



2. LE FAISCEAU X
parcourt un tube reliant
les deux salles d'expé-
riences du laser à
électrons libres du Centre
de l'accélérateur linéaire
de Stanford, le SLAC.

avoir absorbé l'énergie d'une telle particule de lumière, un atome finit par la libérer spontanément. Mais quand ? Au début du XX^e siècle, Albert Einstein a découvert un moyen de déclencher cette émission : c'est ce que l'on nomme l'émission stimulée. Cet effet est exploité pour obtenir des lasers. Pour cela, il faut exciter en permanence toute une population d'atomes, c'est-à-dire leur faire absorber des photons d'énergie choisie. Un atome se désexcite en émettant un photon, lequel déclenchera l'émission, par un autre atome excité, d'un photon identique au premier et en phase ; le phénomène se poursuit ensuite et s'amplifie. C'est cette réaction en chaîne qui produit une émission laser cohérente et conséquente.

En réalité, la probabilité qu'un atome excité qui reçoit un photon incident émette un photon est assez faible. Dans la plupart des cas, l'atome libère spontanément l'énergie absorbée avant qu'une interaction avec un photon incident n'ait pu avoir lieu. Dans les lasers habituels, on surmonte cette limite en multipliant les occasions d'interaction. Pour cela, on place le milieu émetteur entre deux miroirs afin de multiplier les parcours des photons. Dans les lasers à hélium-néon des scanners de supermarché par exemple, un flot continu d'électrons entre en collision avec les atomes d'un gaz, et la lumière produite est renvoyée 200 fois par les miroirs afin de constituer un faisceau suffisant.

Abattre en vol des satellites et des missiles balistiques

Dans le cas d'un laser X, chaque étape de ce processus se complique. Un photon X contient facilement 1 000 fois plus d'énergie qu'un photon de lumière visible. Un atome recevant une telle particule de lumière doit donc absorber 1 000 fois plus d'énergie, qu'il ne pourra retenir bien longtemps. Un autre point est que des miroirs pour rayons X sont très difficiles à fabriquer. Bien que ces difficultés ne soient pas indépassables, elles signifient en pratique que, pour créer les conditions d'une émission laser X, une énorme quantité d'énergie est nécessaire.

Le premier laser X ayant jamais existé tirait son énergie d'un essai nucléaire souterrain. Il fut construit dans le cadre du projet secret *Excalibur* mis en œuvre par le Laboratoire américain Lawrence

Livermore, situé à l'Est de San Francisco. Ce projet constituait l'un des pans de l'Initiative de défense stratégique (dite « Guerre des étoiles »), lancée par le président Ronald Reagan dans les années 1980, dans le but d'abattre en vol des satellites et des missiles balistiques.

Durant ces années, le Laboratoire Lawrence Livermore a élaboré une première version de laser X non nucléaire en utilisant l'énergie fournie par les puissants lasers optiques construits pour tester les propriétés des armes nucléaires. Toutefois, il ne s'agissait pas encore d'instruments utilisables au quotidien dans la pratique de la recherche, possibilité qui semblait alors encore fort lointaine. On doit à l'Université Stanford la percée qui a permis de développer des lasers X civils. Depuis les années 1960, cette institution exploitait l'accélérateur linéaire d'électrons le plus

long du monde : le SLAC. Long de trois kilomètres, cet appareil servait alors à accélérer de denses paquets d'électrons jusqu'à des vitesses extrêmement proches de celle de la lumière.

Un onduleur géant

Il y a une dizaine d'années, l'agence de tutelle du SLAC a décidé de le convertir en ce que l'on nomme un laser à électrons libres. Le dispositif utilisé dans les synchrotrons modernes pour produire des faisceaux X intenses – un onduleur – a donc été ajouté au SLAC. Les onduleurs sont constitués d'une série d'aimants disposés de façon à créer un champ magnétique alternant. Les électrons qui les parcourent zigzaguent en émettant du rayonnement synchrotron à chaque virage. Dans les synchrotrons, les électrons circulent dans un anneau

où sont insérés des onduleurs. À chaque passage des électrons dans l'onduleur, le rayonnement X émis est dirigé vers une salle d'expériences.

L'accélérateur du SLAC a été doté d'un onduleur de pas moins de 130 mètres de long. Les électrons y circulent sur la même trajectoire rectiligne que les photons et presque à la même vitesse. Pour cette raison, de nombreux électrons se trouvent sur le chemin de photons X émis par ceux qui les précèdent de peu. Or le champ magnétique oscillant associé à ces photons contribue aussi à faire osciller les électrons. L'émission de rayonnement synchrotron s'amplifie ainsi, jusqu'à atteindre une valeur de saturation. Cette forme d'émission autostimulée produit un faisceau cohérent et d'une très grande luminosité, sans qu'aucun miroir à rayons X n'ait été nécessaire.

COMMENT LE LASER À ÉLECTRONS LIBRES LCLS FONCTIONNE

Alimenté par un accélérateur linéaire, le LCLS constitue une sorte de version gigantesque des canons à électrons des anciens téléviseurs, sauf qu'il accélère les électrons

jusqu'à des vitesses très proches de celles de la lumière. L'élément essentiel de la machine est constitué par un onduleur, c'est-à-dire une alternance de gros aimants

LASER PILOTE

Il envoie des impulsions de lumière ultraviolette pour extraire d'une cathode des bouffées d'électrons.

ACCÉLÉRATEUR

Des champs électriques accélèrent ces paquets d'électrons jusqu'à une énergie de 12 gigaélectronvolts. Pour cela, le LCLS utilise un tiers de la longueur totale de l'accélérateur du SLAC.

COMPRESSEUR DE PAQUETS 1

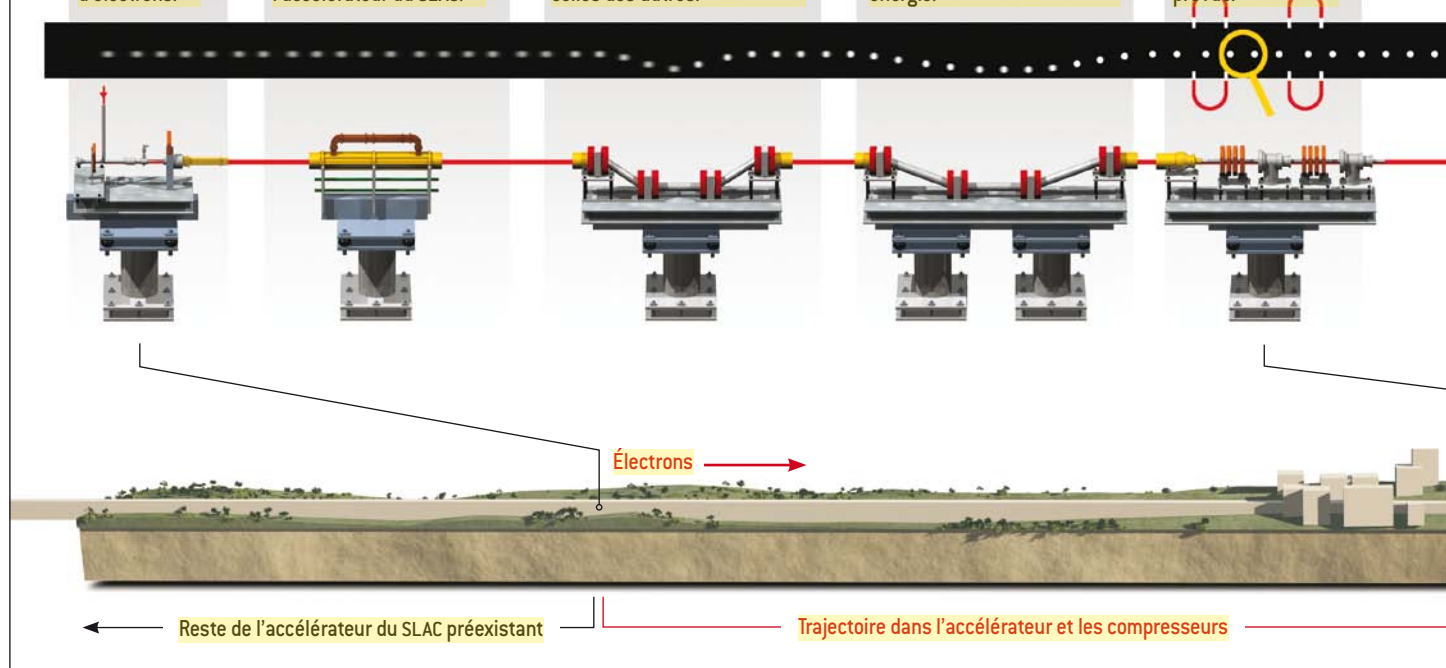
Les paquets d'électrons passent par une courbe en S. Son rôle est de constituer des paquets d'électrons volant ensemble, en éliminant les électrons dont les vitesses ne sont pas assez proches de celles des autres.

COMPRESSEUR DE PAQUETS 2

Après une nouvelle accélération, les paquets d'électrons entrent dans un second compresseur, qui doit être plus long que le premier puisque les électrons ont maintenant une plus grande énergie.

PRÉPARATEUR

Des aimants concentrent les impulsions, et l'on vérifie à l'aide de capteurs que les électrons sont bien sur la trajectoire prévue.



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

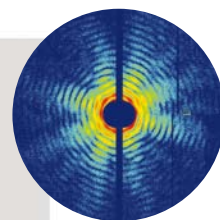
Une série d'aimants de polarités alternées impriment des zigzags aux électrons. À chaque virage brusque, ces derniers émettent un rayonnement synchrotron, ici un faisceau de rayons X.

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

