

## **PRIX NOBEL DE PHYSIQUE 2023 deux français honorés !**

Après Alain Aspect en 2022, quelle fierté de voir Anne L'Huillier et Pierre Agostini recevoir le Prix Nobel de Physique.

En 2023, c'est un trio de chercheurs, les deux Français Anne L'Huillier et Pierre Agostini, ainsi que l'Autrichien Ferenc Krausz, qui a décroché ce prix décerné pour des travaux portant sur « *les méthodes expérimentales qui génèrent des impulsions lumineuses attosecondes pour l'étude de la dynamique des électrons dans la matière* », selon le site officiel de l'Académie suédoise.

### **Première caractérisation d'un train d'impulsions laser attosecondes**

Pour atteindre l'attoseconde (as), l'ionisation multi-couleur doit être contrôlée bien plus finement. C'est à partir d'une étude théorique de physiciens de l'Université Sorbonne en 1996, montrant que l'intensité des bandes latérales est modulée à l'échelle du cycle optique en fonction du retard entre les deux faisceaux XUV et IR, que Pierre Agostini et ses collaborateurs proposent leur méthode, aujourd'hui dénommée « Rabbit », avec laquelle ils parviennent à obtenir en 2001 la première caractérisation expérimentale d'un train d'impulsions laser de 250 as. Un exploit qu'il renouvelle en 2003 à Saclay avec un train d'impulsions encore plus court, de 130 as.

La métrologie attoseconde eut un retentissement immédiat car elle ouvrait la voie d'une part à l'optimisation de l'émission attoseconde et, d'autre part, à ses applications. Parmi ces dernières, le comité Nobel a souligné l'avance conceptuelle que constitue l'étude de l'effet photoélectrique en temps réel (processus qu'Einstein avait théorisé en 1905 par l'absorption d'un quantum de lumière (le photon) et l'émission quasi-simultanée d'un électron) ; effet que les chercheurs de l'Iramis sont aujourd'hui capables de filmer !!!

### **Première caractérisation d'un train d'impulsions laser attosecondes**

Auparavant, les scientifiques pouvaient étudier le mouvement de noyaux atomiques plus lourds et plus lents à l'aide d'impulsions lumineuses d'une femtoseconde, soit  $10^{-15}$  secondes : mille attosecondes sont comprises dans une femtoseconde. Mais les chercheurs ne pouvaient pas voir les mouvements à l'échelle de l'électron avant de réussir à générer des impulsions lumineuses de l'ordre de l'attoseconde, car les électrons se déplacent trop rapidement pour

que l'on puisse déterminer exactement ce qu'ils font à l'échelle de la femtoseconde.

### Impulsions attosecondes

Le réarrangement des électrons dans les atomes et les molécules guide de nombreux processus en physique et sous-tend pratiquement tous les aspects de la chimie, ce qui explique pourquoi les chercheurs ont déployé tant d'efforts pour comprendre comment les électrons se déplacent et se réarrangent.

Les scientifiques utilisent la spectroscopie pour étudier ces processus physiques et chimiques, une méthode qui consiste à examiner comment la matière absorbe ou émet de la lumière. Mais comme les électrons se déplacent très rapidement, il faut être expérimentalement particulièrement rusé pour les étudier en détail, de façon « résolue » dans le temps. En gros, pour suivre les électrons en temps réel, il faut une impulsion lumineuse plus courte que le temps nécessaire aux électrons pour se réarranger.

Par analogie, imaginons un appareil photo qui ne pourrait prendre que des poses longues, d'une durée d'environ une seconde. Les choses en mouvement, comme une personne courant vers l'appareil photo ou un oiseau volant dans le ciel, apparaîtraient floues, et il serait difficile de voir exactement ce qui se passe.

Imaginez ensuite que vous utilisiez un appareil photo avec une exposition d'une milliseconde. Les mouvements qui étaient auparavant flous seraient alors résolus en des clichés clairs et précis...

Voilà comment l'échelle de l'attoseconde, plutôt que celle de la femtoseconde, peut éclairer le comportement des électrons.

Trois chercheurs ont donc reçu le prix Nobel de physique 2023 pour des travaux qui ont révolutionné la façon dont les scientifiques étudient l'électron, en illuminant des molécules avec des éclairs de lumière d'une durée d'une attoseconde. Mais combien de temps au juste dure une attoseconde ? En quoi ces impulsions infiniment courtes aident-elles les chercheurs à explorer la nature de la matière ?

Pour comprendre pourquoi ces recherches autour de l'attoseconde méritent cette prestigieuse récompense scientifique, il faut comprendre ce qu'est une impulsion lumineuse attoseconde.

Combien de temps dure une attoseconde ?

« Atto » est le préfixe de notation scientifique qui représente  $10^{-18}$ , c'est-à-dire un point décimal suivi de 17 zéros et d'un 1. Un éclair de lumière d'une durée d'une attoseconde, soit 0,000000000000000001 d'une seconde, est donc une impulsion lumineuse extrêmement brève.

Pour atteindre l'attoseconde (as), l'ionisation multi-couleur doit être contrôlée bien plus finement. C'est à partir d'une étude théorique de physiciens de l'Université Sorbonne en 1996, montrant que l'intensité des bandes latérales est modulée à l'échelle du cycle optique en fonction du retard entre les deux faisceaux XUV et IR, que Pierre Agostini et ses collaborateurs proposent leur méthode, aujourd'hui dénommée « Rabbit », avec laquelle ils parviennent à obtenir en 2001 la première caractérisation expérimentale d'un train d'impulsions laser de 250 as. Un exploit qu'il renouvelle en 2003 à Saclay avec un train d'impulsions encore plus court, de 130 as.



**Anne L'Huillier**

**Pierre Agostini**

### **Anne L'Huillier**

Anne L'Huillier a 65 ans, elle est née à Paris. Elle est sortie diplômée de l'Université Pierre et Marie Curie en 1986, puis a travaillé au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) et enseigne désormais en Suède, à l'Université de Lund. C'est devant ses étudiants qu'elle a appris qu'elle recevait le Prix. "*Même le Prix Nobel de physique 2023 ne peut pas arracher Anne L'Huillier à ses étudiants*", s'amuse l'Académie sur "X" (anciennement Twitter).

Après le coup de téléphone lui annonçant la nouvelle, *"elle est retournée faire cours devant ses élèves"*.

Avant Anne L'Huillier, quatre femmes seulement ont obtenu le prix Nobel de physique depuis sa création en 1901 : Marie Curie (1903), Maria Goeppert Mayer (1963), Donna Strickland (2018) et Andrea Ghez (2020). *"Je suis très touchée, il n'y a pas tant de femmes qui ont obtenu le prix, donc c'est très très spécial"*, a réagi la lauréate de cette année. La physicienne a encouragé les femmes à se lancer dans une carrière scientifique : *"Allez-y"*, a-t-elle dit lors d'une conférence de presse à Lund.

Au cours de sa carrière, elle a notamment découvert en 1987 qu'en éclairant un gaz noble avec un laser infrarouge, des "harmoniques" de cette lumière apparaissaient sous forme de flash, chacune avec un cycle différent. *"Dans mon travail, je vois deux choses fondamentales. L'une est d'observer les électrons et leurs propriétés. L'autre est beaucoup plus pratique : la radiation que nous produisons est aussi utile pour l'industrie des semi-conducteurs que pour l'imagerie. Donc il y a vraiment une application pratique"*, a-t-elle expliqué.

La chercheuse franco-suédoise figurait parmi les favorites de cette année pour le Prix de physique car elle avait remporté le prestigieux prix Wolf en 2022, parfois précurseur du Nobel, conjointement avec Ferenc Krausz, 61 ans, et le Canadien Paul Corkum.

## **Pierre Agostini**

Pierre Agostini a soutenu sa thèse à l'université Aix-Marseille en 1968.

La même année, il rejoint le CEA à Saclay (dans le laboratoire qui allait devenir le Spas, le Spam puis le Lidyl du CEA-Iramis). Là, il effectue une brillante carrière scientifique jusqu'à son départ en retraite en 2002, demeurant conseiller Scientifique jusqu'en 2004. Par ses études pionnières de l'ionisation atomique en champ laser intense, il a forgé les outils de la métrologie attoseconde permettant de mesurer les flashes de lumière les plus brefs jamais produits, et ainsi de valider expérimentalement les observations d'Anne L'Huillier, co-lauréate avec Ferenc Krausz du prix Nobel de physique 2023.

Dès 1968, Pierre Agostini étudie le processus d'ionisation multiphotonique de gaz atomiques induite par un laser infrarouge intense. En 1979, il observe pour la première fois l'ionisation *« au-dessus du seuil »*, c'est-à-dire la possibilité pour un atome d'absorber plus de photons laser que nécessaire pour franchir ce seuil d'ionisation. A partir de 1994, il effectue une série d'études sur l'ionisation

induite par une source harmonique XUV superposée à une fraction du champ laser intense excitateur infrarouge (IR). Il observe en particulier des transitions induites au sein du continuum, caractérisées par l'apparition de bandes latérales dans le spectre des électrons émis à l'échelle de la femtoseconde ; ce dont il tirera profit pour mesurer la durée des impulsions harmoniques avec la précision nécessaire.

Pierre Agostini, après avoir exercé plusieurs postes de chercheur invité dans de grands laboratoires européens et américains, devient en 2005 Professeur de physique à l'université d'état de l'Ohio à Columbus (Etats-Unis) puis en 2018 Professeur émérite. Il est honoré de plusieurs distinctions internationales, telles que le Joop Los Award de l'Institut FOM des Pays-Bas et le William F. Meggers Award de l'Optical Society of America en 2007. En 2013, la communauté scientifique a rendu hommage à ses travaux lors du symposium Sympa, en ouverture de la conférence internationale Atto.

### **Ferenc Krausz**

Né en Hongrie, Ferenc Krausz obtint son doctorat en 1991 à l'Université technique de Vienne où il poursuivit ses travaux de recherche sur les impulsions de laser courtes au sein de l'Université technique de Vienne (TU Wien) en tant que professeur, puis directeur du Centre for Advanced Light Sources. Depuis 2003, il est le directeur de l'Institut Max-Planck d'optique quantique. En 2004, il devient également professeur et titulaire de la Chaire en physique expérimentale à l'Université de Munich Ludwig Maximilian.



***Ferenc Krausz***

Il a pu générer des flashes de lumière attoseconde extrêmement courts qui ont permis pour la première fois de visualiser les mouvements ultra-rapides des électrons et d'en comprendre les mécanismes.

La méthode pour laquelle le chercheur Ferenc Krausz a obtenu le Prix Nobel peut être comparée à une caméra rapide qui éclaire les éléments les plus petits qui composent la nature : du mouvement des électrons à la tri-dimension des molécules. La méthode repose sur l'utilisation de miroirs permettant de générer des impulsions laser extrêmement intenses à partir d'oscillations d'une onde lumineuse dont la trajectoire est contrôlée par la technique du peigne de fréquences de Ted Hänsch, Prix Nobel de Physique 2005.

Les recherches dirigées par Ferenc Krausz ont permis de collecter de nombreuses connaissances nouvelles sur le comportement des électrons dans des processus de mécanique quantique. Cette percée scientifique fournit ainsi non seulement des informations fondamentales sur le comportement des électrons dans les atomes, les molécules et les solides, mais pourrait également aider à accélérer considérablement l'électronique et **la médecine** d'aujourd'hui. Un des travaux sur lequel travaille le chercheur actuellement concerne notamment la méthode des impulsions de laser ultracourtes dans le domaine médical afin de détecter des maladies graves comme le cancer du sein ou de la prostate. Son équipe a déjà obtenu des résultats remarquables avec l'analyse spectroscopique d'échantillons de sang. Avec cette nouvelle application dans le domaine médicale, il pourrait se révéler un futur candidat pour le Prix Nobel de médecine.

Par ailleurs, les institutions autrichiennes ont grandement soutenu les travaux du chercheur austro-hongrois dès le début de sa carrière scientifique. Il a ainsi reçu le prix Start du Fonds autrichien pour la Science en 1996 et le prix Wittgenstein en 2002, la plus importante distinction scientifique en Autriche.

### La France à nouveau honorée !

Cette année encore, la France se retrouve au-devant de la scène dans cette matière capitale, puisqu'en 2022, le Français Alain Aspect avait également été primé par l'Académie royale des sciences de Suède. Cette nouvelle consécration, dans la même discipline, salue tout particulièrement l'excellence française dans le domaine des sciences physiques.

Le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) précise de son côté qu'Anne L'Huillier et Pierre Agostini ont ainsi été distingués pour « *pour leurs travaux initiés et conduits au CEA* ». Leurs travaux pionniers se

poursuivent en effet au sein de la plateforme Attolab, un laboratoire de recherche associé au CEA et au CNRS, au sein de l'Université Paris-Saclay. Selon le CEA, ces travaux portent plus précisément « **sur la génération et la caractérisation d'impulsions laser attosecondes qui permettent de sonder de manière ultime la dynamique des électrons dans la matière** », des travaux qui « **sont aujourd'hui indispensables pour comprendre de nombreux phénomènes de physique, chimie et biologie** ».

Conçue dans le but de renforcer l'attrait des jeunes et du grand public pour les sciences physiques, l'année universitaire 2023-2024 est dédiée à cette discipline. Portée notamment par le ministère de l'éducation nationale et celui de l'enseignement supérieur, cette action d'envergure est destinée à « *stimuler l'intérêt des jeunes et du grand public pour la physique, discipline indispensable à notre quotidien mais vers laquelle un nombre insuffisant d'étudiants et d'étudiantes s'orientent* ». À cet effet, de nombreux événements sont programmés tout au long de l'année, conférences-débats, visites de laboratoires, expositions, rencontres avec les scientifiques... Une façon de « *répondre aux grands enjeux de société actuels* », selon les organisateurs, car la physique est une discipline d'avenir. De l'étude « *du réchauffement climatique à la production d'énergie, de la mise au point d'équipements médicaux au développement technologique d'objets du quotidien tels que nos smartphones* », la physique est essentielle pour « *comprendre le monde qui nous entoure* », conclut le CNRS.

### La recherche à l'échelle de l'attoseconde

Les impulsions attosecondes peuvent répondre à différents types de questions de recherche.

D'une part, la rupture d'une liaison chimique est un processus fondamental dans la nature, au cours duquel les électrons partagés entre deux atomes se répartissent pour former des atomes non liés. Les électrons précédemment partagés se réorganisent ultrarapidement au cours de ce processus, et les impulsions attosecondes ont permis aux chercheurs de suivre la rupture d'une liaison chimique en temps réel.

La capacité à générer des impulsions attosecondes – recherche pour laquelle trois chercheurs ont reçu le prix Nobel de physique 2023 – est devenue possible pour la première fois au début des années 2000, et le domaine a continué à se développer rapidement depuis lors. En fournissant des instantanés des atomes



et des molécules à des échelles de temps très courts, la spectroscopie attoseconde a aidé les chercheurs à comprendre le comportement des électrons dans les molécules individuelles, comme la façon dont la charge électronique migre et la façon dont les liaisons chimiques entre les atomes se brisent.

À plus grande échelle, la technologie attoseconde a également été appliquée à l'étude du comportement des électrons dans l'eau liquide ainsi qu'au transfert d'électrons dans les semi-conducteurs à l'état solide. En améliorant encore nos capacités à produire des impulsions lumineuses de l'ordre de l'attoseconde, les chercheurs parviendront à mieux comprendre les particules qui composent la matière.

Quels sont les comportements de la matière à une échelle de temps infiniment petite ? Pourrait-on, à cette échelle, observer voire contrôler les interactions de ses constituants ? Quelles en seraient les applications possibles ? Dans plusieurs laboratoires de l'Université Paris-Saclay, des chercheurs et chercheuses spécialistes de la science ultrarapide tentent chaque jour de répondre à ces interrogations.

## LA SCIENCE ATTOSECONDE POUR DÉFINIR L'INFINIMENT PETIT

*(Cet article, tiré de L'Édition n°19 Recherche Paris-Saclay, fut publié le 24 novembre 2022 et mis à jour le 08 novembre 2023.)*

Un milliardième de milliardième de seconde. L'attoseconde ( $10^{-18}$  seconde) est l'unité de temps la plus petite actuellement mesurable. À cette échelle, même la lumière est lente : celle-ci ne parcourt « que » 0,3 nanomètres (0,3 nm ou  $0,3 \cdot 10^{-9}$  m) par attoseconde. Au laboratoire Interactions, dynamiques et lasers (LIDYL – Univ. Paris-Saclay, CEA, CNRS), le groupe de recherche Attophysique a pour objectif d'étudier la matière à des échelles de temps femtoseconde ( $10^{-15}$  seconde) et attoseconde. « *Les processus de plus en plus petits auxquels nous nous intéressons dans la matière appartiennent à des échelles de temps de plus en plus petites, explique Pascal Salières, responsable du groupe. Typiquement, la rotation des molécules se fait en quelques picosecondes ( $10^{-12}$  seconde). La vibration des molécules, le mouvement des atomes à l'intérieur des molécules, tout cela s'effectue à l'échelle inférieure : en femtosecondes.* » C'est d'ailleurs l'observation à l'échelle femtoseconde des dynamiques atomiques au cours d'une réaction chimique qui vaut au chimiste égypto-américain Ahmed Zewail le prix Nobel de chimie en 1999.



Au-delà de l'échelle atomique se dresse le challenge de l'électron, un des constituants de l'atome. Comment percevoir les dynamiques électroniques, sachant que celles-ci sont encore plus rapides que les mouvements atomiques ? « *Concernant l'électron, l'échelle de temps typiquement donnée est de 150 attosecondes. Ce chiffre correspond au temps de rotation d'un électron sur la première orbite de Bohr d'un atome d'hydrogène* », précise Pascal Salières. Or, observer les mouvements électroniques conduirait à une étude en détails de processus fondamentaux : le transport d'informations et les transformations de la matière ont pour vecteurs privilégiés les électrons (via les transferts de charge, d'énergie, etc.).

Et après cette étape analytique, viendrait la manipulation de ces processus. « *Une fois qu'on aura compris à l'échelle électronique comment ceux-ci se produisent, il nous sera possible d'essayer de les orienter, de les optimiser, de les accélérer, etc.* », ajoute le chercheur.

### La problématique des sources de rayonnements attosecondes

Mais à l'aide de quel procédé est-il possible de voir des interactions ultrarapides ? À l'instar d'une photographie, il faut réussir à « *capturer* » des images à quelques attosecondes ou femtosecondes près. Pour cela, il est nécessaire d'utiliser des impulsions de lumière ultra brèves délivrées par un laser. Mais un problème de taille a longtemps persisté : les lasers sont fondamentalement incapables de former des impulsions attosecondes. « *La raison est que l'on se rapproche de la durée du cycle optique : on ne peut pas produire de rayonnements plus brefs que quelques femtosecondes en restant à une longueur d'onde dans le visible ou le proche UV* », précise Pascal Salières.

En 1988, des chercheurs et chercheuses du Service de physique des atomes et des surfaces (désormais LIDYL) découvrent la génération d'harmoniques d'ordre élevé : le sésame qui ouvre la voie vers des impulsions attosecondes. En électromagnétique, plus la longueur d'ondes d'un signal est petite, plus sa fréquence (le nombre d'oscillations du signal par seconde) est grande. Ainsi, en générant des ondes dans le domaine de l'ultraviolet extrême (XUV), il est possible d'obtenir des impulsions à oscillations très rapides et à durée d'impulsion fortement réduites : le record actuel se situe aux alentours de 50 attosecondes. « *On opère en focalisant un laser très intense. Celui-ci passe à travers un jet de gaz, où il interagit avec des atomes. Il lui arrache alors une toute petite fraction du nuage électronique et accélère ses électrons, développe Pascal Salières. Mais comme, par définition, le champ laser s'inverse toutes les demi-*

*périodes optiques, les électrons sont rappelés vers les noyaux à ce moment-là. Sauf qu'ils ont accumulé beaucoup d'énergie cinétique au contact du laser, qu'ils restituent sous la forme d'un flash de rayonnement dans l'XUV. » C'est donc en jouant avec « l'élasticité » de la liaison des électrons avec leur noyau que les scientifiques créent, à chaque demi-période du laser, un flash XUV attoseconde. Tel est d'ailleurs le but de la plateforme ATTOLab, conçue en 2016 et opérée par le LIDYL, qui fournit des sources de rayonnements attosecondes aux utilisateurs de toute l'Europe.*

### Deux impulsions valent mieux qu'une

La « *photographie* » d'un évènement à l'échelle attoseconde s'effectue en réalité à l'aide de deux impulsions. C'est tout du moins sur ce principe que repose la méthode « *pompe-sonde* », utilisée aujourd'hui pour observer de tels processus. « *La "pompe", ou première impulsion, excite d'abord un atome et de ce fait, un des électrons se déplace vers les couches électroniques supérieures, vers la bande de conduction, explique Marino Marsi, professeur rattaché au Laboratoire de physique des solides (LPS – Univ. Paris-Saclay, CNRS). Ensuite, l'électron "redescend" dans les couches électroniques, par un processus naturel de désexcitation. Par une seconde impulsion laser, la "sonde", on observe la dynamique de ce phénomène. Cela nous permet d'étudier la nature dans un état quantique excité, de regarder la matière à l'état hors-équilibre.* » En réussissant à moduler l'écart entre les deux impulsions laser, et en répétant l'expérience de nombreuses fois (dans des conditions toujours strictement identiques), les scientifiques reconstituent image par image le processus d'excitation et de désexcitation de la matière, à l'attoseconde près.

Mais au-delà du « cliché », qu'en est-il de son « enregistrement » ?

Le système de capture le plus efficace est celui du spectromètre de type Velocity Map Imaging (VMI). Contrairement à d'autres techniques de détection, comme le spectromètre à électrons à bouteille magnétique, la résolution angulaire est ici conservée. Ainsi, avec un spectromètre VMI, il est possible de projeter les électrons et de reconstruire leur direction d'éjection ainsi que leur énergie.

Au LIDYL, grâce à la méthode pompe-sonde, les chercheurs et chercheuses du groupe Attophysique ont étudié l'ionisation résonnante à deux photons, à travers des états excités de l'hélium. « *Ces mesures sont très intéressantes car elles nous donnent accès, de façon très fine, au potentiel de mouvement de l'électron et à toutes les interactions électron-électron, électron-noyau, celles des*

*réseaux cristallins. Comprendre ces interactions est fondamental pour étudier les liaisons chimiques »*, explique Pascal Salières. Plein d'espoir, le chercheur parcourt le champ des possibles qu'offre cette nouvelle physique : « *C'est ce genre d'expérience que l'on va ensuite généraliser à des systèmes plus complexes que l'hélium, comme des molécules, des nanoparticules, des solides, etc. pour étudier les corrélations électroniques* ». En effet, seules des approximations théoriques sont aujourd'hui capables de traiter ces systèmes complexes. Avec de telles nouvelles expériences, il deviendra envisageable pour les physiciennes et physiciens de confronter et de valider, ou non, les approximations théoriques établies. « *Il nous sera possible de mesurer les temps de diffusion des électrons et les effets de décohérence dus à leurs interactions avec l'environnement. Cela est essentiel pour définir les propriétés électriques des matériaux et leur capacité à transporter de l'information. Et nous serons en mesure d'étudier les effets de décohérence dans la photoionisation.* »

### **Observer « à l'œil nu » l'émission d'un électron**

« *De plus en plus d'applications émergent, maintenant que nous sommes capables de produire des sources de rayonnements attosecondes bien contrôlées* », dévoile Pascal Salières. Au sein de son groupe au LIDYL, la physique attoseconde sert par exemple à observer le phénomène de l'effet photoélectrique comme jamais auparavant. C'est Heinrich Hertz qui, au cours du XIXe siècle, a défini l'effet photoélectrique le premier. En 1921, Albert Einstein reçoit le prix Nobel de physique pour sa théorie de l'effet photoélectrique : l'absorption d'une particule d'énergie (un photon) par un atome s'accompagne de l'émission quasi-instantanée d'un électron. C'est ce caractère « *quasi-instantané* » qui tourmente les chercheurs et chercheuses du LIDYL. Que se passe-t-il entre l'absorption du photon par l'atome et l'éjection d'un électron ?

Grâce aux impulsions attosecondes et à la technique pompe-sonde, les scientifiques réussissent finalement à reconstruire les dynamiques d'émissions d'électrons durant ces phénomènes.

En mars 2022, avec des collègues de l'Institut des sciences moléculaires d'Orsay (ISMO – Univ. Paris-Saclay, CNRS), de l'Institut lumière matière (ILM – Univ. Claude Bernard, CNRS) et du Laboratoire de chimie physique - matière et rayonnement (LCPMR – Sorbonne Univ., CNRS), les physiciens et physiciennes du LIDYL publient le tout premier film tridimensionnel qui suit le processus de photoémission, au niveau atomique et à l'échelle attoseconde. Pour la première fois, l'effet photoélectrique théorisé depuis plus de 100 ans par Albert Einstein

est observé, attoseconde par attoseconde. Et par là, les scientifiques résolvent complètement le processus quantique de photoémission à deux photons de l'hélium. Un résultat marquant : la photoémission étant à la base des méthodes d'analyse spectroscopique parmi les plus fines, ces travaux ouvrent la voie à une compréhension approfondie des effets de corrélation électronique dans la matière, depuis les atomes et les molécules jusqu'aux solides.

Lou Barreau, enseignante-chercheuse à l'ISMO, s'intéresse d'ailleurs également à l'effet photoélectrique. « *Grâce à la science attoseconde, nous avons découvert que la photoémission n'est pas instantanée, mais qu'elle est aussi variable selon l'espèce étudiée, l'énergie envoyée et l'environnement de l'atome* », explique la chimiste, qui souhaite avant tout relier ces analyses à des phénomènes chimiques. Au sein de l'équipe « *Dynamiques et interactions : rayonnement, atomes, molécules (DIRAM) de l'ISMO* », la chercheuse étudie le processus de photo-émission de différentes molécules : « *j'analyse la photoémission dans les gaz rares et effectue autrement le suivi de dynamiques (de dissociation ou d'isomérisation) au sein d'une molécule, grâce à la méthode pompe-sonde. J'observe ainsi les couplages dynamiques d'électrons* ». Les molécules étudiées sont des composés iodés (le diiode I<sub>2</sub>, le monochlorure d'iode ICl ou le monobromure d'iode IBr), exploitées en phase gazeuse pour des questions pratiques : contrairement aux phases condensées (liquide ou solide), les molécules en phase gazeuse sont isolées et n'interagissent pas avec des solvants, ce qui permet d'accéder à leur dynamique intrinsèque. « *Mais l'observation de phénomènes attosecondes en solution est en voie de développement. Cela aurait un intérêt immense ! C'est quelque chose vers lequel la communauté attoseconde se dirige* », explique Lou Barreau.

En partenariat avec l'ISMO, les chercheurs et chercheuses du LIDYL étudient aussi de plus près les éjections d'électrons et ce que ces processus induisent. « *On réalise un trou dans le nuage électronique d'une molécule qui peut par la suite migrer d'un bord à l'autre de la molécule, détaille Pascal Salières. En fonction de l'endroit où ce trou se localise, les liaisons de la molécule se fragilisent et cela provoque une fragmentation de la molécule. En contrôlant la localisation de ce trou, il serait possible d'orienter la fragmentation moléculaire et de contrôler la réactivité chimique. Les applications qui suivraient, comme la création de nouveaux produits impossibles à concevoir de façon naturelle, seraient infinies.* »

## Une physique au champ infini d'applications

Au LPS, Marino Marsi s'intéresse, lui, à la matière quantique et en particulier aux matériaux topologiques. Ceux-ci possèdent des caractéristiques aussi rares qu'intrigantes : un matériau topologique est conducteur d'électricité à sa surface mais isolant en son volume. « *Les électrons de ces matériaux possèdent des propriétés particulières. Ils sont notamment insensibles aux perturbations : ils sont dans des états "protégés". Ce sont ces mêmes propriétés qui font de ces matériaux des conducteurs idéaux* », développe l'enseignant-chercheur. Grâce aux impulsions laser ultrarapides, il étudie les dynamiques électroniques de différents matériaux quantiques (graphène, alliage de bismuth et de sélénium Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>, de bismuth et de tellure Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, etc.).

Hébergée au Laboratoire de physique des deux infinis – Irène Joliot-Curie (IJCLab – Univ. Paris-Saclay, Univ. Paris Cité, CNRS), la plateforme LASERIX est, pour sa part, destinée au développement de sources cohérentes XUV produites par des lasers intenses et à leurs applications. Elle offre à Sophie Kazamias, responsable scientifique de la plateforme, et à diverses équipes la possibilité d'étudier plusieurs types de physiques. Parmi les projets abordés ici, PALLAS vise à mettre au point un accélérateur laser plasma. « *Il s'agit de transformer un gaz en plasma puis de l'exciter, afin de créer un champ électrique qui va par la suite accélérer les électrons* », expliquent Sophie Kazamias et Moana Pittman, le responsable technique de LASERIX. « *Ce type d'accélération est 1 000 fois plus puissant que les technologies actuelles d'accélération de particules. C'est, en revanche, encore très difficile à contrôler* », précisent les scientifiques.

Tout aussi fascinante, l'expérience DeLLight (pour Deflection of light by light, déviation de la lumière par la lumière) explore le vide et ses propriétés encore inconnues à l'aide d'un laser à impulsions ultra-intenses. Les chercheurs et chercheuses impliquées souhaitent démontrer que, à l'instar de tout milieu optique existant, le vide est un milieu optique non linéaire. Cela signifie que l'application d'un champ électromagnétique d'une très haute intensité dans le vide serait à même de modifier son indice optique.

## À quand la Zeptoseconde ?

Si aujourd'hui l'attoseconde représente une « *barrière ultime* », elle sera vraisemblablement un jour franchie. La **zeptoseconde** ( $10^{-21}$  seconde) est d'ailleurs déjà évoquée parmi les spécialistes. « *Au début de mes études, la picoseconde ( $10^{-12}$ seconde) était LA frontière ultime !* », se remémore Marino

Marsi. Dès lors, on peut se perdre à imaginer quelles nouvelles barrières restent à franchir, et quelles futures découvertes se cachent encore derrière elles !!!