

Tout ce qu'il faut pour obtenir une telle émission laser est un espace assez grand pour loger un très long onduleur et un faisceau d'électrons libres – des conditions que réunissait le SLAC, étant donné son tunnel de trois kilomètres. Au bout de la ligne, les électrons sont déviés avant que les photons ne pénètrent dans les chambres expérimentales. Si tout est parfaitement aligné, le tour est joué, et l'on obtient un faisceau ultra-intense.

Gigantesque intensité

L'intensité du LCLS est gigantesque : elle atteint 10^{18} watts par centimètre carré au pic de l'impulsion, soit des milliards de fois plus que ce que produisent les synchrotrons. Son champ électromagnétique étant 1 000 fois plus élevé que les champs qui lient les atomes les uns aux autres au

sein de la matière ou des molécules, un tel laser découpe facilement l'acier.

Le LCLS a un tel succès que ses gestionnaires ne peuvent répondre favorablement qu'à une demande d'utilisation sur quatre. Les scientifiques du site travaillent avec de grosses équipes de visiteurs (étudiants, postdoctorants et chercheurs confirmés) et tous sont engagés dans de véritables marathons de 12 heures par jour pendant cinq jours. Chaque microseconde compte.

Les lasers à rayons X servent dans toute une variété de recherches qu'il serait trop long de détailler ici. Pour en donner une idée, nous nous restreindrons ici à deux thèmes : le comportement de la matière dans des conditions extrêmes et l'imagerie ultrarapide de molécules. Ces thèmes sont tous deux intimement liés aux processus fondamentaux étudiés en physique atomique, moléculaire et optique.

Un atome visé par le faisceau du LCLS est l'un des exemples les plus simples de matière poussée dans un état extrême. C'est ce que l'on nomme un atome creux, car le faisceau ne lui fait pas perdre ses électrons d'un seul coup, mais l'évide par le fond. Les couches électroniques externes sont en effet quasi transparentes aux rayons X ; c'est la couche la plus interne qui absorbe ce rayonnement. Les deux électrons de cette couche sont éjectés, laissant un espace vide à la base du nuage électronique de l'atome. En quelques femtosecondes, deux électrons des couches supérieures viennent occuper les deux places vacantes, puis absorbent le rayonnement, de sorte que le processus d'évidement par l'intérieur de l'atome « creux » continue jusqu'à ce qu'il ne reste plus aucun électron. Ce processus est nommé relaxation Auger. Il se produit

imprimant aux électrons un mouvement en zigzags. Chaque fois qu'ils doivent changer de direction, les électrons émettent des rayons X, qui contribuent à les faire zigzaguer

davantage, de sorte que l'émission X produite s'autoamplifie. Cela produit *in fine* un faisceau exceptionnellement pur et intense.

ONDULEUR

Une série d'aimants de polarités alternées impriment des zigzags aux électrons. À chaque virage brusque, ces derniers émettent un rayonnement synchrotron, ici un faisceau de rayons X.

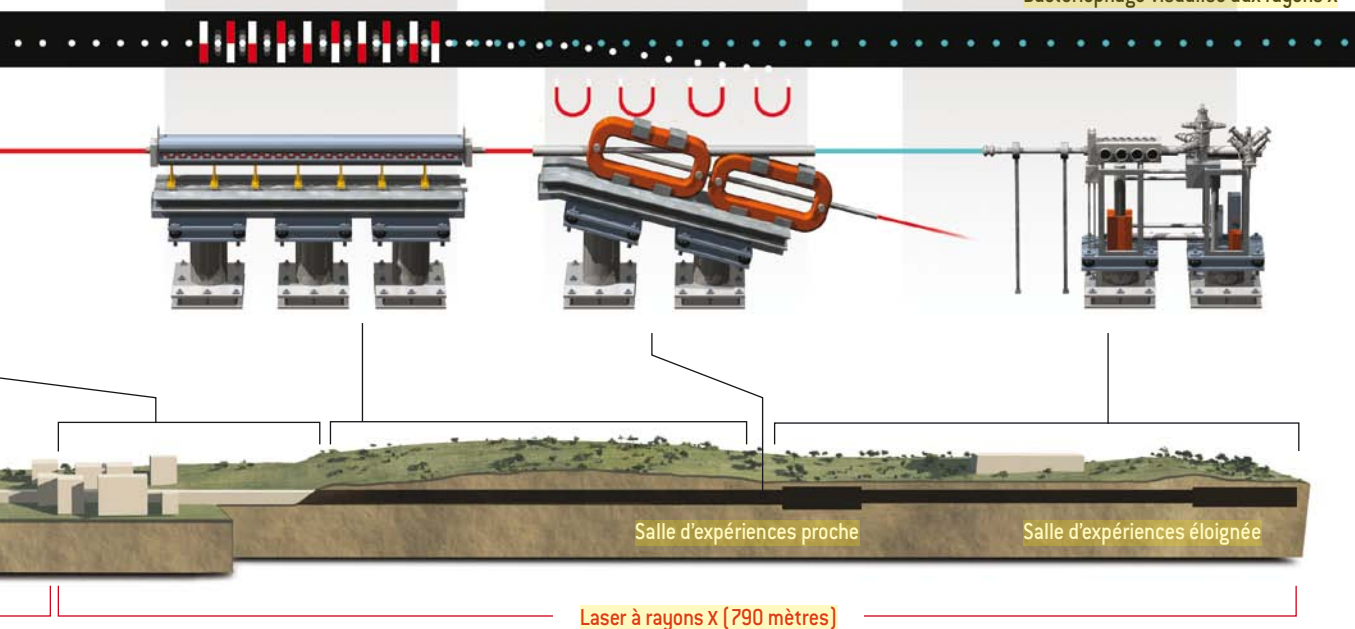
TRIEUR DE FAISCEAUX

Un puissant aimant dévie le faisceau d'électrons et laisse le faisceau de rayons X poursuivre son chemin.

SALLE D'EXPÉRIENCES

Les rayons X pénètrent la matière et y accomplissent leur tâche. Par exemple, ils livrent une image détaillée de la structure interne d'un virus (*ci-contre*).

Bactériophage visualisé aux rayons X



Laser à rayons X (790 mètres)



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.