mm de diamètre s'est élargi considérablement à cause de la diffraction, pour finir avec un diamètre d'environ 1,2 mm. Ce phénomène cause une grande perte d'intensité si l'on tente d'envoyer un signal sur de longues distances. Il est bon de préciser que ces expériences ont toutes été faites dans le vide et il n'y a donc aucune influence des matériaux.

Des faisceaux qui se diffractent très peu permettraient de remédier à cette perte d'intensité et d'envoyer un signal sur de longues distances avec peu de perte d'énergie. Cela permettrait, par exemple, d'envoyer des signaux radio de façon beaucoup plus efficace et beaucoup moins coûteuse. Il permettrait aussi de focaliser presque parfaitement les faisceaux. En effet, le phénomène de diffraction empêche un faisceau d'être focalisé en un seul point car il diverge lors de la focalisation. Un faisceau mieux focalisé permettrait de concentrer une grande quantité d'énergie sur une petite surface. Bref, les ondes sans diffraction ont plusieurs applications possibles et présentent parfois des propriétés très bizarres et intéressantes.

Référence :

G. A. Siviloglou, J. Broky, A. Dogariu, et D. N. Christodoulides, "Observation of Accelerating Airy Beams", College of Optics/CREOL et University of Central Florida, 2007, Optics Letters.