

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 ultrabrefs...

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 Eichensdau Corbis

■ 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.

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 bêta-tron.

...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 bêta-tron 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 bêta-tron, 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 ultrabrefs 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,

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 !



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.



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