

par exemple en changeant la longueur du plasma. Plus les électrons seront énergétiques, plus le rayonnement sera de courte longueur d'onde.

Les synchrotrons lasers sont encore des instruments de recherche fondamentale, mais leur principe est démontré. Pour les rendre accessibles et fiables, il faut maintenant un effort d'ingénierie. Aujourd'hui, une telle source tient dans une pièce d'environ 50 mètres carrés et coûte quelques centaines de milliers d'euros, l'essentiel du coût provenant du système laser. À l'avenir, les lasers de puissance devraient devenir plus compacts, mais aussi moins chers, et les applications de ces nouvelles sources X pourraient se répandre dans les laboratoires.

Néanmoins, de premières applications ont déjà été réalisées. Dans la gamme des rayons X, le rayonnement bêta-tron a permis de mettre en évidence la fusion de semi-conducteurs, phénomène qui ne dure que quelques centaines de femtosecondes. Il a aussi servi à radiographier, avec un seul flash de rayonnement et une très haute

résolution, de petits spécimens d'intérêt biologique, permettant de voir instantanément des détails qui n'auraient pas pu être révélés par une radiographie classique (voir la figure 4). À plus haute énergie, le rayonnement produit par un synchrotron laser ouvre une gamme d'applications importantes en radiographie industrielle. Très énergétique, le rayonnement gamma permet par

On peut pronostiquer que les travaux engagés aboutiront bientôt à une nouvelle génération de sources X.

exemple d'inspecter l'intérieur des pièces métalliques ou d'épais objets pour y détecter d'éventuels défauts.

Des projets liés à la sécurité sont aussi en cours, notamment pour créer des sources servant à inspecter le contenu de camions. Des applications médicales sont aussi envisagées, en particulier une forme de radiographie à haute résolution qui permettrait

de mettre en évidence plus de détails qu'en radiographie classique.

Il faudra encore quelques années de développement avant que ces sources deviennent des instruments de travail accessibles. L'investissement en vaut la peine, car leur principe technique promet de les rendre bien plus compactes et moins onéreuses que les sources habituelles.

Déjà aussi brillants qu'un synchrotron dans le domaine des rayons X et des milliers de fois plus brillants que toute source existante dans le domaine gamma, les synchrotrons lasers devraient se révéler extrêmement utiles à l'avenir.

Aujourd'hui, de nombreux laboratoires se sont équipés de systèmes laser commerciaux et se sont lancés dans cette direction de recherche prometteuse. On peut pronostiquer que les travaux engagés aboutiront bientôt à une nouvelle génération de sources X et gamma compactes, qui trouveront de multiples usages, que ce soit en physique, en chimie, en médecine ou dans l'industrie. ■

Épatez vos amis avec 50 expériences scientifiques incroyables !



Jack Guichard et Guy Simonin - Relié sous spirale, 168 pages, 170 x 210 mm, 18,90 €

Retournez votre verre de vin sans en perdre une goutte, transformez l'eau en vin, créez un nuage dans une bouteille, mettez une olive en lévitation ! Des expériences très faciles à réaliser et enrichies d'une explication simple et compréhensible des phénomènes scientifiques en jeu.



Le plus puissant faisceau de rayons X

Nora Berrah et Philip Bucksbaum

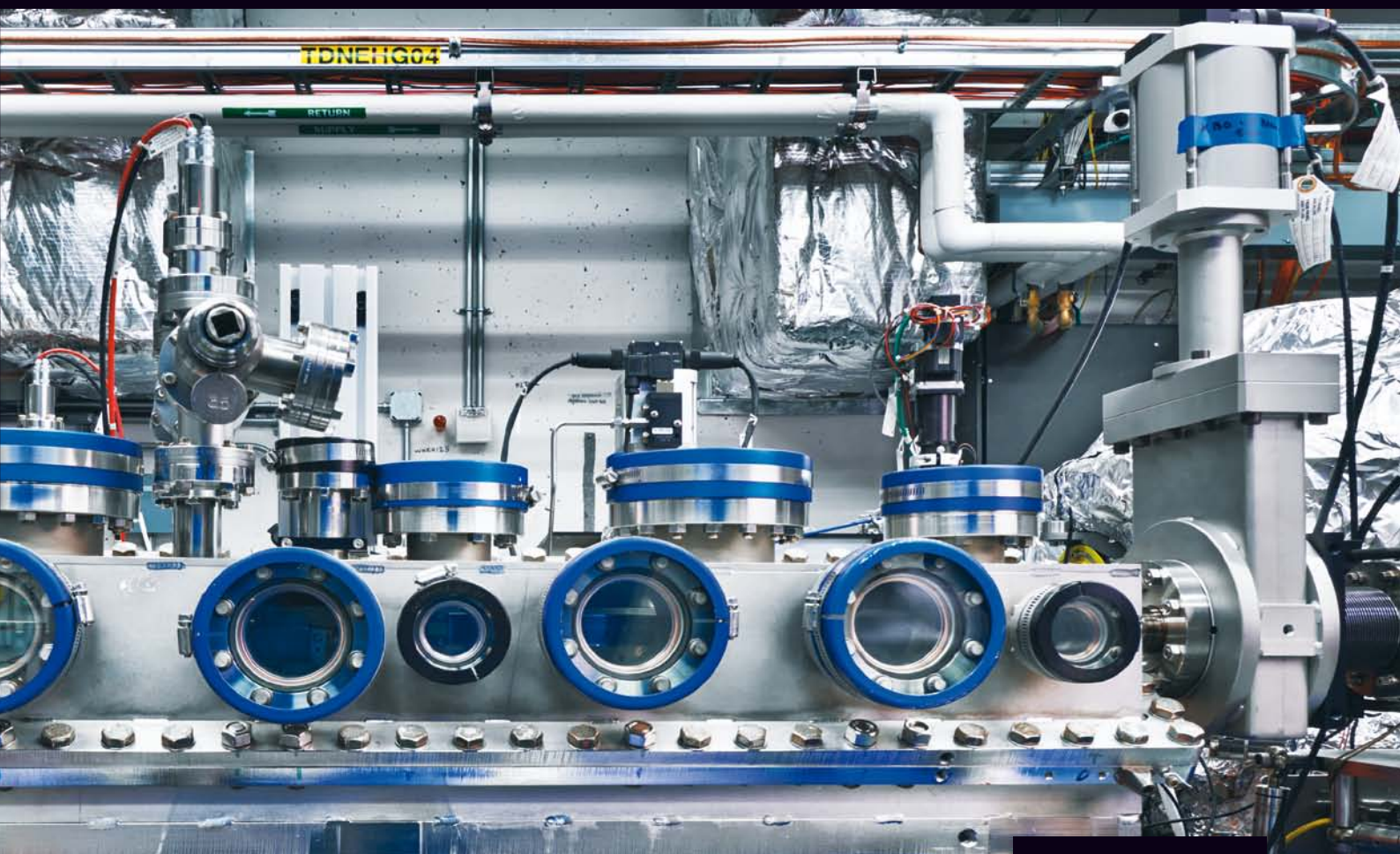
Le grand accélérateur linéaire de l'Université Stanford a été converti en laser à électrons libres. Il a ainsi donné naissance à la plus intense source de rayons X du monde.

Porter en moins d'un milliardième de seconde un groupe d'atomes ou une poussière à un million de degrés. Voilà ce que peut faire de façon routinière le plus puissant des lasers dits à électrons libres : le LCLS, un laser à rayons X installé dans le tunnel de l'accélérateur linéaire de Stanford (le SLAC, ou *Stanford Linear Accelerator Center*). Un atome de néon soumis au rayonnement du LCLS perd par exemple quasi instantanément ses dix électrons. Privé de son nuage électronique protecteur, il est projeté de façon quasi explosive loin des atomes voisins, et laisse derrière lui un sillage de destructions, qui intéresse beaucoup les physiciens.

Depuis son entrée en fonction en 2009, le LCLS joue en physique atomique et des plasmas, en chimie, en physique de la matière condensée et en biologie le rôle pionnier que joue en physique des particules élémentaires le LHC, le grand collisionneur du Cern. Exploitant les chocs violents qu'il administre, les physiciens préparent la matière dans des états extrêmes, tel celui de cet atome de néon quasi instantanément vidé de ses électrons. Ils se servent aussi du LCLS comme d'une sorte de caméra ultrarapide pour suivre l'évolution de systèmes quantiques, par exemple une molécule en train de réagir avec une autre. Le LCLS sert aussi à révéler la structure de protéines et de molécules biologiques, quand les autres sources de rayons X en sont incapables.



1. CETTE CHAMBRE À VIDE
(la structure aux hublots bleus) contient des miroirs conçus pour concentrer en un point de la taille d'une poussière le plus puissant des faisceaux X existants.



L'ESSENTIEL

■ LCLS, le laser à électrons libres de l'Université Stanford, est alimenté par le SLAC, un grand accélérateur linéaire.

■ Les impulsions X ultra-intenses de ce laser créent de nouveaux états de la matière.

■ Sorte de caméra ultrarapide pour le monde microscopique, le LCLS peut aussi enregistrer des transformations chimiques qui durent moins d'un millième de milliardième de seconde.

■ Il permet aussi d'enregistrer des instantanés de protéines ou de virus.

Toutes les photographies sont de Spencer Lowell

■ 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