



3. LES DÉTECTEURS PLACÉS DANS CETTE CHAMBRE À VIDE fournissent des images d'ultra haute résolution de protéines et de cellules au moment où une impulsion X les éclaire.

avec des molécules, comme avec des atomes pris dans la matière solide.

L'état exotique de la matière qui en résulte n'existe que quelques femtosecondes. Dans les solides, il évolue en matière dense et chaude, une sorte de plasma que l'on ne rencontre habituellement que dans les conditions extrêmes du cœur d'une planète géante où en cas de fusion nucléaire. Il n'a en tout cas aucun équivalent sur Terre.

Or le LCLS peut servir de caméra rapide afin de saisir la façon dont se créent les atomes creux. Comme les relaxations Auger durent quelques femtosecondes, il est possible avec le LCLS de diriger une impulsion X d'une femtoseconde sur un système atomique en voie d'évidement avant qu'un électron externe ait le temps de rejoindre les places vacantes de la couche interne. C'est ce que nous avons fait non seulement pour des atomes, mais également pour des molécules et des échantillons de matière.

Simuler l'intérieur des planètes gazeuses

Une autre application du LCLS est la simulation des conditions extrêmes régnant au sein des géantes gazeuses. Selon les théories existantes, les températures à l'intérieur de Jupiter, Saturne, Uranus ou encore Neptune atteignent 20 000 degrés, soit environ quatre fois la température de surface du Soleil. Les principaux constituants de la planète que sont l'hydrogène et l'hélium doivent se trouver sous la forme

de phases solides exotiques, de densités extrêmes. Toutefois, nous en savons peu, car la résistance d'une telle matière et la façon dont elle se comprime ne sont ni faciles à mesurer, ni bien comprises en théorie. Pour le moment, la recherche sur de tels états de la matière n'a pu qu'être théorique, et les expériences de validation des modèles ont été rares.

Certaines des premières expériences conduites au LCLS ont été menées pour recréer ces conditions internes aux planètes gazeuses. L'intensité colossale du laser chauffe la matière très rapidement, produisant des effets extraordinaires. Nous avons par exemple observé pour la première fois une absorption multiphotonique X, c'est-à-dire comment plusieurs photons X peuvent être absorbés par des molécules constituées de nombreux atomes, ce qui libère des électrons fortement liés.

Un groupe assez dense de tels photons peut aussi arracher de multiples électrons à un atome, à une molécule ou à un élément de matière, et les vider de l'intérieur comme décrit plus haut. Les rayons X de forte intensité peuvent en outre casser quasi instantanément toutes les liaisons au sein de molécules supposées se trouver à l'intérieur des planètes géantes, dont l'eau, le méthane et l'ammoniac. Les mesures de la matière dans des conditions extrêmes ont permis de déterminer l'équation d'état de la matière (relation entre température, pression et densité) au cœur des géantes gazeuses ou durant les impacts météoritiques.

Quant à l'exploitation du laser comme caméra X ultrarapide, elle pourrait combler de sérieuses lacunes dans nos connaissances en réalisant des instantanés de molécules en train de réagir ou encore de processus physiques, chimiques et biologiques rapides.

On connaît peu en effet la structure de nombreuses molécules biologiques, en particulier des protéines membranaires et des gros complexes protéiques. La technique standard, la cristallographie, suppose de former ces molécules en une structure cristalline assez importante et régulière pour diffracter le rayonnement synchrotron. Les motifs résultants révèlent la structure de la molécule. La faiblesse de cette méthode tient au fait que les rayons X endommagent facilement les molécules. Pour compenser, les chercheurs doivent préparer de gros cristaux, mais de nombreuses molécules intéressantes (dont les protéines membra-

BIBLIOGRAPHIE

L. Redecke *et al.*, *Natively inhibited Trypanosoma brucei cathepsin B structure determined by using an X-ray laser*, *Science*, vol. 339, pp. 227-230, 2013.

S. M. Vinko *et al.*, *Creation and diagnosis of a solid-density plasma with an X-ray free electron laser*, *Nature*, vol. 482, pp. 59-63, 2012.

H. N. Chapman *et al.*, *Femtosecond X-ray protein nanocrystallography*, *Nature*, vol. 470, pp. 73-77, 2011.

M. M. Seibert *et al.*, *Single Mimivirus particles intercepted and imaged with an X-ray laser*, *Nature*, vol. 470, pp. 78-81, 2011.

N. Berrah *et al.*, *Double core-hole spectroscopy for chemical analysis with an intense X-ray femtosecond laser*, *PNAS*, vol. 108(41), pp. 16912-16915, 2011.

L. Young *et al.*, *Femtosecond electronic response of atoms to ultra-Intense X-rays*, *Nature*, vol. 466, pp. 56-61, 2010.

naïres) sont très difficiles à faire cristalliser. L'exploitation du rayonnement synchrotron pour analyser des molécules biologiques est de surcroît lente, donc inutile pour observer les phénomènes chimiques transitoires qui se produisent à l'échelle de la femtoseconde.

Au premier abord, le LCLS semble être un outil totalement inadapté pour analyser de fragiles macromolécules organiques. Une seule impulsion de ses rayons X suffit en effet à détruire les matériaux organiques ou toute matière non cristalline. Toutefois, la brièveté de l'impulsion X et son intensité permettent de capturer une image en moins de temps que la molécule n'en met à exploser. Certes, le laser détruit l'échantillon, mais il en prend néanmoins une image claire avant sa disparition.

Cette méthode dite de la « diffraction avant destruction » commence déjà à produire des fruits. Les chercheurs ont utilisé la cristallographie femtoseconde pour enregistrer des motifs de diffraction de nanocristaux, de protéines et de virus

(voir l'encadré pages 58 et 59). Au cours de travaux récents, des chercheurs ont ainsi cartographié la structure de protéines impliquées dans la maladie du sommeil.

Outre le LCLS, des laboratoires européens et asiatiques préparent ou construisent de nouveaux gros lasers à électrons libres. En Europe, le centre allemand de recherche

Amplifying Spontaneous Emission, émission spontanée auto-amplificatrice). Après avoir longtemps servi de machine pilote, FLASH est à la disposition des chercheurs depuis 2005. L'expérience accumulée avec FLASH est actuellement réinvestie par le centre DESY dans la construction du laser XFEL (*European X-ray Free-Electron Laser*), qui doit entrer en fonctionnement en 2016 à Hambourg.

Cette nouvelle génération de machines sera plus stable et dotée de faisceaux plus faciles à contrôler, et aux impulsions plus brèves encore. Avec des impulsions de seulement 0,1 femtoseconde, nous pourrions en effet commencer à observer non seulement le mouvement des atomes, mais aussi celui des électrons atomiques ou moléculaires. De nouveaux dispositifs pourraient même nous permettre de contrôler ce mouvement. Le rêve de réaliser des films montrant comment les liaisons chimiques se cassent, puis comment de nouvelles liaisons se forment à leur place, est maintenant à notre portée. ■

LE RÊVE DE FILMER

comment les liaisons chimiques se cassent et comment de nouvelles se forment est maintenant à notre portée.

fondamentale DESY (*Deutsches Elektronen Synchrotron*) a innové très tôt en construisant dès les années 1990 une machine pour tester le principe des lasers à électrons libres : le laser TESLA rebaptisé depuis *Free Electron Laser Hamburg* ou FLASH. C'est là que fut démontrée en 2001 la possibilité même de produire un rayonnement laser à partir d'un faisceau d'électrons en exploitant l'émission auto-amplifiée décrite plus haut. Cet effet est nommé l'effet SASE (*Self*

france culture C'EST POUR VOUS

LA MARCHÉ DES SCIENCES

AVENTURES SAVANTES AU FIL DE L'HISTOIRE
AURÉLIE LUNEAU / JEUDI 14H - 15H

EN PARTENARIAT AVEC **POUR LA SCIENCE**

écoutez, réécoutez et podcastez l'émission sur franceculture.fr

QR code and social media icons (Facebook, Twitter)