

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.

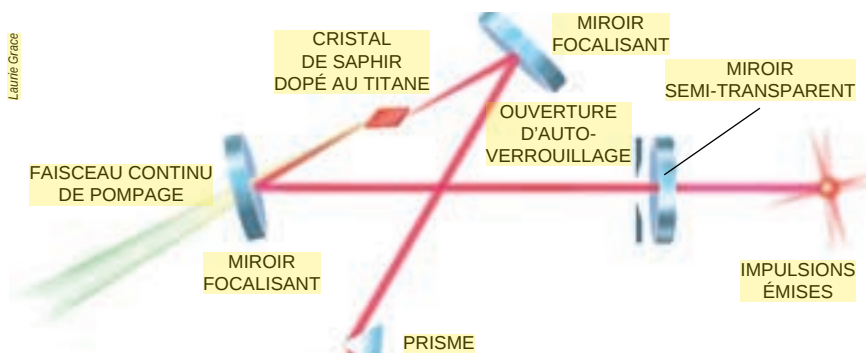
Le *nec plus ultra* en matière de compacité sera l'arrivée de lasers à diodes qui produiront directement des impulsions de quelques femtosecondes. Cependant, la génération actuelle de lasers à impulsions ultracourtes à semi-conducteurs a déjà permis à cette catégorie de lasers de sortir des laboratoires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

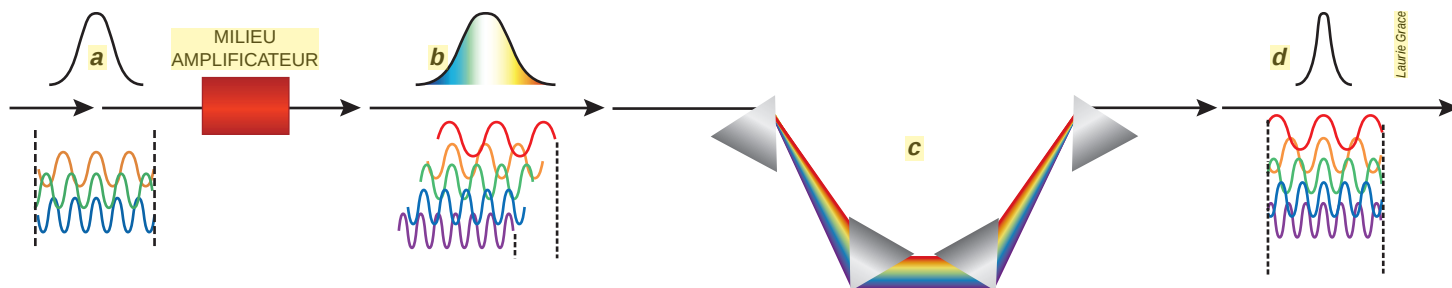
chemin conducteur dans l'air). Aussi les intensités des lasers focalisés sont-elles longtemps restées limitées à environ 10^{15} watts par centimètre carré. En 1985, à l'Université de Rochester, Gérard Mourou et Donna Strickland ont mis au point une technique d'étirement de l'impulsion par dérive de 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).





7. LES IMPULSIONS INTENSES ÉVOLUENT à chaque passage dans la cavité d'un laser à impulsions ultracourtes sous l'influence de plusieurs effets. Quand une impulsion (a) traverse un milieu amplificateur, des effets non linéaires ajoutent des ondes de fré-

quence supérieure aussi bien qu'inférieure, et la dispersion étale les différentes longueurs d'onde de lumière (b). Un système de prismes (c) peut réaligner tous les modes, produisant une impulsion plus courte.

est considérable (10^{18} watts par centimètre carré). À l'aide de ces lasers, on obtient des plasmas qui peuvent à leur tour produire des impulsions ultracourtes de rayons X mous et cohérents, utiles pour la microscopie et la lithographie. À l'intérieur de ces plasmas, les champs électriques sont très élevés et les électrons ont un comportement relativiste : des explorations de physique fondamentale sont envisageables.

De gros appareillages ont délivré des faisceaux qui ont déposé une puissance lumineuse de 2×10^{21} watts par centimètre carré sur des cibles, avec une puissance de quelques pétawatts (10^{15} watts), 1 000 fois supérieure à la puissance dissipée par un éclair. Par des effets de pression de radiation, notamment, ces lasers accélèrent la matière 10^{22} fois plus que la gravitation terrestre, ce qui correspond à une accélération bien supérieure à celle que des corps subiraient à proximité d'un trou noir de la masse du Soleil ! Ils procurent des températures et des pressions comparables à celles de l'intérieur d'une étoile, laissant envisager des études de dynamique stellaire. En travaillant avec des intensités focalisées de 10^{30} watts par centimètre carré, les physiciens espèrent créer des paires de particules et d'antiparticules, et ils prévoient d'étudier le domaine de l'électrodynamique quantique, qui décrit le comportement quantique de particules chargées et du champ électromagnétique quantifié.

D'autre part, les physiciens tirent parti de la brièveté des impulsions. Certains ont utilisé la large bande spectrale des impulsions de moins de dix femtosecondes pour la mesure précise des fréquences optiques. Les modes d'un laser en verrouillage de mode sont espacés uniformément, comme les dents d'un peigne (voir la figure 4). Ce

«peigne» peut servir de référence pour la mesure de fréquences difficiles à évaluer directement. L'utilisation de cette technique permet de mesurer des énergies de transition atomique optique avec une précision mille fois meilleure que tout ce qui se faisait jusqu'à maintenant. Certaines constantes de la physique peuvent ainsi être déterminées : une de ces expériences a déterminé la «constante de structure fine» qui caractérise l'intensité de la force électromagnétique avec une précision de 120 pour un milliard.

Le record de brièveté des impulsions est aujourd'hui inférieur à cinq femtosecondes : il est détenu par des lasers à saphir dopé au titane, à l'École polytechnique de Zurich et à l'Institut de technologie du Massachusetts. Jusqu'à présent, les impulsions ultracourtes étaient décrites par une théorie où l'enveloppe des impulsions variait lentement comparée aux oscillations de la lumière, mais l'enveloppe des impulsions de cinq femtosecondes ne contient que deux périodes : on atteint donc les limites de la théorie. Bientôt, la durée de l'impulsion sera inférieure à celle d'une période.

Les lasers à impulsions ultracourtes, avec une gamme de puissance qui s'étale sur plus de 17 ordres de magnitude, sont présents dans de nombreuses disciplines scientifiques et techniques, de l'imagerie en profondeur des tissus vivants à l'élucidation de questions fondamentales sur l'Univers. Il y a quelques années, les impulsions femtosecondes ont permis l'observation de mécanismes moléculaires et de mouvements d'atomes ; de même, les impulsions de quelques attosecondes (une attoseconde vaut un millième de femtoseconde) montreront les mouvements des électrons, des protons et des neutrons.

Les nouveaux lasers gagneront progressivement tous les domaines. Après la médecine avec l'imagerie biologique et la chirurgie, ils devraient conduire à des découvertes pharmaceutiques importantes, révélant par exemple les mécanismes de certains médicaments. En micro-électronique, ils assureront la commande cohérente du courant électrique dans les composants à semi-conducteurs et dans les réseaux de communications optiques numériques.

Quand le laser fut inventé, certains l'ont qualifié de «solution à la recherche d'un problème». Aujourd'hui, les lasers sont omniprésents dans les lecteurs de codes à barres des supermarchés, dans les lecteurs de disques compacts, etc. Depuis leur apparition au milieu des années 1960, les lasers à impulsions ultracourtes s'imposent également, du laboratoire à la vie courante. Ils sont aujourd'hui la meilleure solution à nombre de problèmes concrets et participeront demain à l'amélioration de la qualité de vie.

John-Mark HOPKINS est physicien à l'Université de Saint Andrews, en Écosse. Wilson SIBBETT est professeur dans la même université et membre du Conseil d'ingénierie et de sciences physiques du Royaume-Uni.

Gérard A. MOUROU, Christopher P.J. BARTY et Michael D. PERRY, *Ultra-high-Intensity Lasers : Physics of the Extreme on a Tabletop*, in *Physics Today*, vol. 51, n° 1, pp. 22-28, janvier 1998.

Henry KAPTEYN et Margaret MURNANE, *Ultrashort Light Pulses : Life in the Fast Lane*, in *Physics World*, vol. 12, n° 1, pp. 31-35, janvier 1999.

Don ARNONE, Craig CIESLA et Michael PEPPER, *Terahertz Imaging Comes into View*, in *Physics World*, vol. 13, n° 4, pp. 35-40, avril 2000.
