

■ LES AUTEURS



Norah BERRAH dirige le département de physique de l'Université du Connecticut, aux Etats-Unis, où elle travaille notamment à la construction d'instruments de mesure pour le LCLS.

Philip BUCKSBAUM est professeur de physique à l'Université Stanford et au SLAC, où il dirige l'Institut PULSE consacré aux recherches utilisant les lasers ultrabrefs et le LCLS.

L'invention du laser à électrons libres

L'invention du principe du laser à électrons libres est généralement attribuée à John Madey, aujourd'hui professeur de physique à l'Université d'Hawaï. Étudiant dans les années 1960 au Caltech, il eut une discussion avec des camarades sur les moyens de renforcer le rayonnement de freinage d'une particule chargée (nommé Bremsstrahlung). De cette question naquit toute une carrière vouée au développement technique du laser à électrons libres et qui s'est déroulée à l'Université Stanford, puis à l'Université Duke.

LCLS est le sigle de *Linac Coherent Light Source*, soit « source cohérente de lumière de l'accélérateur linéaire ». L'essentiel de son principe découle des techniques employées dans tous les grands accélérateurs de particules. De fait, le LCLS est un détournement du SLAC, c'est-à-dire du grand accélérateur linéaire exploité depuis 1962 par l'Université Stanford. Avant de devenir le LCLS, le SLAC était bien connu : c'est à cet accélérateur que les États-Unis doivent les grandes découvertes et les nombreux prix Nobel qui les ont maintenus à la pointe de la physique des particules élémentaires pendant des décennies.

Suivre le mouvement des atomes ?

Le laser à rayons X qu'est le LCLS combine les deux principaux outils utilisés par les physiciens expérimentateurs d'aujourd'hui : les sources de rayonnement synchrotron et les lasers ultrabrefs. Les synchrotrons, rappelons-le, sont de grands instruments construits à l'aide d'électroaimants et de cavités à champs électriques afin d'accélérer sur une trajectoire circulaire des particules chargées. En raison de l'accélération centripète (due à la courbure) qu'elles subissent, ces particules émettent un rayonnement dirigé essentiellement selon la tangente à la trajectoire : c'est le rayonnement synchrotron. Lorsque l'accélération est forte, ce rayonnement est composé surtout de rayons X, qui font le bonheur des physiciens dans toutes sortes d'explorations de la matière (voir l'article *Produire des rayons X et γ sur une table*, page 46).

L'une d'entre nous (N. Berrah) consacre sa carrière à l'étude de l'intérieur des atomes, des molécules et de tous les systèmes de taille nanométrique à l'aide du rayonnement synchrotron. Les rayons X sont en effet l'outil idéal de ce type de recherche, car leurs longueurs d'onde – de 0,01 à 10 nanomètres – couvrent les tailles atomiques (vers 0,1 nanomètre) et moléculaires (vers 1 nanomètre). Pour cette raison, les rayons X que diffracte une structure de taille nanométrique emportent sur cette dernière des informations. Les rayons X ont aussi l'intérêt de pouvoir être réglés de façon à correspondre à des atomes particuliers, tels ceux de fer, ce qui permet par exemple de les situer au sein d'une grande molécule, telle l'hémoglobine.

Toutefois, il y a une chose que le rayonnement synchrotron ne fait pas : suivre les mouvements de la matière les plus intimes, ceux qui se produisent au sein d'une molécule ou de la matière solide. Le problème est que les rayons X produits à l'aide d'un synchrotron ne sont ni assez brefs ni assez intenses.

Le rayonnement synchrotron ne suffit pas non plus à lire la structure d'une molécule isolée. Actuellement, pour déterminer la structure d'une molécule à l'aide du rayonnement synchrotron, il faut en aligner des exemplaires par millions, pour leur faire former un cristal, lequel n'est pas toujours facile à obtenir.

D'où l'idée de recourir à des lasers à rayons X, beaucoup plus intenses, puisque leur rayonnement est composé d'une seule grande onde électromagnétique, plutôt que d'ondes se propageant indépendamment. Nommée cohérence, cette caractéristique permet de concentrer le faisceau et son énorme énergie en un point minuscule. Les faisceaux laser ont aussi l'avantage de pouvoir s'allumer et s'éteindre en une femtoseconde (10^{-15} seconde). L'un d'entre nous (P. Bucksbaum) emploie des impulsions laser ultrabèves pour éclairer en saccade le mouvement des atomes ou une réaction chimique, exactement comme on éclaire au stroboscope le mouvement d'une roue.

Les lasers les plus courants fonctionnent dans le visible ou tout près. Les longueurs d'onde correspondantes (0,4 à 0,8 micromètre) sont quelque mille fois supérieures à celles requises pour distinguer des atomes individuels. De la même manière qu'un radar météorologique montre une tempête mais pas ses gouttes de pluie, les faisceaux laser émettant dans le domaine visible détectent les ensembles d'atomes mais pas les atomes eux-mêmes. Pour qu'un objet atomique diffracte un rayonnement cohérent de façon mesurable, il faut que la longueur d'onde de ce dernier soit au moins aussi petite que lui, donc dans la gamme des rayons X. Bref, pour éclairer le monde atomique et moléculaire, il faut disposer d'un laser à rayons X !

Il fut un temps où l'idée même de construire un laser émettant des rayons aussi énergétiques que des rayons X paraissait absurde. Les lasers courants exploitent la capacité des atomes à absorber et à restituer des photons. Le plus souvent, après



2. LE FAISCEAU X
parcourt un tube reliant
les deux salles d'expé-
riences du laser à
électrons libres du Centre
de l'accélérateur linéaire
de Stanford, le SLAC.

avoir absorbé l'énergie d'une telle particule de lumière, un atome finit par la libérer spontanément. Mais quand ? Au début du XX^e siècle, Albert Einstein a découvert un moyen de déclencher cette émission : c'est ce que l'on nomme l'émission stimulée. Cet effet est exploité pour obtenir des lasers. Pour cela, il faut exciter en permanence toute une population d'atomes, c'est-à-dire leur faire absorber des photons d'énergie choisie. Un atome se désexcite en émettant un photon, lequel déclenchera l'émission, par un autre atome excité, d'un photon identique au premier et en phase ; le phénomène se poursuit ensuite et s'amplifie. C'est cette réaction en chaîne qui produit une émission laser cohérente et conséquente.

En réalité, la probabilité qu'un atome excité qui reçoit un photon incident émette un photon est assez faible. Dans la plupart des cas, l'atome libère spontanément l'énergie absorbée avant qu'une interaction avec un photon incident n'ait pu avoir lieu. Dans les lasers habituels, on surmonte cette limite en multipliant les occasions d'interaction. Pour cela, on place le milieu émetteur entre deux miroirs afin de multiplier les parcours des photons. Dans les lasers à hélium-néon des scanners de supermarché par exemple, un flot continu d'électrons entre en collision avec les atomes d'un gaz, et la lumière produite est renvoyée 200 fois par les miroirs afin de constituer un faisceau suffisant.

Abattre en vol des satellites et des missiles balistiques

Dans le cas d'un laser X, chaque étape de ce processus se complique. Un photon X contient facilement 1 000 fois plus d'énergie qu'un photon de lumière visible. Un atome recevant une telle particule de lumière doit donc absorber 1 000 fois plus d'énergie, qu'il ne pourra retenir bien longtemps. Un autre point est que des miroirs pour rayons X sont très difficiles à fabriquer. Bien que ces difficultés ne soient pas insurmontables, elles signifient en pratique que, pour créer les conditions d'une émission laser X, une énorme quantité d'énergie est nécessaire.

Le premier laser X ayant jamais existé tirait son énergie d'un essai nucléaire souterrain. Il fut construit dans le cadre du projet secret *Excalibur* mis en œuvre par le Laboratoire américain Lawrence