

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

Pompage direct

Aujourd'hui, les physiciens cherchent encore des perfectionnements. Notamment, ils voudraient éviter l'emploi du laser à semi-conducteurs intermédiaire et pomper directement le laser à impulsions ultracourtes avec un laser à diode. Les systèmes seraient alors plus petits et plus efficaces. Toutefois, des difficultés subsistent : les lasers à diode, initialement utilisés pour le pompage d'autres cristaux, produisent des longueurs d'onde et des puissances inadaptées au pompage direct du saphir dopé au titane. Pourrait-on remplacer le saphir dopé par d'autres cristaux ? On étudie aujourd'hui les «colquirites», qui doivent leur nom aux mines d'étain de Colquiri, en Bolivie, où elles ont été découvertes. Les colquirites dopées au chrome oscillent sur une gamme de longueurs d'onde comparable à celle du saphir dopé et elles peuvent être pompées directement par les classiques lasers à diode rouges. Des colquirites d'excellente qualité optique, synthétisées à Livermore, ont permis la mise au point de cavités à impulsions ultracourtes plus efficaces.

Dans notre laboratoire, nous avons notablement amélioré l'efficacité des lasers à impulsions ultracourtes pompés directement par diode en réduisant la puissance de pompage nécessaire pour le fonctionnement du laser en verrouillage de mode et en pompant les cristaux à l'aide de diodes de faible puissance, semblables à celles des lecteurs de DVD. En optimisant les optiques de la cavité laser, nous avons minimisé les pertes. Nous avons ainsi fait fonctionner des systèmes de moins de 20 centimètres de longueur à l'aide de piles LR6 standards (voir la figure 6). Nos lasers produisent des impulsions de 100 femtosecondes avec des puissances moyennes de 10 milliwatts. Leur consommation électrique (un watt) est 100 fois inférieure à celle des lasers à colorants et à verrouillage de mode de puissance équivalente.

De petits lasers à fibres optiques émettent également des impulsions de quelques femtosecondes non ajustables ; leur milieu amplificateur est une courte fibre optique dopée. Les lasers de ce type sont de bonnes sources compactes d'impulsions femtosecondes et sont adaptés à certaines applications industrielles émergentes. Au début de l'an 2000, des ingénieurs de la Société IMRA America ont annoncé

des puissances moyennes de sortie supérieures à dix watts, pour des lasers à fibres à impulsions femtosecondes.

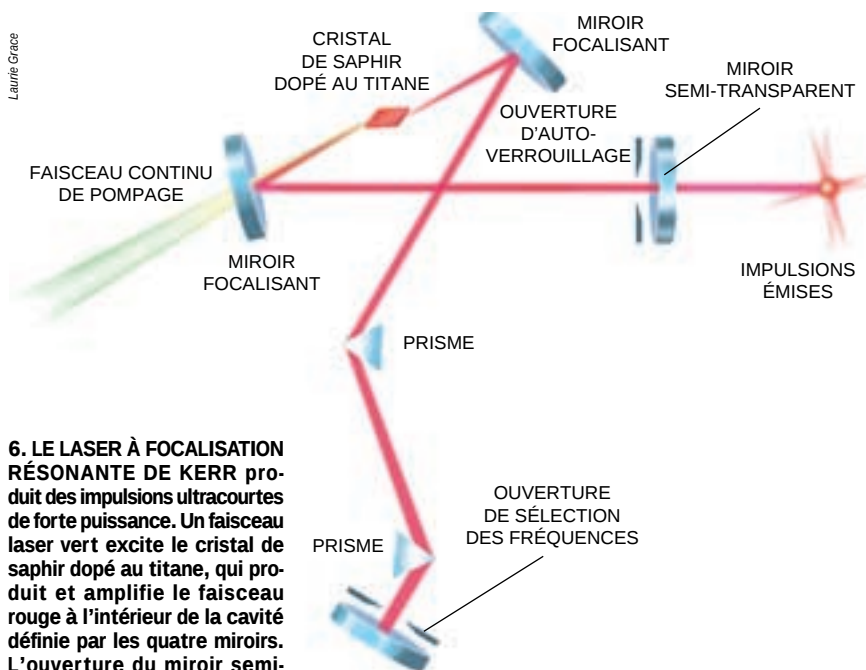
Le *nec plus ultra* en matière de compacité sera l'arrivée de lasers à diodes qui produiront directement des impulsions de quelques femtosecondes. Cependant, la génération actuelle de lasers à impulsions ultracourtes à semi-conducteurs a déjà permis à cette catégorie de lasers de sortir des laboratoires spécialisés pour devenir des outils aux applications concrètes.

La puissance suprême

Aux hautes énergies, l'intensité maximale des impulsions ultracourtes endommage l'optique classique des lasers en modifiant les propriétés du milieu ou, même, en le cassant par émission de décharges électriques dans la cavité optique (de ce fait, on espère utiliser des impulsions ultracourtes de forte puissance pour provoquer la décharge de nuages d'orage par ionisation d'un

chemin conducteur dans l'air). Aussi les intensités des lasers focalisés sont-elles longtemps restées limitées à environ 10^{15} watts par centimètre carré. En 1985, à l'Université de Rochester, Gérard Mourou et Donna Strickland ont mis au point une technique d'étirement de l'impulsion par dérive de fréquence (ou CPA en anglais pour *Chirped-Pulse Amplification*), qui évite les intensités excessives par allongement des impulsions. Ainsi allongées, les impulsions sont amplifiées sans risque pour le milieu amplificateur et pour les autres éléments d'optique ; puis les impulsions étirées et amplifiées sont recompressées grâce à des systèmes nommés grilles de diffraction dans le vide.

Les premiers modèles comportaient plusieurs étapes d'étirement temporel, d'amplification, puis de compression temporelle ; les systèmes étaient encombrants. Aujourd'hui, nous disposons de lasers plus petits, de quelques térawatts (10^{12} watts) avec des faisceaux de sortie dont l'intensité



6. LE LASER À FOCALISATION RÉSONANTE DE KERR produit des impulsions ultracourtes de forte puissance. Un faisceau laser vert excite le cristal de saphir dopé au titane, qui produit et amplifie le faisceau rouge à l'intérieur de la cavité définie par les quatre miroirs. L'ouverture du miroir semi-transparent supprime la partie continue du laser et le faisceau traverse des prismes qui corrigent la dispersion. La position de l'ouverture sur l'un des miroirs règle la fréquence de la lumière en ne laissant passer que la portion souhaitée du spectre de la lumière rouge. Les impulsions sortent par le miroir semi-transparent. Des appareils compacts ont révolutionné les applications potentielles des lasers à impulsions ultracourtes. Le dispositif représenté ici (photographie à droite) tiendrait sur une page de cette revue. Il est alimenté par de simples piles LR6, et délivre des impulsions lumineuses d'un demi-kilowatt (une balle de golf (la sphère blanche à gauche du dispositif) est représentée pour visualiser l'échelle).

