

Actualités

Physique théorique

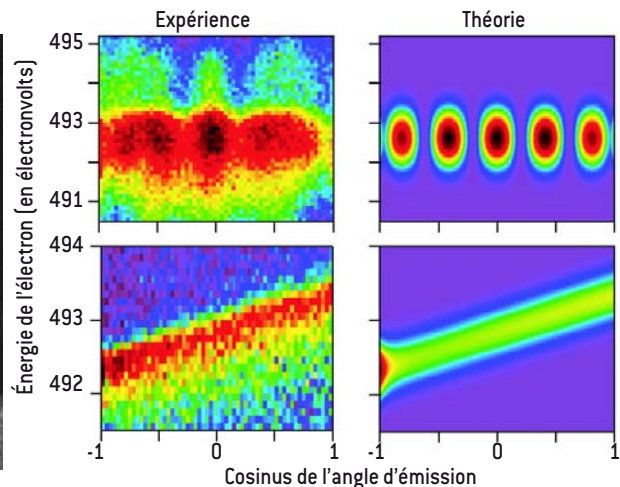
Un débat entre Bohr et Einstein enfin tranché

Une expérience de pensée d'Albert Einstein est devenue réalité au synchrotron Soleil.

Le père de la relativité voulait défier la mécanique quantique, mais le résultat lui donne tort...



Dans les années 1920, Niels Bohr et Albert Einstein ont confronté leur vision de la mécanique quantique à l'aide d'expériences de pensée. Catalin Miron et ses collègues ont conçu l'équivalent d'une de ces expériences – une version de l'expérience des fentes de Young



modifiée par Einstein – avec une molécule de dioxygène qui émet un électron. Si l'atome qui émet l'électron n'est pas identifiable, on obtient une figure d'interférence (*ci-dessus, en haut*). Dans le cas contraire, la figure d'interférence disparaît (*ci-dessus, en bas*).

Albert Einstein pensait que la mécanique quantique allait à l'encontre des principes de la physique. À partir de 1927, et durant plusieurs années, il a confronté son point de vue à celui du physicien danois Niels Bohr dans des discussions restées célèbres. Einstein a imaginé diverses expériences de pensée pour tenter de mettre en évidence des failles dans l'édifice de la physique quantique. L'un de ces tests imaginaires est une version améliorée de l'expérience classique des fentes de Young. À l'époque, les limitations techniques ne permettaient pas de la réaliser. C'est aujourd'hui chose faite. Catalin Miron, physicien au synchrotron *Soleil*, près de Paris, et son équipe ont réalisé une expérience analogue à celle imaginée par Einstein. Et le résultat lui donne tort!

L'une des notions les plus déroutantes de la mécanique

quantique est la dualité onde-corpuscule. Chaque objet quantique peut se comporter comme une onde et comme une particule. La lumière, par exemple, peut être vue comme une onde électromagnétique ou comme un flux de particules individualisées, les photons. En 1927, le physicien allemand Werner Heisenberg a proposé son principe d'incertitude, qui stipule qu'on ne peut connaître simultanément la position et la vitesse d'une particule avec une précision supérieure à un seuil limite. Pour Bohr, ce principe d'incertitude est la manifestation d'un principe plus fondamental, celui de complémentarité : un objet quantique ne peut se comporter simultanément comme une onde et comme un corpuscule.

Dans la version initiale de l'expérience de Young, on éclaire une plaque percée de deux fentes parallèles et proches. Une onde

lumineuse passe simultanément par les deux fentes et crée une figure d'interférence (une alternance de bandes claires et sombres) sur un écran placé derrière la plaque. Mais si on envoie les photons un par un, que se passe-t-il ? Sait-on par quelle fente passe chaque photon ? Si cette information n'est pas connue (en l'absence de détecteur sur les fentes), on observe que l'accumulation des photons sur l'écran crée aussi une figure d'interférence. En revanche, suivant le principe de complémentarité, si l'on place un détecteur sur une fente, ce qui permet de savoir par quel chemin le photon est passé, on n'obtient plus de figure d'interférence.

Einstein, qui n'était pas convaincu par la validité du principe de complémentarité, a essayé de le mettre en défaut en reprenant l'idée de l'expérience de Young. Quand une particule

passe par une fente, elle la touche et change de direction avant d'atteindre l'écran, transmettant aux bords de la fente un peu de sa quantité de mouvement.

Einstein proposa que l'une des fentes soit mobile et rattachée à un ressort. Ce dispositif ne mesure que la quantité de mouvement transférée. Cette mesure, selon Einstein, ne perturbe pas la particule lors de son passage, comme si le détecteur était absent. Einstein avança donc que la figure d'interférence serait toujours présente. Une telle mesure était cependant irréalisable avec les moyens techniques de l'époque.

Depuis, plusieurs équipes ont monté des expériences essayant de mettre en œuvre l'idée d'Einstein. En particulier, en 2001, l'équipe française de Serge Haroche a montré qu'il est possible de manipuler des systèmes à l'échelle de l'atome. Cela a ouvert la voie à

Écologie

Le devenir des déchets plastiques en mer

Plus de 5 000 milliards de débris plastiques flottent à la surface des océans, selon une récente étude internationale, soit plus de 260 000 tonnes. Ces chiffres ne correspondraient qu'à une infime part de la pollution plastique océanique. Éclairage de François Galgani, océanographe à l'Iframer, à Bastia, et coauteur de l'étude.

une mesure analogue à celle requise dans l'expérience d'Einstein.

C. Miron et ses collègues ont étudié un système qui est une réalisation fidèle, à l'échelle atomique, de l'idée de transfert de quantité de mouvement entre la particule et la fente suggérée par Einstein : des molécules de dioxygène (O_2) bombardées par des rayons X du synchrotron *Soleil*.

Quand un photon X frappe une molécule de dioxygène avec une énergie de 541,8 électronvolts, la molécule absorbe le photon et est excitée. En se désexcitant, elle émet un électron. Il est alors impossible de savoir lequel des deux atomes de la molécule a émis l'électron. La mesure de l'énergie de l'électron éjecté en fonction de l'angle d'émission présente des motifs d'interférence similaires à ceux de l'expérience des fentes de Young.

A contrario, lorsque l'énergie du photon X est de 539 électronvolts, la molécule se dissocie et l'un de ses deux atomes émet un électron, mais la mesure du recul de l'atome permet de déterminer duquel il s'agit. Cela revient à savoir par quelle fente la particule est passée dans l'expérience de Young. Or en faisant les mêmes mesures, on n'obtient plus d'interférences.

Ainsi, dans le cas où il est possible de déterminer la « voie de passage » par la mesure du recul (c'est-à-dire du transfert de quantité de mouvement), la figure d'interférence n'est plus visible, contrairement à ce que pensait Einstein. Le principe de complémentarité de Bohr est donc vérifié – une confirmation de plus de notre compréhension du monde quantique.

Sean Baillly

Xiao-Jing Liu et al., Nature Photonics, en ligne le 1^{er} décembre 2014

Qu'apporte votre étude par rapport aux précédentes ?

François Galgani : C'est une compilation de données issues de 24 expéditions entre 2007 et 2013 à travers les cinq gyres (tourbillons) océaniques subtropicaux, aux abords de l'Australie, dans la baie du Bengale et en Méditerranée. Avec ces données, nous avons validé un modèle de transport de surface des particules plastiques et montré que les accumulations correspondent aux prévisions du modèle. C'est la première étude d'une aussi grande envergure et effectuée en fonction de la taille des débris.

Comment a été construit le modèle utilisé ?

F. G. : On est parti d'un modèle de circulation développé par la Marine américaine dans les années 1970. Le modélisateur de l'étude, Laurent Lebreton, en a extrait la partie qui concerne la couche de surface – les quelques mètres de profondeur où flottent les débris plastiques – et l'a couplée à des outils de simulation du comportement de particules dans un fluide.

L'étude a détecté moins de microplastiques – inférieurs à 4,5 micromètres – qu'attendu. Pourquoi ?

F. G. : Plusieurs pistes sont possibles. Lucy Woodall, du Muséum britannique d'histoire naturelle, et ses collègues ont récemment proposé que des microparticules couleraient au fond de la mer. Cette

idée ne fait pas l'unanimité. La plupart des microplastiques ont une faible densité et on comprend mal comment ils sédimenteraient. Autre piste : les procellariiformes, oiseaux dont l'albatros fait partie, avalent des débris, alors stockés dans une poche de l'estomac. Une espèce en mer du Nord prélève ainsi quelques dizaines de tonnes de déchets par an. Mais cela n'explique pas tout. En fait, la seule explication convaincante est liée à la dégradation des débris. Plus les particules se



François Galgani est océanographe à l'Iframer.

fragmentent, plus le rapport surface sur poids des déchets est important. Cela augmente leur accessibilité à des bactéries qui contribuent à leur fragmentation en les digérant, ce qui accélère le processus.

Quel est l'impact des déchets plastiques marins ?

F. G. : La dégradation des microdéchets n'est pas dangereuse, car leurs constituants principaux, des polymères de propylène, éthylène, etc., sont inertes, et les quantités d'additifs toxiques libérés, infimes. Le danger chimique vient des macrodéchets, bien

plus importants en poids. Les microdéchets, plus nombreux, transportent des organismes sur de longues distances, déséquilibrant ainsi des écosystèmes ou disséminant des agents pathogènes. Après le tsunami de 2011, 120 espèces sont passées du Japon au Canada par ce biais. De plus, des espèces sont particulièrement sensibles aux déchets, et même le tourisme, la santé humaine (blessures), la pêche et la navigation sont touchés.

Observe-t-on les mêmes effets en Méditerranée ?

F. G. : En pire ! Les déchets ne peuvent pas en sortir. À Gibraltar, les eaux sont entrantes en surface et sortantes en profondeur. Or les déchets sont en surface... Des collègues slovénes ont mesuré jusqu'à cinq millions de microplastiques par kilomètre carré.

Que faire pour enrayer cette pollution ?

F. G. : C'est l'objet de la conférence internationale organisée à Monaco en mars prochain, mais déjà une directive européenne pour réduire les déchets est prévue et des gouvernements l'ont anticipée. En France, les sacs plastiques seront interdits dès 2016. L'industrie propose de favoriser le recyclage. Enfin, l'éducation jouera un rôle important : la plupart des déchets en mer sont issus de la grande consommation...

Marie-Neige Cordonnier

M. Eriksen et al., PLoS One, 2014