

Figure 1 : De gauche à droite, Pierre Agostini, Ferenc Krausz et Anne L'Huillier. Source : Académie Royale de Suède.

Le prix Nobel de physique 2023 : comment sonder la matière au moyen d'impulsions laser attosecondes ?

Marc Leconte

Membre émérite SEE

Sonder la matière par laser

Le jury Nobel a choisi cette année de récompenser les développements de techniques d'observation des particules de la matière par interaction avec des impulsions laser ultra courtes. Dans les molécules, les atomes se déplacent à des vitesses qui font intervenir des échelles de temps de l'ordre de la femtoseconde (10^{-15} seconde). Pour les électrons des atomes, l'échelle de temps est encore plus petite et se situe dans la gamme des

Le prix Nobel de physique récompense cette année le travail pionnier de physiciens qui ont réussi à suivre le mouvement des électrons en produisant des impulsions lumineuses extrêmement rapides. Le prix a été attribué à parts égales à Pierre Agostini de l'Ohio State University, Ferenc Krausz de l'Institut Max Planck d'optique quantique en Allemagne et Anne L'Huillier de l'Université de Lund en Suède (figure 1).

attosecondes (10^{-18} seconde). Dans les années 80, la femtoseconde représentait une limite technologique indépassable et il semblait nécessaire de recourir à une nouvelle technologie pour atteindre l'attoseconde. Ces recherches se sont déroulées sur une période de plusieurs dizaines d'années.

Produire par laser des harmoniques de la lumière

En 1987, Anne L'Huillier développait avec son équipe une méthode d'observation

basée sur la génération par laser d'un ensemble d'ondes dont les fréquences sont des multiples de la fréquence laser d'entrée. Un train d'impulsions laser peut être comparé à une lumière stroboscopique qui permet d'isoler le mouvement d'un objet à un moment précis. Les chercheurs utilisaient depuis longtemps des impulsions femtosecondes (10^{-15} s) pour capturer le mouvement des atomes lors de réactions chimiques. La création de ces impulsions nécessitait la combinaison d'ondes avec une grande bande passante, et leurs interférences

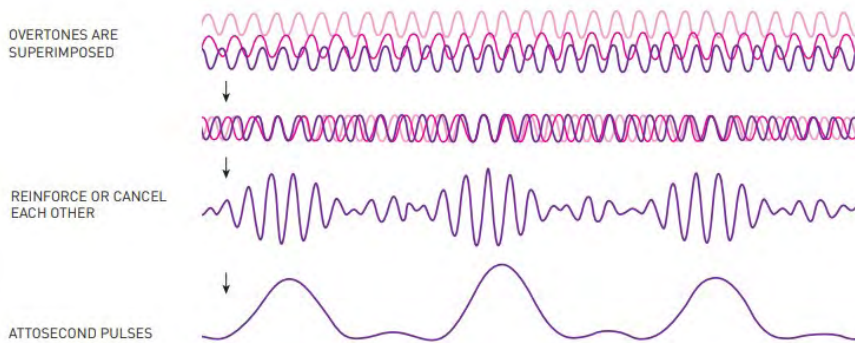


Figure 2 : Schéma de la composition des harmoniques du laser pour produire des impulsions ultra-courtes (Source : Académie Royale de Suède).

produisaient une énergie concentrée dans une petite fenêtre de temps (figure 2). Il semblait possible de réduire cette fenêtre à l'échelle de temps attoseconde pour suivre le mouvement des électrons, mais cette réduction demandait une plus grande bande passante et nécessitait, de ce fait, un saut technologique.

Principe de la génération des impulsions laser

Lorsqu'un faisceau laser de grande puissance est envoyé sur un gaz d'atomes, la lumière sortante est un mélange de différentes ondes ayant des fréquences multiples de la fréquence du laser. L'apparition de tels harmoniques est habituelle mais les harmoniques produits par le laser sont particuliers car les modes ne s'éteignent pas à mesure que la fréquence augmente et présentent un plateau d'intensité constante (figure 3) qui s'étend jusqu'à des harmoniques très élevés avant d'atteindre une fréquence de coupure dans la gamme des ultraviolets extrêmes (UV). La compréhension de ce plateau à large bande passante et d'autres caractéristiques de la génération d'harmoniques élevés a été une étape clé pour réaliser des impulsions en attosecondes.

En 1994 en s'appuyant sur des modèles précédents, Anne L'Huillier et ses collègues étudiaient un modèle quantique complet de génération d'harmoniques élevés. L'image de base était un processus en trois étapes qui commençait

par le champ laser intense déformant le champ électrique à l'intérieur de l'atome, ce qui permettait à un électron de sortir par effet tunnel. Cet électron libéré était ensuite accéléré à haute énergie par le champ laser puis récupéré par l'atome en lui cédant toute l'énergie qu'il avait gagnée dans le processus (figure 4). L'énergie libérée apparaissait alors sous la forme de modes harmoniques qui dépendaient des trajectoires quantifiées des électrons libérés.

En 1996, Anne L'Huillier et son équipe montrait théoriquement que les atomes émettaient une lumière dont la phase était maîtrisée, ce qui conduisait à une synchronisation de leur production. Des expériences ultérieures exploitaient cette cohérence pour montrer que le

comportement des harmoniques individuels pouvait durer des dizaines de femtosecondes. Ainsi à la fin des années 1990, tous les signes indiquaient la présence d'impulsions attosecondes dans la lumière générée par des harmoniques élevés, mais la détection de ces impulsions UV extrêmes posait un problème. À l'époque, la plupart des techniques de caractérisation des impulsions n'étaient pas adaptées à ces hautes fréquences, le verre et autres équipements optiques absorbant rapidement la lumière UV. Il existait des trains d'impulsions attosecondes, il fallait les mettre en évidence expérimentalement, ce qu'ont réalisé séparément Pierre Agostini et Ferenc Krausz dans leurs travaux.

Mise en évidence des attosecondes

Agostini et ses collègues ont mis au point une technique, appelée RABBIT, qui concentrait la lumière à harmonique élevé dans une cible de gaz, où elle se combine avec la lumière du laser de commande initial. Les atomes présents dans le gaz réagissent à la lumière injectée en éjectant des électrons, ce que les chercheurs ont pu détecter. Les temps d'arrivée des électrons ont montré que la lumière à harmonique élevé de l'équipe consistait en un train d'impulsions de 250 attosecondes.

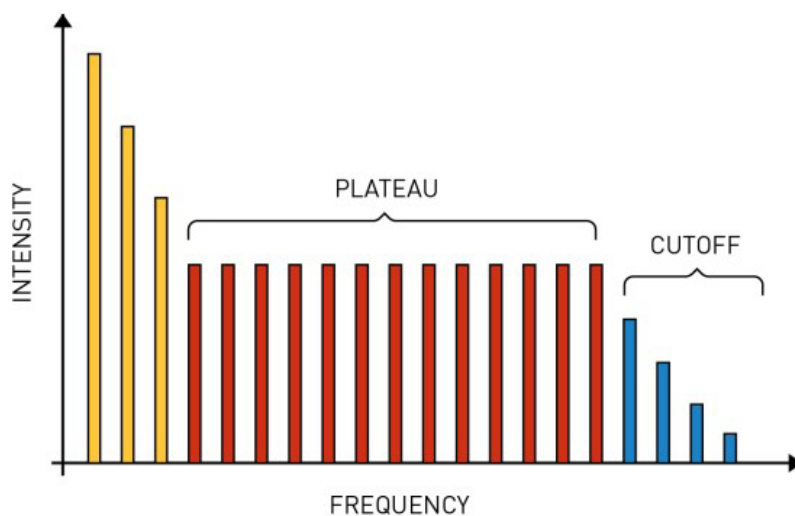


Figure 3 : Graphe de l'intensité des harmoniques du laser et le plateau qui s'étend jusque dans les ultraviolets. (Source : Académie Royale de Suède).

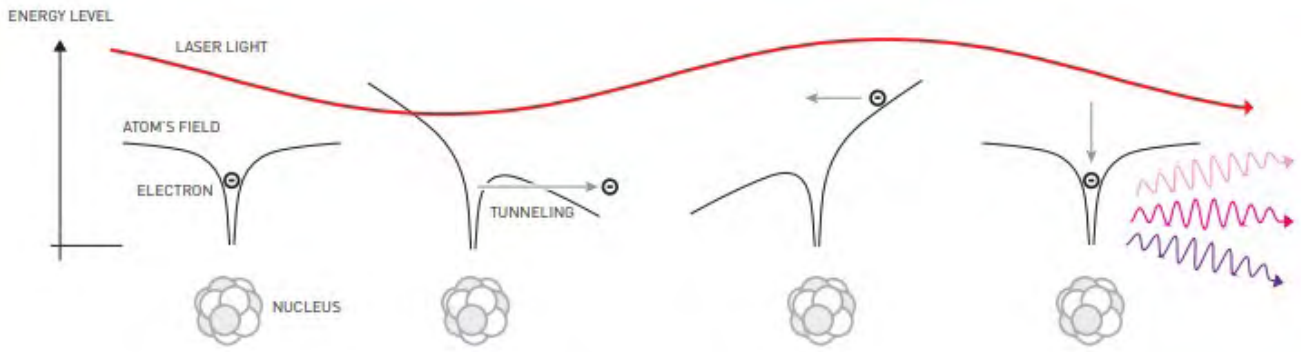


Figure 4 : Interaction laser gaz avec l'électron lié (1) traversant la barrière de potentiel par effet tunnel (2) puis gagnant de l'énergie par le laser (3) et enfin retombant dans l'état d'énergie fondamentale en émettant des photons (4).

●●● Ferenc Krausz et ses collègues ont développé une stratégie différente dans laquelle ils ont réglé leur système de manière à ce qu'une seule impulsion soit créée dans leur processus de génération d'harmoniques élevés et ils ont confirmé la présence d'impulsions de 650 attosecondes dans leurs expériences.

Premières applications

Une fois les impulsions attosecondes définitivement mesurées, il était possible de les utiliser. L'une des premières applications a été l'étude de l'effet photoélectrique, c'est-à-dire la production d'électrons libres lorsqu'un matériau est exposé à une lumière de fréquence suffisamment élevée. Grâce aux impulsions attosecondes, les chercheurs ont pu chronométrer précisément le temps nécessaire pour libérer un électron d'un matériau.

Ce qui est mesuré dans cette expérience c'est l'évolution de la fonction d'onde de l'électron et du noyau qui donne une description complète du comportement du système quantique. Des développements ultérieurs ont permis aux chercheurs en attosecondes de suivre les électrons lors de leur migration autour d'un atome ou d'une molécule au cours de réactions chimiques. Le laboratoire AttoLab du plateau de Saclay inauguré en 2017 est spécialisé dans l'étude et le contrôle de la matière à l'échelle de l'attoseconde. Ce laboratoire est donc le

“ Il n’y a plus, depuis plusieurs décennies, de découvertes de nouveaux modèles de la physique. Aussi ces dernières années, le Nobel de physique récompense des travaux pionniers qui concernent l’expérimentation de la connaissance de la matière à son niveau le plus élémentaire. ”

témoin et l'héritier des premiers travaux d'Anne l'Huillier et de Pierre Agostini.

Des chercheurs français partis à l'étranger !

Anne l'Huillier a étudié à l'École normale supérieure de Fontenay aux Roses. Puis elle est entrée au CEA en 1981 pour faire sa thèse de doctorat qui est obtenue en 1986 en Sciences physiques par l'université Pierre et Marie Curie à Paris. Elle est recrutée par le CEA juste après. En 1995, Anne l'Huillier s'installe à l'université de Lund en Suède bien que le CEA tente de la retenir. Sa carrière est ensuite marquée par plusieurs prix dont le prix Wolff en 2022 puis le prix Nobel en 2023. Anne l'Huillier est la cinquième femme lauréate du prix Nobel de physique.

Pierre Agostini titulaire d'un doctorat en physique de l'université d'Aix Marseille en 1968, était chercheur au CEA au laboratoire d'optique à Palaiseau quand il

a réussi à produire des impulsions attosecondes au début des années 2000. Mais il est mis à la retraite peu après par le CEA et il décide alors de partir travailler aux Etats-Unis. Il est aujourd'hui professeur émérite aux Etats-Unis à l'université de l'Ohio.

Conclusion

Comment qualifier le domaine de ce prix Nobel ? Il n'y a plus, depuis plusieurs décennies, de découvertes de nouveaux modèles de la physique. Aussi ces dernières années, le Nobel de physique récompense des travaux pionniers qui concernent l'expérimentation de la connaissance de la matière à son niveau le plus élémentaire.

Ce ne sont pas des applications grand public mais la mise au point d'outils d'observation qui permettront de mieux connaître les phénomènes quantiques au niveau des constituants les plus élémentaires. ■