

DE L'ULTRA-RAPIDE À L'ULTRA-INTENSE : DE NOUVEAUX CHAMPS D'ÉTUDES

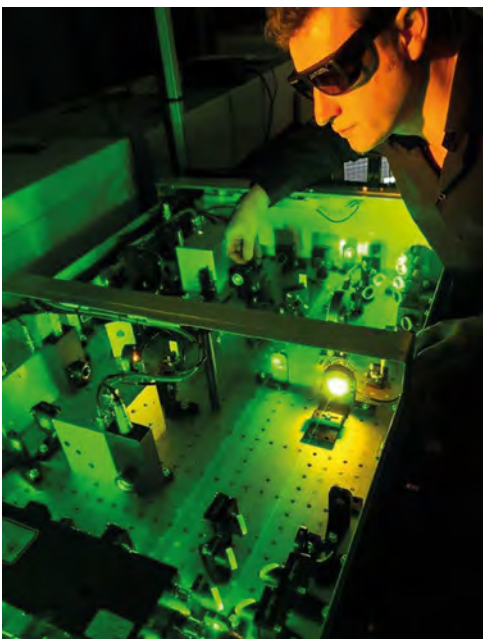
**Sandrine DOBOSZ DUFRENOY¹, Thierry RUCHON¹, Henri VINCENTI¹, David BRESTEAU¹, Pascal MONOT¹,
Hugo MARROUX¹, Romain GENEUX¹, Karol HRICOVINI^{1,2}, Pascal SALIERES^{1,*}**

¹ Université Paris-Saclay, CEA, CNRS, LIDYL, 91191 Gif-sur-Yvette, France

² LPMS, CY Cergy Paris Université, 95031 Cergy-Pontoise, France

*pascal.salieres@cea.fr

© Ph. Stroppa/CEA



Le développement spectaculaire des lasers de puissance ces trente dernières années a ouvert de nouveaux champs d'études : la science attoseconde d'une part, l'optique relativiste d'autre part. Nous illustrons les nouvelles perspectives ouvertes dans divers domaines de la physique, la chimie, la médecine ou la science des matériaux à partir d'études effectuées sur les plateformes ATTOLab et UHI100 du Laboratoire Interactions, Dynamiques et Lasers (LIDYL) du CEA Paris-Saclay.

<https://doi.org/10.1051/photon/202311840>

Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation correcte de la publication originale.

Depuis la découverte en 1985 de la technique d'amplification à dérive de fréquence (Chirped Pulse Amplification - D. Strickland et G. Mourou, Prix Nobel 2018), la puissance laser disponible dans les laboratoires n'a cessé de croître, délivrée dans des impulsions de plus en plus courtes

et de mieux en mieux maîtrisées. Il est possible aujourd'hui de façonner les faisceaux à l'aide de « miroirs plasmas » ou de contrôler le champ électrique des impulsions à l'échelle du cycle optique. Nous exploitons au LIDYL ces deux aspects, brièveté et puissance, pour développer deux champs exploratoires de la physique: la science attoseconde et l'optique relativiste.

L'ULTRA-RAPIDE: LA SCIENCE ATTOSECONDE

L'avènement des lasers aux impulsions intenses et brèves, entrant dans le régime femtoseconde, a conduit à la découverte d'un régime non perturbatif de l'interaction laser-matière, posant les bases de l'optique non linéaire extrême. En 1987 fut observée au CEA-Saclay la génération des harmoniques d'ordre élevé d'un

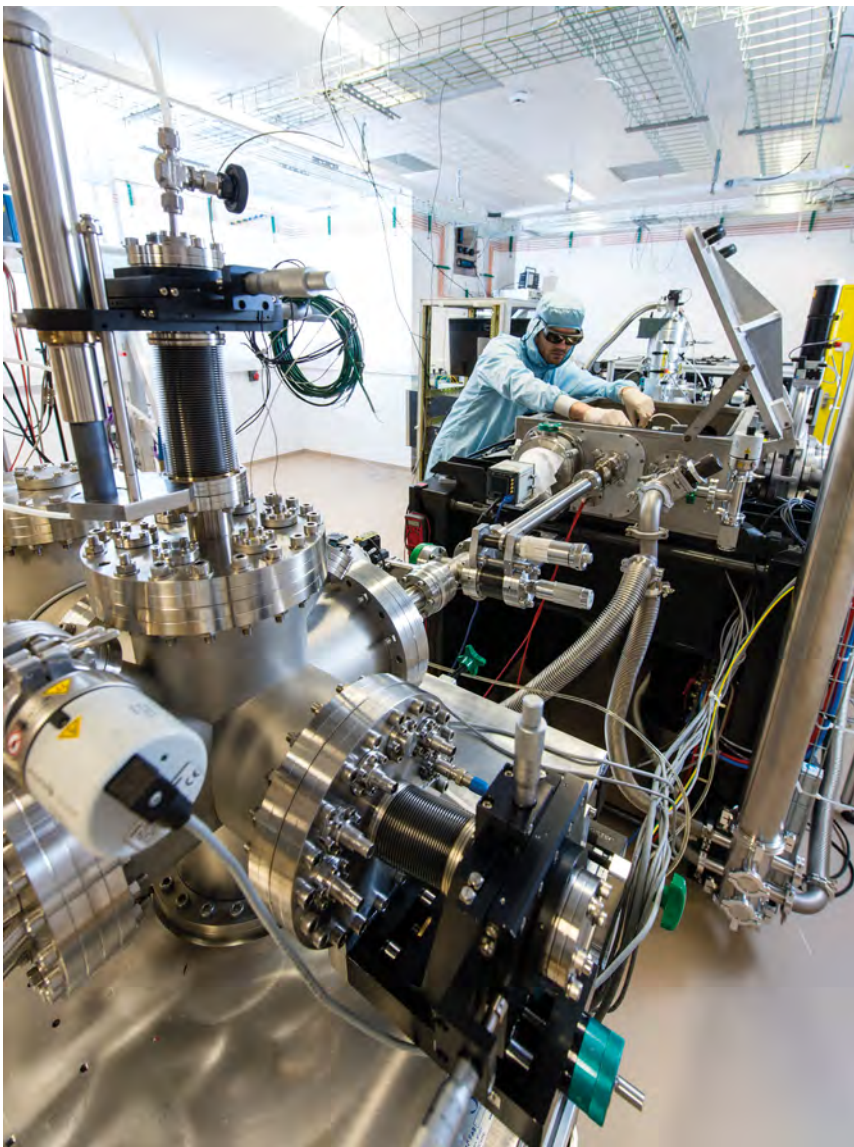
laser infrarouge intense focalisé dans un gaz atomique, c'est-à-dire l'émission des fréquences multiples de la fréquence laser, convertissant le rayonnement de façon cohérente dans l'extrême ultraviolet (XUV) tout en comprimant sa durée. En 2001, il était démontré que ce processus fournissait une source d'impulsions de durée attoseconde ($1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$), ouvrant un nouveau champ d'études, à l'échelle de temps naturelle des mouvements électroniques dans la matière [1]. Le développement fulgurant du domaine a conduit à la construction de nombreuses

infrastructures attosecondes dans le monde, la France disposant de plusieurs plateformes de pointe hébergées par 4 laboratoires: le CELIA à Bordeaux, l'ILM à Lyon, le LOA à Palaiseau et le LIDYL à Saclay (figure 1).

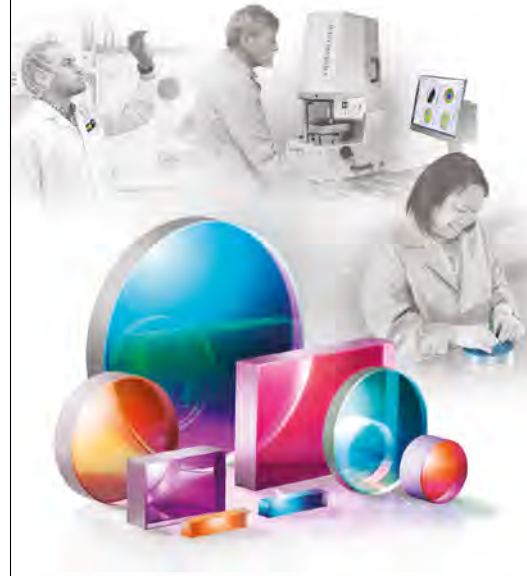
Des sources XUV attosecondes toujours mieux contrôlées

Longtemps limitée à la génération de faisceaux XUV quasi-gaussiens polarisés linéairement et au front d'onde sphérique, la physique attoseconde s'est enrichie ces dernières années ●●●

Figure 1. Ligne de lumière attoseconde de la plateforme ATTOLab (CEA, CNRS, Université Paris-Saclay), installée sur le laser FAB1 (laser Titane:Saphir délivrant des impulsions de 15 mJ, 25 fs à 1 kHz). © Ph. Stroppa/CEA.



L'OPTIQUE EST NOTRE AVENIR



OPTIQUES LASER d'Edmund Optics®

Edmund Optics® conçoit et fabrique une gamme complète de composants optiques adaptés aux applications laser.

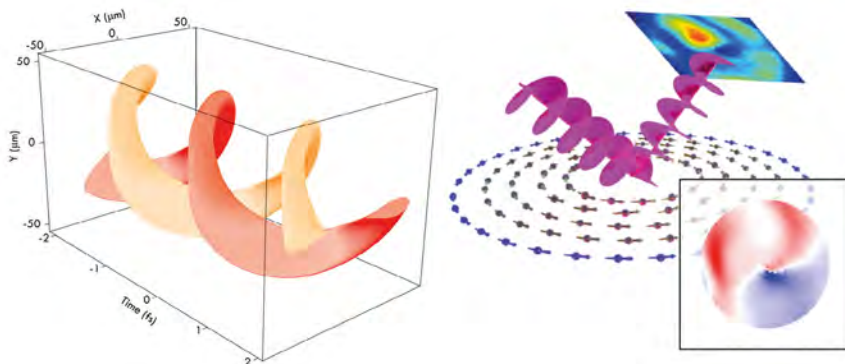
- ✓ Un grand inventaire en stock
- ✓ Métrologie de pointe
- ✓ Capacités de traitement avancées
- ✓ Fabrication sur mesure disponible

Pour en savoir plus sur nos optiques laser, rendez-vous sur:

www.edmundoptics.fr/LO



+33 (0) 820 207 555
sales@edmundoptics.fr



de nombreuses possibilités de contrôle. Il est d'abord possible d'agir sur les conditions de génération, en structurant le front d'onde du laser fondamental, sa polarisation, ou en superposant plusieurs faisceaux portant des propriétés différentes. Par exemple, l'insertion d'une lame de phase en spirale communique un moment angulaire orbital au laser fondamental qui est transféré aux faisceaux XUV (figure 2), produisant des impulsions à front d'onde hélicoïdal, avec des applications prometteuses pour l'étude d'espèces chirales ou de structures magnétiques. En utilisant plusieurs impulsions laser fondamentales portant des moments angulaires

Figure 2. (Gauche) Structure spatio-temporelle en double hélice du champ électrique XUV issu de la génération d'harmoniques d'ordre élevé avec un faisceau portant un moment angulaire orbital. L'épaisseur de chaque isocontour a une durée de l'ordre de 200 as. (Droite) Exemple d'utilisation d'un faisceau XUV portant un moment angulaire orbital pour la détection du sens de circulation d'un vortex magnétique. En haut est représentée l'image de l'intensité directe après réflexion sur le vortex magnétique et en bas, la différence des deux images obtenues avec deux vortex s'enroulant dans des sens opposés.

Figure 3. Alignement du dispositif de correction du profil temporel des impulsions lumineuses issues de la chaîne laser UHI100 (CEA/LIDYL). Le caisson comprend en particulier un jeu de deux miroirs plasmas. L'installation expérimentale exploite le laser de classe 100 TW (énergie de 2,5 J et 25 fs de durée d'impulsion) pour étudier l'interaction laser-plasma à Ultra-Haute Intensité (UHI). © L. Godart/CEA

orbitaux différents, il est même possible d'ajuster à loisir la valeur du moment orbital de l'impulsion XUV. Nous disposons également, en utilisant deux impulsions portant un moment angulaire de spin, de sources XUV attosecondes polarisées circulairement, adaptées à l'étude de dichroïsmes circulaires magnétiques.

Il est ensuite possible d'effectuer un contrôle 'aval' des propriétés de la source attoseconde grâce à de nouvelles optiques XUV. Ce domaine spectral, notoirement difficile, a récemment connu des progrès considérables. Des miroirs multicouches aperiodiques à trois composants (calculés et déposés au Laboratoire Charles Fabry) permettent aujourd'hui d'ajuster le spectre d'une source attoseconde tout en préservant sa durée. Il est également possible, au prix de pertes contrôlées, de disposer de l'équivalent d'une lame



quart d'onde par réflexion. De nombreuses applications deviennent possibles grâce à cette nouvelle flexibilité des sources attosecondes.

Physico-chimie attoseconde

Dans les années 90, les développements de la femtochimie ont révélé qu'à cette échelle de temps, les mouvements atomiques ne peuvent être considérés indépendants de ceux des électrons, questionnant l'approximation de Born-Oppenheimer, l'un des piliers de la chimie. À l'échelle attoseconde au contraire, les noyaux atomiques sont réellement figés et les électrons seuls en mouvement. Ainsi, en couplant une source attoseconde avec une détection résolue angulairement, il est possible de reconstruire le film 3D de la photoémission d'un électron de valence d'un gaz atomique ou moléculaire [2]. Les sources XUV sont aussi capables d'exciter les couches électroniques internes de la matière. En excitant ces niveaux de cœur, une véritable cascade d'électrons est déclenchée (processus Auger). L'étude temporelle de ces processus est à la frontière de nos capacités expérimentales mais est cruciale pour comprendre des mécanismes chimiques fondamentaux, tels que ceux actifs en radiothérapie. Pour cela, des développements sont en cours pour amener la spectroscopie attoseconde vers des échantillons liquides se rapprochant des conditions du vivant. La prochaine étape sera de passer de l'observation au contrôle attoseconde des électrons de manière à contrôler la réactivité chimique.

La science attoseconde pour décortiquer les propriétés des matériaux

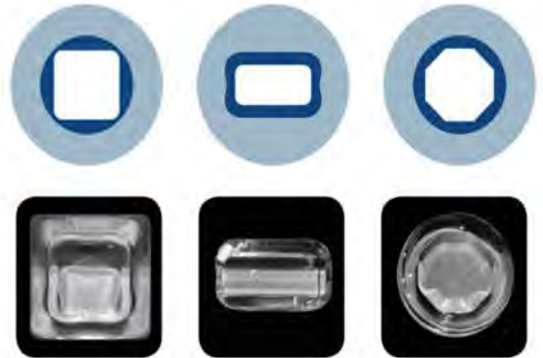
La compréhension et la manipulation des mouvements des électrons dans les solides est également centrale pour la technologie moderne, par exemple pour l'électronique basée sur les semi-conducteurs, ou pour les dispositifs photovoltaïques.

Deux techniques attosecondes, disponibles à ATTOLab, répondent à ces défis. La spectroscopie de photoémission mesure l'énergie, l'angle d'émission, et le spin d'électrons arrachés au solide, ce qui permet de reconstruire sa structure de bande résolue en spin en fonction du temps [3]. L'absorption transitoire, spectroscopie purement optique, consiste à exciter un solide avec une impulsion visible, et à mesurer son absorption ou sa réflectivité avec une impulsion attoseconde XUV. Comme dans les gaz, ce rayonnement permet d'exciter sélectivement les électrons de cœur de certains éléments. Ainsi, des phénomènes de transfert de charge entre différents sites ou entre différentes couches de matériaux hétérogènes deviennent observables.

On peut donc suivre la répartition de l'énergie déposée dans un solide entre ses différents degrés de liberté: courants électroniques, mouvement des atomes, orientation des spins, etc. C'est précisément la manière dont ces degrés de liberté interagissent qui confère des propriétés fascinantes aux matériaux: supraconductivité, ferroélectricité, ou ordre magnétique. La spectroscopie attoseconde ●●●

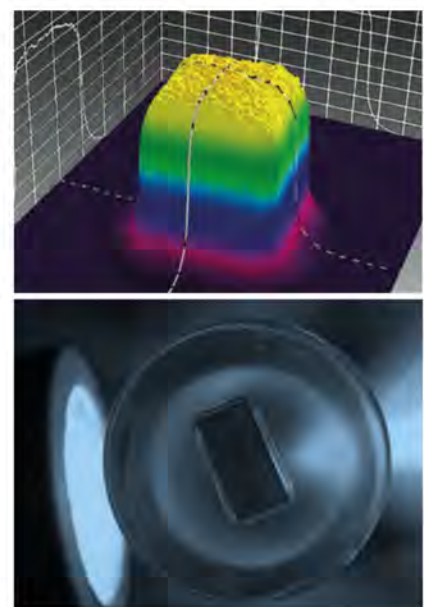
Des fibres optiques innovantes ...
À chaque étape de votre processus

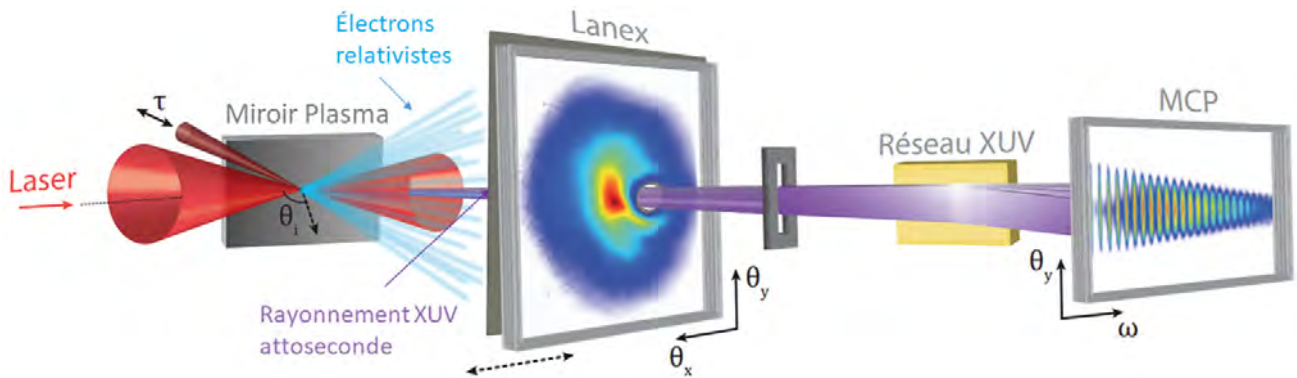
Fibre Silice à cœur non circulaire



OBS FIBER en partenariat avec CeramOptec vous propose **deux nouvelles gammes** de fibres optiques spéciales en silice à cœur non circulaire, fonctionnant de l'UV au visible (190nm - 1200nm) et du visible au proche infrarouge (300nm - 2400nm).

Les différentes géométries de cœurs assurent un mélange très efficace des modes permettant une excellente distribution homogénéisée de la puissance de sortie avec un profil d'intensité de type *top-hat*. Avec une résistance élevée aux dommages lasers, ces fibres multimodes sont donc idéales pour des applications de mise en forme de faisceaux, d'astronomie, avec des détecteurs carrés et bien d'autres encore.





contribue à « démêler » ces états complexes de la matière si utiles à la technologie moderne, voire à en modifier les propriétés de manière quasi-instantanée. La perspective est d'un jour utiliser la lumière pour contrôler des dispositifs à des vitesses sans précédent, ou synthétiser des états de la matière encore inexistantes.

L'ULTRA-INTENSE: L'OPTIQUE RELATIVISTE

Focalisés sur des surfaces de l'ordre du micromètre, des lasers encore plus puissants ont permis de dépasser l'éclairement de seuil du régime dit « relativiste », pour lequel les électrons acquièrent une énergie cinétique supérieure à leur énergie au repos. Ainsi pour des éclaircissements supérieurs à 10^{18} W/cm², la matière devient plasma et des particules chargées (électrons/ions) peuvent être propulsées à des vitesses relativistes en quelques attosecondes. La physique associée à ces nouveaux régimes, appelée physique des Ultra-Hautes Intensités (UHI), est ultra-relativiste, fortement non-linéaire et hors-équilibre, ce qui rend son étude particulièrement importante d'un point de vue fondamental. En particulier, sur la plateforme UHI100 (figure 3), dotée d'un laser de classe 100 TW, il est possible d'étudier les mécanismes fondamentaux intervenant lors du couplage du laser avec une cible pour des éclaircissements compris entre 10^{18} et 10^{20} W/cm². Des expériences, couplées à des simulations numériques sur super-calculateurs, permettent d'étudier l'interaction

Figure 4. Étude des propriétés des électrons relativistes et du rayonnement XUV attoseconde émis dans la direction du laser ultra-intense réfléchi sur un miroir plasma après mise en forme de la surface impactée par l'impulsion laser en fonction de l'état du gradient produit sur ce miroir. Le gradient de densité, de longueur comprise entre la longueur d'onde laser et quelques dizaines de nanomètres, est produit et contrôlé *via* une impulsion lumineuse annexe retardée d'un délai (τ) et focalisée en face avant du miroir. On observe, en fonction des propriétés du gradient de densité produit, des faisceaux d'électrons et de rayonnement XUV attoseconde aux propriétés différentes. Le spectre de l'émission XUV est analysé à travers un spectromètre et le profil spatial du faisceau d'électrons sur un écran LANEX.

laser-plasma à ces intensités, en particulier la réponse de la matière solide qui forme des miroirs plasmas, mais aussi d'exploiter cette interaction pour accélérer le développement de nouvelles sources de particules relativistes et de lumière XUV attoseconde.

Les miroirs plasmas

De façon schématisée, un miroir plasma est un plasma dense créé à la surface d'une cible initialement solide irradiée par un laser intense ultracourt [4]. Le plasma de densité élevée à la surface de la cible se comporte comme un miroir et réfléchit efficacement l'impulsion laser incidente tout en préservant ses qualités spatiales. Si la cible est à l'origine transparente, il peut être employé comme commutateur ultra-rapide pour isoler l'impulsion principale du bruit lumineux qui la précède. Il permet également de produire de manière synchronisée des sources de particules relativistes (électrons/ions) et des sources harmoniques XUV très intenses et de durée attoseconde, *via* un processus très différent

de celui utilisé en milieu dilué, basé sur un effet Doppler alternatif [5] (figure 4). Très récemment, des expériences menées sur UHI100 - couplées à des simulations numériques exascales - ont montré que les miroirs plasmas peuvent comprimer spatialement et temporellement une impulsion laser et accroître ainsi son intensité de plusieurs ordres de grandeur. Une telle méthode devrait offrir l'opportunité unique de sonder de nouveaux régimes d'interaction lumière-matière dominés par l'électrodynamique quantique (QED) en champ fort, dont l'exploration s'avère cruciale pour valider la théorie QED dans des régimes non-perturbatifs restés jusqu'à présent hors d'atteinte des grands collisionneurs de particules.

Les accélérateurs laser-plasma

Une impulsion laser issue de l'installation UHI100 et focalisée dans un jet de gaz ne sera pas réfléchi par le plasma qu'elle forme, comme pour une cible solide, mais peut se propager et sous certaines conditions exciter une onde de plasma. Une

partie des électrons sont alors piégés et accélérés progressivement par l'onde de plasma, à l'image du surfeur qui profite de la vague pour gagner de la vitesse. On sait produire aujourd'hui par laser des faisceaux d'électrons avec une énergie de quelques MeV jusqu'à quelques GeV sur des distances centimétriques, bien plus réduites qu'avec des accélérateurs conventionnels (quelques dizaines à centaines de mètres). Les sources d'électrons issues de ces nouveaux accélérateurs ultra compacts possèdent des propriétés remarquables. En particulier, elles sont ultra-courtes (10 fs), ce qui rend possible leur utilisation pour sonder des processus ultra-rapides dans la matière. Elles présentent un intérêt grandissant dans de nombreux domaines aussi variés que la médecine (radiothérapie, imagerie, diagnostics...), la chimie (radiolyse, étude de surface, réactions chimiques, catalyse, structure moléculaire...), la physique (diagnostics pour la physique des plasmas, détecteurs, etc...), la science des matériaux (radiographie, diffraction électronique) ou encore le domaine de la sûreté (contrôle de colis, frontière...). Ces accélérateurs souffrent en revanche toujours de limitations importantes que les équipes du LIDYL cherchent activement à lever. L'une d'elles réside dans la faible charge à haute énergie, ce qui limite actuellement leur utilisation dans certaines applications notamment pour la radiothérapie FLASH. Il s'agit d'une approche thérapeutique anti-cancéreuse extrêmement prometteuse, qui pourrait tirer bénéfice des faisceaux ultra brefs générés par laser pour détruire efficacement les tumeurs tout en préservant davantage les tissus sains qu'avec une

irradiation conventionnelle. Pour résoudre cette limitation, le LIDYL a développé, en collaboration avec le LOA, un nouvel injecteur 'miroir plasma', conjuguant le meilleur de l'interaction sur cible solide et cible gazeuse, permettant d'injecter de hautes charges dans une onde de plasma créée dans un gaz, en conservant une excellente qualité de faisceau. Ce nouveau concept, breveté et validé par des simulations avancées, sera mis en place très prochainement sur la plateforme UHI100.

CONCLUSION

Le développement des lasers de puissance a permis d'accéder à de nouveaux régimes d'interaction, conduisant à la production de sources de lumière XUV attoseconde et de particules relativistes, avec une grande diversité d'applications en physique, chimie, médecine ou science des matériaux.

Longtemps chasse gardée exclusive des lasers Titane:Saphir, la science attoseconde voit l'émergence de technologies alternatives, notamment basées sur les milieux à gain Ytterbium, qui promettent l'augmentation au moins d'un facteur 10 de la cadence/puissance moyenne, rendant possible de nouvelles applications.

Côté optique relativiste, le développement de lasers ultra brefs de plus en plus puissants dans les années à venir devrait permettre d'explorer des territoires fascinants, pour lesquels les théories existent mais où tout reste encore à mesurer. Les miroirs plasmas constitueront certainement un outil de choix pour augmenter l'éclairement, comme le montrent déjà les simulations numériques exploratoires menées au LIDYL. ●

RÉFÉRENCES

- [1] P. Salières, T. Ruchon et B. Carré, *Photoniques* **48**, 38 (2010)
- [2] A. Autuori *et al.*, *Sci. Adv.* **8**, eabl7594 (2022)
- [3] M. Fanciulli *et al.*, *Phys. Rev. Res.* **2**, 013261 (2020)
- [4] C. Thaury *et al.*, *Nat. Phys.* **3**, 424 (2007)
- [5] L. Chopineau *et al.*, *Nat. Phys.* **17**, 968 (2021)

UV, VISIBLE AND NIR

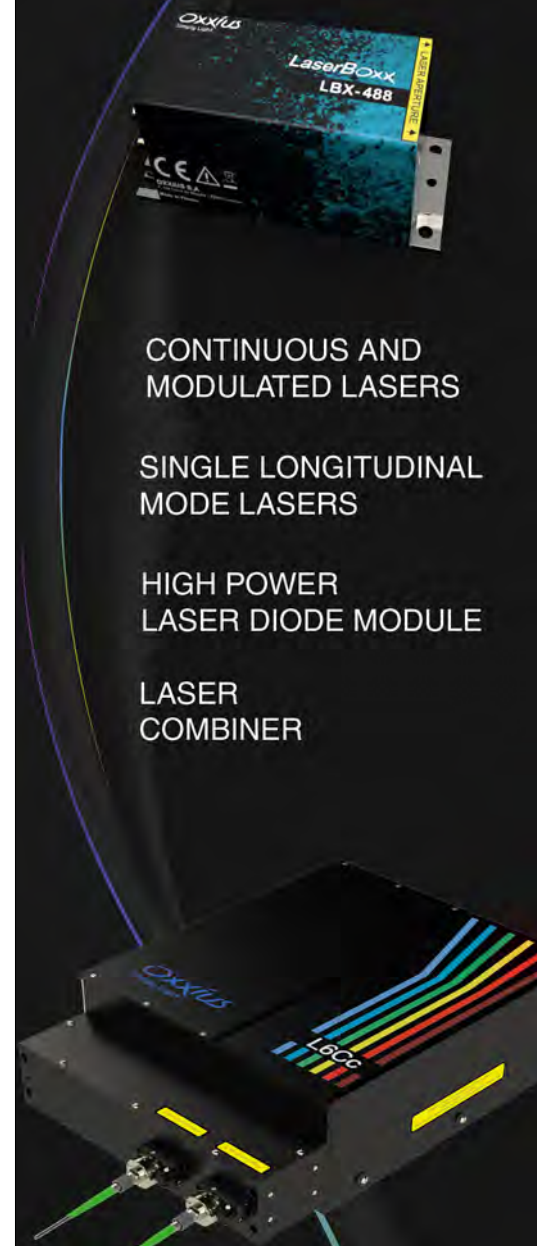
LASER SOLUTIONS

CONTINUOUS AND MODULATED LASERS

SINGLE LONGITUDINAL MODE LASERS

HIGH POWER LASER DIODE MODULE

LASER COMBINER



WWW.OXXIUS.COM