

Communication présentée au colloque « La Lumière » - 27 novembre 2015

LES VITESSES FOLLES DE LA LUMIÈRE

Communication présentée au colloque « La Lumière » - 27 novembre 2015

Julien LAURAT¹

Laboratoire Kastler Brossel, UPMC-Sorbonne Universités, CNRS, ENS-PSL Research
University, Collège de France, 4 place Jussieu, 75005 Paris, France
et
Institut Universitaire de France, Paris, France

La vitesse de la lumière dans le vide, souvent notée c pour « célérité », est une constante universelle, égale par définition à 299.792.458 mètres par seconde. La lumière émise par le Soleil met ainsi quelques 8 minutes pour rejoindre la Terre alors que celle réfléchiée par la Lune éclaire nos nuits en un peu plus de 1 seconde. Dans un milieu matériel, la lumière se propage un peu moins vite : 1,3 fois moins vite dans l'eau et 1,5 fois moins vite dans un morceau de verre. Ce rapport est appelé indice de réfraction. Cette différence de vitesse explique par exemple les phénomènes de réfraction optique. Un bâton plongé dans l'eau semble ainsi cassé au niveau de la surface ! Il ne s'agit cependant que de petites variations de la vitesse.

Au cours des vingt dernières années, les chercheurs ont en effet montré qu'il était possible de contrôler beaucoup plus drastiquement la vitesse de propagation d'impulsions de lumière à travers certains milieux. Des vitesses très rapides ou très lentes ont ainsi pu être observées. En 1999, le groupe de Lene Hau à Harvard a ralenti la lumière traversant un nuage d'atomes ultra-froids². La vitesse mesurée était alors de 17 mètres par seconde (environ 60 kilomètres par heure). Une propagation donc presque 20 millions de fois plus lente que dans le vide ! De nombreuses expériences ont également montré des propagations plus rapides que dans le vide : le sommet d'un pulse de lumière peut ainsi sortir d'un milieu avant que le sommet du pulse incident n'y soit rentré.

Pour comprendre ces différentes situations, il faut distinguer plusieurs « vitesses » de la lumière, en particulier vitesse de phase et vitesse de groupe, deux notions importantes en physique ondulatoire. La vitesse de phase s'applique à une onde plane monochromatique. En

¹ Adresse pour le courrier électronique : julien.laurat@upmc.fr

² L. Hau *et al.*, *Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas*, Nature **397**, 594 (1999).

revanche, la propagation d'une impulsion de lumière nécessite d'introduire une vitesse dite de groupe car toutes les composantes spectrales de l'impulsion ne se propagent pas nécessairement à la même vitesse. La notion de *lumière lente* correspond ainsi à des vitesses de groupe plus petites que la vitesse de la lumière dans le vide alors que *la lumière rapide* correspond à des vitesses de groupe supérieures à cette vitesse ou des vitesses négatives. Au cours de cet exposé, j'expliquerai ces différents concepts et illustrerai les principes physiques sous-jacents.

Ralentir (ou accélérer) la lumière nécessite des milieux où l'indice de réfraction varie rapidement avec les composantes spectrales du pulse. Cela est par exemple possible dans un milieu atomique en utilisant le phénomène dit de *transparence induite électromagnétiquement*. À la résonance atomique, la lumière est absorbée et le milieu est donc opaque. Cependant, en contrôlant ce milieu avec une autre impulsion de lumière, dite faisceau de contrôle, les propriétés du milieu se modifient : il peut devenir totalement transparent ! Cette forte variation de l'absorption s'accompagne d'une forte diminution de la vitesse de groupe. Ce fut la méthode utilisée par l'équipe de Harvard en 1999.

Au-delà de son intérêt fondamental, ce contrôle de la vitesse de propagation est devenu un outil très important dans le domaine émergent de l'information quantique. Ce domaine de recherche cherche à tirer parti des bizarreries du monde quantique pour développer des méthodes de communication et de calcul inédites. Il a connu au cours des dix dernières années un foisonnement d'idées nouvelles.

On peut en effet tirer profit de ces effets de lumière lente pour réaliser des mémoires quantiques³ qui permettent à la lumière et à la matière d'échanger leurs états à la demande. Lorsque la lumière est ralentie dans un milieu atomique, l'impulsion se comprime spatialement jusqu'à être entièrement contenue dans le milieu. Il est alors possible de l'*arrêter* en éteignant le faisceau de contrôle : l'information qu'elle portait est intégralement transférée aux atomes, prête à être relue si le faisceau est rallumé.

Les premières expériences de lumière arrêtée furent réalisées en 2001 avec des impulsions laser contenant un grand nombre de photons. En 2005, deux groupes réussirent le tour de force de stocker un photon unique, en utilisant une vapeur atomique ou un nuage d'atomes froids. Dans la foulée, en 2008, le groupe de H.J. Kimble à Caltech démontra la première

³ J. Laurat et T. Chanelière, *La mémoire, pilier du réseau quantique*, La Recherche, numéro **501**, Juillet 2015.

mémoire permettant de stocker de l'intrication photonique et de la relire à la demande⁴. En envoyant un photon unique sur une lame semi-réfléchissante, un état intriqué est produit, le



Figure 1: Arrêter la lumière dans une fibre optique. Des atomes froids sont piégés au voisinage d'une fibre optique qui a été étirée dans une région de quelques centimètres. En arrivant dans cette zone, la lumière guidée est ralentie et l'information qu'elle porte est transférée aux atomes. Plus tard, à la demande, la lumière est réémise dans la fibre et peut se propager à nouveau. (Crédit : Julia Fraud / Labotatoire Kastler Brossel)

photon étant délocalisé entre les deux sorties de la lame, qui définissent deux chemins distincts. L'expérience a alors consisté à stocker simultanément ces deux modes dans deux mémoires distantes. Les deux mémoires sont alors à leur tour intriquées, et cette intrication atomique peut être convertie à nouveau en lumière intriquée en allumant le faisceau de contrôle. Le dispositif utilisé permettait également de stocker n'importe quel qubit, le 0 et le 1 logique correspondant aux deux chemins. Je discuterai de ces réalisations et de leurs utilisations pour de futurs réseaux de communication quantique⁵.

⁴ K.S. Choi *et al.*, *Mapping photonic entanglement into and out of quantum memory*, Nature **452**, 67 (2008).

⁵ H.J. Kimble, *The quantum internet*, Nature **453**, 1023 (2008).

Dans cette direction, mon équipe au Laboratoire Kastler Brossel a récemment réussi à intégrer une telle mémoire directement dans une fibre optique⁶ (figure 1). Pour cela, une fibre optique commerciale similaire à celles utilisées dans les réseaux de télécommunication a été étirée jusqu'à moins de 400 nanomètres de diamètre, et ce sur quelques centimètres. Nous avons ensuite refroidi des atomes de césium disposés à proximité de cette zone étirée. Lorsque la lumière atteint cette région, une grande partie de l'énergie circule autour de la fibre – on parle d'onde évanescente – et elle peut alors interagir avec les atomes environnants. En raison du fort confinement de la lumière, quelques milliers d'atomes suffisent ici pour obtenir de forts ralentissements, alors que des millions étaient nécessaires dans les expériences en espace libre. Une impulsion lumineuse a finalement été stoppée pendant plusieurs microsecondes puis émise de nouveau dans la fibre. Sans cet arrêt imposé, la lumière aurait parcouru dans le même temps plusieurs kilomètres !

Lumière lente, lumière rapide et même lumière arrêtée ! Les dernières années ont vu un développement rapide de protocoles variés reposant sur ces recherches. Ces protocoles témoignent d'un contrôle de plus en plus poussé de l'état quantique de la lumière et des systèmes atomiques, et de leurs interactions cohérentes. Les mémoires quantiques sont désormais une réalité et de nouveaux dispositifs voient peu à peu le jour permettant de contrôler la propagation de la lumière photon par photon. J'exposerai finalement quelques directions de ce domaine de recherche encore exploratoire où des photons même uniques peuvent fortement interagir.

⁶ B. Gouraud et al., *Demonstration of a memory for tightly guided light in an optical nanofiber*, Phys. Rev. Lett. **114**, 180503 (2015).