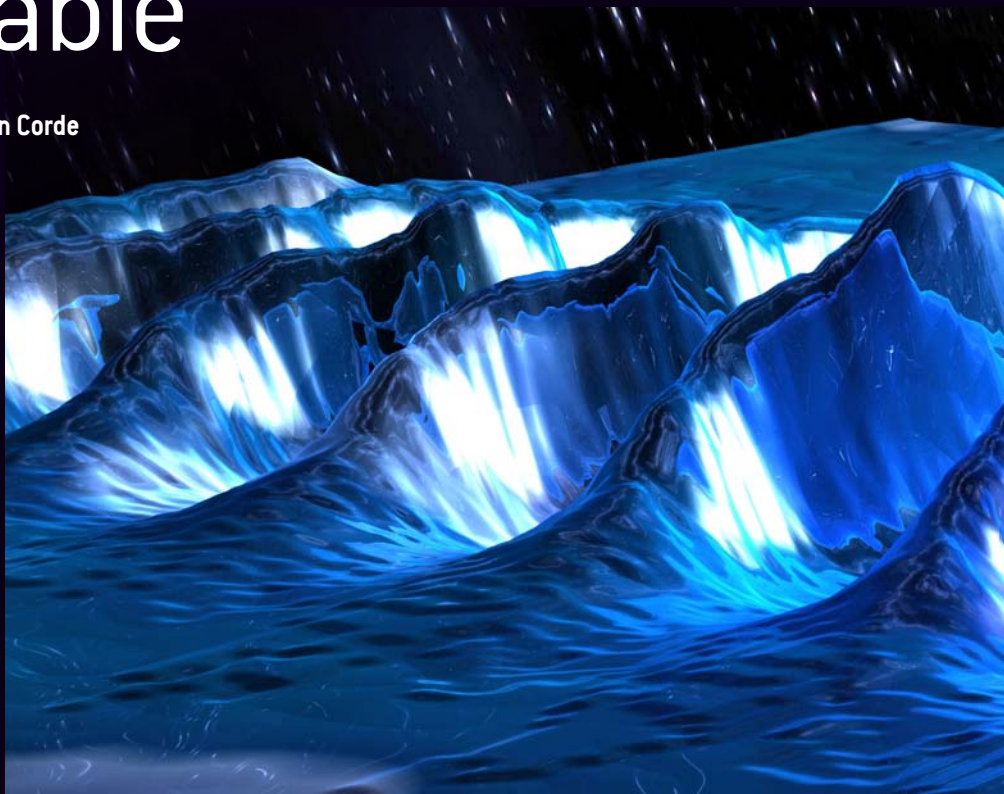


Produire des rayons X et γ sur une table

Kim Ta Phuoc, Cédric Thaury et Sébastien Corde

Grâce aux ondes de sillage créées par des impulsions laser ultrabrèves qui traversent un gaz, les chercheurs mettent au point des sources compactes et puissantes de rayons X ou gamma.



Imaginez un faisceau laser plus puissant que 100 000 réacteurs nucléaires. Seulement, pour le construire, nul besoin de bâtir des champs de centrales, car sa puissance n'est liée qu'à la brièveté de son impulsion ! En effet, une puissance est une énergie dépensée pendant un temps ; à énergie dépensée constante, si la durée du processus diminue, la puissance augmente. C'est ainsi qu'en tirant dans un gaz une impulsion laser ultrabrève d'une puissance instantanée de plusieurs dizaines de milliers de milliards de watts, les physiciens sont parvenus récemment à produire des faisceaux de rayons X et gamma (γ) ultrabrillants. Nommé accélérateur laser-plasma, ce nouveau type de source de rayonnement est encore en cours de développement,

mais il atteint ou dépasse déjà les performances des faisceaux produits au sein de ces accélérateurs circulaires de plusieurs centaines de mètres de circonférence que sont les synchrotrons. Il s'agit en fait d'un véritable synchrotron miniature de seulement quelques millimètres de long. Nous allons voir comment on obtient ces nouvelles sources compactes, intenses et d'un coût raisonnable, et à quoi leurs flashes de rayons X de seulement quelques milliardièmes de milliardième de seconde pourraient servir.

Pour explorer l'intimité de la matière et y agir, on utilise souvent des instruments de lumière. Le rayonnement X en fait partie. Ses longueurs d'onde sont de l'ordre de l'angström (10^{-10} mètre, ou 0,1 nanomètre), soit la distance intra-atomique caractéris-

tique. Des rayonnements électromagnétiques de ces longueurs d'onde peuvent révéler les structures atomiques et moléculaires. On peut par exemple déterminer l'arrangement des atomes dans la matière par diffraction de rayons X. Dans cette technique, un rayonnement X arrivant sur un échantillon est renvoyé dans diverses directions qui dépendent de l'arrangement des atomes dans la matière : on dit qu'il est diffracté. La figure de diffraction permet de déduire la position des atomes. On utilise très souvent la diffraction X pour étudier des matériaux ordonnés tels que les cristaux, mais cette technique fonctionne aussi pour étudier des liquides ou des milieux désordonnés.

Le rayonnement X a aussi un grand pouvoir de pénétration de la matière, mais



1. LE CHAMP ÉLECTRIQUE qui se forme dans un gaz atomique derrière une impulsion laser ultrabrève est montré ici sous la forme de vagues bleues que descendent des paquets d'électrons en voie d'accélération. C'est le principe des accélérateurs laser-plasma.

Agustín Lischitz, LOA

dépendant du matériau traversé. Il est faiblement absorbé par les matériaux peu denses et l'est fortement par les matériaux denses. Un rayonnement X de longueur d'onde égale à 0,4 angström traverse par exemple trois millimètres d'aluminium ou 40 centimètres de plastique. Cet effet permet d'obtenir des images dont le contraste dépend de l'absorption. C'est la radiographie classique, utilisée par exemple en médecine diagnostique, mais aussi dans l'industrie pour réaliser des contrôles non destructifs de pièces mécaniques.

Plusieurs types de sources de rayons X existent. Les plus communes, celles que l'on trouve dans les hôpitaux, sont des tubes à rayons X. Dans ces sources, le rayonnement X est obtenu

en bombardant des cibles métalliques avec des électrons accélérés, dont les collisions avec la matière produisent le rayonnement. Ce type de source a l'avantage d'être très compact et bon marché, mais le rayonnement produit n'est pas de bonne qualité. Émis dans toutes les directions, il doit être concentré ; il comporte toute une gamme de longueurs d'onde (il est donc peu cohérent) et la dimension importante de la zone d'émission limite la résolution des images radiographiques.

Quand les images doivent être plus précises, on préfère employer le rayonnement X produit par les synchrotrons. Développés dans les années 1940, ces instruments sont très utilisés par les chercheurs. Ils comprennent un

L'ESSENTIEL

- Dans un gaz atomique, une impulsion lumineuse ultrabrève et puissante crée un sillage de plasma.
- La séparation spontanée des charges électriques y accélère des électrons, qui émettent alors des rayons X ou γ .
- Comparables aux synchrotrons, ces nouvelles sources X et γ sont bon marché et devraient avoir la même utilité en recherche fondamentale.

Agustín Lischitz, LOA

dispositif capable de produire et d'accélérer des électrons jusqu'à des vitesses proches de la vitesse de la lumière et une structure périodique d'aimants – un « onduleur » – qui fait osciller ces électrons perpendiculairement à leur direction de propagation (voir la figure 2). Les accélérations subies par les électrons à chaque courbure de leur trajectoire ont pour effet de convertir une partie de l'énergie cinétique en rayonnement X. Le faisceau produit a des propriétés simples et intéressantes : il est émis vers l'avant sous la forme d'un cône peu divergent ; son énergie peut être contrôlée directement, en faisant varier soit l'énergie des électrons, soit la période de leurs oscillations. Ainsi, plus les électrons sont énergétiques, plus ils oscillent rapidement et plus le rayonnement émis sera énergétique, donc de courte longueur d'onde.

Pour atteindre la gamme des rayons X dans un synchrotron, on utilise généralement des électrons oscillant avec des périodes spatiales de quelques centimètres et progressant à des vitesses égales à quelque 0,9999999 fois celle de la lumière...

L'énergie d'électrons accélérés jusqu'à de telles vitesses atteint plusieurs gigaélectronvolts, c'est-à-dire un milliard d'électronvolts. Rappelons que l'électronvolt est l'énergie acquise par un électron accé-

VERS LES SYNCHROTRONS DE TABLE

- **1960** Le premier faisceau laser est obtenu d'un laser à rubis.
- **1979** L'accélération dans les plasmas est étudiée théoriquement.
- **1985** Débuts des lasers femtosecondes de puissance.
- **1995** Première démonstration d'un accélérateur laser-plasma.
- **2004** Premier faisceau de rayons X issu d'un accélérateur laser-plasma.
- **2012** Premier faisceau de rayons gamma issu d'un accélérateur laser-plasma.

léré à l'aide d'une tension électrique de un volt. En unités d'énergie, la masse de l'électron vaut 0,511 mégaélectronvolt (million d'électronvolts). Ainsi, lorsque l'énergie cinétique d'un électron atteint deux gigaélectronvolts, elle représente quelque 4000 fois l'énergie équivalente à sa masse... À titre de comparaison, à la température ambiante, l'énergie cinétique d'une molécule atmosphérique avoisine 0,04 électronvolt.

Filmer des atomes en mouvement

En France, il existe deux synchrotrons : SOLEIL sur le plateau de Saclay et l'ESRF à Grenoble. Ces grandes installations produisent du rayonnement allant de l'infrarouge (longueur d'onde micrométrique) aux rayons X (longueurs d'onde de l'ordre de l'angström). Ces machines sont très fiables et utilisées quotidiennement par de nombreux scientifiques de disciplines diverses. Elles ont donné lieu à de grandes avancées scientifiques et techniques portant sur la structure de la matière et du vivant. En 2009, le prix Nobel de chimie a par exemple récompensé des travaux où le rayonnement synchrotron avait été utilisé pour étudier la structure et la fonction des ribosomes, ces machines intracellulaires de synthèse des protéines mesurant environ 20 nanomètres et pouvant contenir jusqu'à 300 000 atomes... Pareilles avancées sont particulièrement utiles pour comprendre la façon dont sont faits et fonctionnent les êtres vivants.

2. DANS LES SYNCHROTRONS, des électrons sont injectés dans un anneau après avoir été amenés pratiquement à la vitesse de la lumière. À chaque virage dans un électro-aimant (*en bleu*), les paquets d'électrons émettent un rayonnement synchrotron, ensuite exploité dans les salles d'expériences. En amont de certaines salles sont disposées des alternances d'aimants – les onduleurs – où les électrons zigzaguent en émettant du rayonnement synchrotron. Ce dispositif augmente l'intensité du faisceau (*à droite*).

