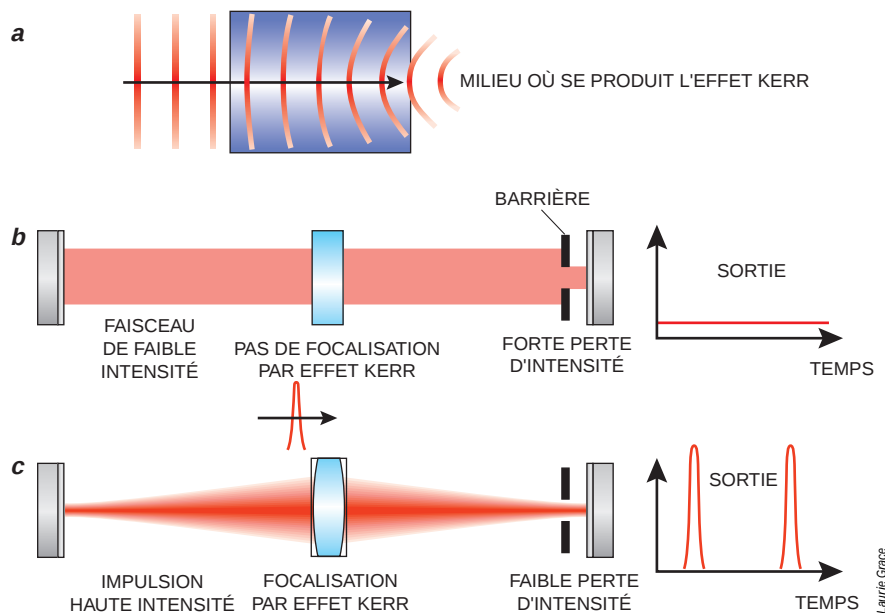


dopé au titane, mis au point par Peter Moulton, à l'Institut de technologie du Massachusetts. Ce cristal amplifie des longueurs d'onde comprises entre 700 et 1 100 nanomètres, et il émet des impulsions qui durent moins de quatre femtosecondes.

Avec ces nouveaux matériaux, la difficulté était la production d'impulsions périodiques où des millions de modes sont synchronisés. Un des premiers systèmes de production d'impulsions laser ultracourtes à l'aide de saphirs dopés au titane comprenait deux cavités optiques couplées dont on ajustait la longueur. Alors qu'ils mettaient au point cette technique, en 1989, les physiciens de l'Université de Saint Andrews, en Écosse, ont eu la surprise de constater que des impulsions étaient produites avec une seule cavité. Avec d'autres équipes de recherche, ils ont montré que cet «auto-blocage du mode» était lié à un effet optique, à l'intérieur du cristal de saphir dopé au titane. Ce phénomène, nommé effet Kerr, se produit dans un matériau transparent comme le verre ou le saphir dopé. Le champ électrique du faisceau focalisé sur le matériau produit un changement de son indice de réfraction, phénomène appelé biréfringence. De par ses changements de propriétés, la lumière de haute intensité se propage plus lentement que celle de faible intensité. L'intensité lumineuse du faisceau, maximale en son centre, décroît au fur et à mesure que l'on s'en éloigne, ainsi la lumière à la périphérie du faisceau se déplace plus vite que celle située en son centre. Ce phénomène, équivalent à celui du passage d'un faisceau dans une lentille convexe, s'appelle autofocalisation, ou focalisation résonante de Kerr (voir la figure 5). La focalisation résonante de Kerr favorise la formation de l'impulsion au détriment de l'impulsion lumineuse continue. Les modes s'ajoutent et l'impulsion devient de plus en plus importante. La focalisation résonante de Kerr a produit des impulsions ultracourtes réglables sur une large gamme de fréquences, à des niveaux de puissance encore jamais atteints (voir la figure 6). Cette technique est aujourd'hui le moyen le plus simple et le plus élégant de produire des impulsions de quelques femtosecondes. Les lasers à impulsions ultracourtes actuels ne sont que des perfectionnements du système initial.



5. L'EFFET KERR OPTIQUE entraîne une propagation plus lente de la lumière de forte intensité que de la lumière de faible intensité. Un milieu où se produit l'effet de Kerr agit comme une lentille convergente sur un faisceau de forte intensité (a). Une barrière munie d'un petit trou (b) élimine la partie laser continue, qui ne peut pas gagner suffisamment en intensité pour déclencher l'effet Kerr. Le milieu focalise une impulsion de forte intensité (c), de telle sorte qu'elle traverse le trou et que son amplification est alors maximale.

Nouveaux miroirs et nouvelles pompes

Une des innovations les plus importantes est l'utilisation de miroirs absorbants à base de semi-conducteurs : l'absorption supprime la réflectivité aux faibles intensités lumineuses ; en revanche, quand l'intensité est suffisante, l'absorbeur sature et la réflectivité du miroir augmente. En réfléchissant alors les fortes intensités plus efficacement, les miroirs favorisent la production d'impulsions dans la cavité plutôt que la sortie d'ondes continues. Parmi les nombreux modes formés dans la cavité, seuls ceux qui vibrent en phase, c'est-à-dire ceux dont l'intensité est maximale au même instant, ont ensemble une intensité suffisante pour saturer l'absorbant et le traverser (leurs amplitudes s'ajoutent). Les autres modes peuvent être partiellement ou complètement en opposition de phase et se détruire, conduisant à une intensité insuffisante pour traverser l'absorbant. L'avantage d'un tel mécanisme est que de faibles intensités qui vont s'additionner peuvent être à l'origine des impulsions. Ces lasers ont été mis au point, en 1991, par les chercheurs des Laboratoires AT&T Bell.

La découverte de ces mécanismes a simplifié l'utilisation des lasers à impulsions ultracourtes et a assuré un succès immédiat aux lasers femtose-

condes. Toutefois, les sources d'excitation, ou pompes, de ces lasers restaient insatisfaisantes. Tout comme un amplificateur de guitare a besoin de puissance électrique, un laser a besoin d'énergie électrique pour amplifier la lumière de son faisceau. Les cristaux de saphir dopés au titane étaient excités par un laser de pompage à onde continue : le faisceau de pompage excite des atomes du cristal, qui se dés excitent ensuite en émettant des photons qui s'ajoutent au faisceau pulsé. Les premiers lasers à saphir dopé étaient pompés par des lasers à argon, volumineux, qui consommaient une puissance électrique de plusieurs dizaines de kilowatts pour produire 10 à 20 watts d'une lumière bleu-vert. Les coûts étaient rédhibitoires.

Aujourd'hui, le pompage du saphir dopé au titane et des matériaux apparentés s'effectue à l'aide de lasers à semi-conducteurs, eux-mêmes pompés par des lasers à diode compacts de forte puissance. Ce système de pompage «en cascade» donne un rendement bien supérieur à celui des lasers à argon : on obtient jusqu'à dix watts de lumière verte dans un faisceau de meilleure qualité, à l'aide d'un système dix fois plus petit. En outre, le coût de fonctionnement est bien inférieur, et le système peut être branché sur une simple prise de courant.

Le temps, l'espace et l'énergie

Que de chemin parcouru, de l'énoncé par Einstein en 1917 du principe de l'émission stimulée à la mise en évidence expérimentale de l'effet laser, en 1960, et enfin à la génération des lasers à impulsions femtosecondes. En Europe, les premières impulsions optiques d'une centaine de femtosecondes ont été obtenues à la fin des années 1970 par une équipe de physiciens du Laboratoire d'optique appliquée de l'École nationale supérieure des techniques avancées et de l'École polytechnique. Aujourd'hui, les efforts se concentrent sur la caractérisation d'impulsions de plus en plus courtes, entre 10 et 30 femtosecondes, et sur l'optimisation des phénomènes d'amplification. Les techniques de plus en plus perfectionnées fournissent une densité d'énergie par impulsion considérable, ciblée sur un échantillon solide, gazeux ou liquide. La matière est ainsi sondée ou manipulée dans tous ses états.

Les effets engendrés par les impulsions femtosecondes dépendent de la façon dont l'énergie des photons est déposée dans le milieu. Une impulsion femtoseconde de dix gigawatts émise dans le rouge contient jusqu'à trois millions de milliards (3×10^{15}) de grains de lumière. Dès lors, pourquoi une impulsion femtoseconde focalisée sur un millimètre carré de peau et dont la puissance instantanée serait de quelques gigawatts (un surgénérateur nucléaire délivre une puissance moyenne 1 000 fois inférieure) ne provoque-t-elle rien de plus qu'un petit picotement ? Pourquoi un matériau inerte soumis à une impulsion de quelques terawatts (10^{12} watts) se transforme-t-il en plasma (gaz dense constitué d'électrons et d'ions très localisé dans l'espace) avant d'émettre des rayons X ?

A la vitesse de la lumière, un photon traverse une molécule de 0,3 nanomètre de diamètre en un centième de femtoseconde. Si la molécule vibre à la fréquence de 10^{14} cycles par seconde, le photon n'explore qu'un millième de la vibration. En revanche, les innombrables photons d'une impulsion d'une centaine de femtosecondes peuvent entrer en résonance avec cette molécule et en modifier le comportement. Les physiciens de l'École polytechnique et de l'Université Paris 6 ont ainsi étudié, dans l'eau, l'excitation des liaisons hydrogène par des impulsions infrarouge femtosecondes. Ils ont suivi, en temps réel, le mouvement de ces liaisons, qui confèrent à l'eau ses propriétés physiques étonnantes.

La durée de l'impulsion est un paramètre essentiel, au même titre que l'énergie ou la densité de photons. Des rayons X mous aux rayons T, l'énergie s'étend du milliélectronvolt au kiloelectronvolt, gamme d'énergie qui autorise de nombreuses expériences : une fraction de milliélectronvolt modifie la rotation d'une molécule, quelques électronvolts arrachent un électron périphérique d'un atome, ou cassent une liaison interatomique dans une molécule ; quelques kiloelectronvolts perturbent l'arrangement des électrons des couches profondes d'un atome. En dépouillant progressivement les atomes de leur cortège électronique, les physiciens découvrent de nouveaux comportements de la matière. Ainsi, grâce à une impulsion laser de 120 femtosecondes focalisée sur du

silicium et dont l'intensité était de l'ordre de 10^{16} watts par centimètres carrés, des chercheurs du laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses de l'École polytechnique ont réalisé une spectroscopie détaillée d'un plasma de silicium. Ils ont observé de nouveaux comportements électroniques du plasma dont la dynamique est comparable à celle de l'impulsion laser. Ils ont également produit par l'interaction d'impulsions femtosecondes sur un gaz, des bouffées ultrabrèves d'électrons relativistes et très énergétiques. Avec d'autre méthode, par exemple la source européenne synchrotron de Grenoble, on obtient des paquets d'électrons, également très énergétiques, mais d'une durée supérieure (de 150 à 190 picosecondes).

Un siècle après la découverte des rayons X et de la radioactivité, on maîtrise les énergies considérables libérées par le noyau atomique pour des applications médicales ou industrielles. Une des applications les plus intéressantes de l'interaction des lasers femtosecondes intenses avec la matière, est la génération d'impulsions femtosecondes dans le spectre X. Des chercheurs du Laboratoire d'optique appliquée ont ainsi obtenu des images résolues en temps montrant des mouvements d'atomes ou de molécules. Les impulsions femtosecondes de plus en plus courtes et de plus en plus énergétiques complètent la panoplie des outils disponibles. Ces impulsions laser sont des micro-outils dont les caractéristiques sont conditionnées par l'énergie des photons et par leur densité spatio-temporelle. Chaque type d'impulsion femtoseconde contenant un paquet d'ondes est adapté à l'étude ou à la manipulation d'objets tels que des atomes, des molécules, des puces de semi-conducteurs ou encore des cellules vivantes.

Des impulsions femtosecondes infrarouges sont utilisées pour le développement d'un microscope à balayage laser par des physiciens du Centre de physique moléculaire de Bordeaux. Dans le microscope à balayage classique, un faisceau d'électrons « balaie » la surface de l'échantillon ; ici, le faisceau d'électrons est remplacé par un faisceau laser ultracourt. Le faisceau est focalisé, à différentes profondeurs, selon des « plans de coupe » différents de l'objet observé. Grâce à des logiciels de reconstruction, on obtient des images tridimensionnelles de l'objet. L'équipe de Bordeaux a ainsi reconstitué, à partir de plans de coupe séparés de 0,2 micromètre, des images tridimensionnelles, de bonne qualité, d'organismes unicellulaires ou de cellules nerveuses embryonnaires. Cette méthode a l'intérêt notable de préserver l'échantillon : c'est une méthode intéressante pour procéder à des analyses non destructives.

La femtochimie et la femtobiologie suivent, en temps réel, les transformations des atomes et des molécules lors de réactions. Les sources femtosecondes offrent un accès à une visualisation temporelle des électrons, des atomes et des molécules. Dans une relation espace-temps-énergie, les lasers femtosecondes « visualisent » la transformation de la matière en temps réel et à l'échelle de l'infiniment petit.

Yann GAUDUEL, INSERM, Laboratoire d'optique appliquée ENSTA-École polytechnique