

au cours d'impulsions de quelques femto-secondes. La focalisation de ces impulsions ultrabrèves sur des taches de quelques centièmes de millimètre concentre l'énergie dans l'espace et le temps, ce qui produit des champs électromagnétiques extrêmement intenses, capables d'arracher instantanément les électrons des atomes et de transformer ainsi en plasma un gaz ou un solide.

C'est dans ce plasma que sont produits les synchrotrons lasers. Leur principe physique est similaire à celui d'un synchrotron : il faut accélérer des électrons et les faire osciller pour qu'ils émettent du rayonnement. Toutefois, ici, tout se passe à une échelle beaucoup plus petite, car pour accélérer les électrons, on emploie l'onde plasma créée dans le sillage du faisceau laser. Dans ce sillage, le champ électrique de l'impulsion laser sépare les électrons des ions positifs. Cet écartement crée un champ électrique accélérateur pour les électrons qui lui sont extérieurs (*voir l'encadré page 50*). Tout se passe comme si un surfeur (un électron libre) descendait la vague de sillage d'un puissant navire (l'impulsion lumineuse), dont la pente jouerait le rôle du champ électrique (*voir ci-contre*). Ce surfeur pourrait ainsi suivre le navire à sa vitesse ; c'est ce que font les électrons accélérés puisqu'ils suivent l'impulsion à peu près à sa vitesse, celle de la lumière...

Des flashes X ultrabrèves...

Les électrons ainsi accélérés parviennent à des énergies dépassant le gigaélectronvolt en quelques millimètres seulement, alors qu'il faut des centaines de mètres pour obtenir la même énergie dans un accélérateur classique. La recherche expérimentale sur les accélérateurs laser-plasma a progressé très vite : alors que les faisceaux d'électrons étaient peu reproductibles et d'énergies modestes il y a quelques années encore, on parvient aujourd'hui à produire des faisceaux ayant des caractéristiques bien contrôlées et des énergies atteignant plusieurs gigaélectronvolts. Le développement technique souhaitable dans les prochaines années consistera à rendre ce type d'accélérateur aussi stable qu'un accélérateur classique, tout en visant des énergies plus importantes.

À partir de tels accélérateurs laser-plasma, on utilise aujourd'hui deux méthodes pour produire des faisceaux de rayons X,

Dans le sillage du laser

Le surf sur le sillage d'un bateau est une métaphore naturelle de l'accélération laser-plasma. L'impulsion lumineuse joue le rôle du bateau, la bulle ionique qui suit le flash est l'analogue de la vague de sillage, et le champ électrique accélérateur créé par les ions et les électrons est analogue à la pente de cette vague. Ainsi, tel un surfeur qui descend la vague de sillage à la vitesse du bateau, un électron est propulsé par le champ électrique quasiment à la vitesse de la lumière.



© Fredrik von Enckendorp/Corbis

toutes deux démontrées au Laboratoire d'optique appliquée (LOA, une unité mixte du CNRS, de l'ENSTA et de l'École polytechnique). La première est inhérente à l'accélérateur laser-plasma lui-même. Les électrons piégés et accélérés dans l'onde de sillage subissent également un champ électrique à symétrie axiale perpendiculaire au champ accélérateur. Ce champ fait osciller les électrons de part et d'autre de l'axe de propagation avec une période de l'ordre de la centaine de micromètres, ce qui conduit, exactement comme dans un synchrotron, à l'émission d'un flash de rayonnement X, que l'on appelle le rayonnement bêatron.

...et des flashes gamma

La longueur d'onde de ce rayonnement est de l'ordre de l'angström, soit la longueur d'onde intéressante pour de nombreuses applications. Il est émis dans un cône dont l'angle d'ouverture est de l'ordre du degré, et il ne dure que quelques femtosecondes. Cette courte durée est liée à la brièveté des paquets d'électrons accélérés dans le sillage. Le rayonnement bêatron a aussi la caractéristique très intéressante d'être émis depuis une toute petite surface, dont la taille est de l'ordre du micromètre. Cela rend possible la radiographie à très haute résolution ou encore la radiographie à contraste de phase, une méthode permettant de voir des détails invisibles en radiographie classique.

La seconde méthode permet de produire du rayonnement aux propriétés similaires au rayonnement bêatron, mais de longueurs d'onde bien plus courtes. Très récemment démontrée, elle nécessite une seconde impulsion laser intense issue du même système laser et se propageant dans le sens inverse des électrons. Quand elle rencontre les électrons, cette impulsion les fait osciller avec une période extrêmement courte. Des rayons gamma sont ainsi produits sous la forme de flashes des milliers de fois plus brillants que ceux de toute source existante dans cette gamme d'énergie (*voir l'encadré page 50*).

Cette nouvelle source de flashes gamma ultrabrèves ouvre des perspectives formidables de développement, car elle permet de produire avec un même instrument des faisceaux dans une large gamme spectrale, allant des rayons X aux rayons gamma. Il suffit pour cela d'ajuster l'énergie des électrons dans l'accélérateur laser-plasma,

BIBLIOGRAPHIE

V. Malka et al., Accélérateurs à plasma laser : principes et applications, *Reflète de la Physique* n° 33, mars 2013.

S. Corde et al., Femtosecond X rays from laser-plasma accelerators, *Reviews of Modern Physics*, vol. 85, p. 1, 2013.

C. Joshi, Surfer sur des ondes de plasma, *Pour la Science* n° 341, mars 2006.