

LASERIX : UNE PLATE-FORME POUR LE DÉVELOPPEMENT LARGE SPECTRE D'APPLICATIONS DE LA LUMIÈRE INTENSE

Elsa BAYNARD¹, Kevin CASSOU¹, Pierre DROBNIAK¹, Julien DEMAILLY¹, Olivier GUILBAUD¹, Adrien KRAYCH¹,
Bruno LUCAS¹, Max MAILLET¹, Alok Kumar PANDEY², Moana PITTMAN¹, David ROS¹, Xavier SARAZIN¹,
Fabrice Sanson² and Sophie KAZAMIAS^{1,*}

¹IJClab, Bât. 100, 15 rue Georges Clémenceau, 91405 Orsay cedex UMR9012 – CNRS / Université Paris-Saclay / Université Paris Cité

²Imagine Optic, 18 rue Charles de Gaulle, Orsay F-91400, France

*sophie.kazamias@universite-paris-saclay.fr



LASERIX est une plateforme de l'IJClab sur le campus de l'Université Paris Saclay. Le laser est une chaîne CPA de niveau 50 TW à 10 Hz. Des thématiques de recherche en rapport avec la physique des deux infinis sont menées en parallèle avec une vocation affirmée d'ouverture à la formation. Nous présentons un panorama sur les sources XUV de lumière structurée, l'accélération laser plasma et des études prospectives sur l'étude des propriétés du vide soumis à un champ électromagnétique ultra-intense.

<https://doi.org/10.1051/phys/202311830>

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.

La plateforme LASERIX [1] a été fondée au début des années 2000 sur le campus d'Orsay. Elle fait partie depuis lors des quelques installations françaises de chaînes laser de puissance de type CPA (Chirped Pulsed Amplification) de niveau typique 50 TW ($5 \cdot 10^{16}$ W). Elle fournit 10 fois

par seconde des impulsions d'énergie maximale 2,5 Joule, de durée 40 fs ($4 \cdot 10^{-14}$ s). Cette impulsion principale est accompagnée de répliques de plus basse énergie à des longueurs d'onde et des délais ajustables à l'échelle femtoseconde pour des expériences pompe-sonde. LASERIX est une chaîne semi-commerciale qui n'a cessé d'être mise à l'état de l'art par

collaborations permanentes avec les industriels locaux (notamment la société Amplitude Laser). En 20 ans, de nombreux éléments de la chaîne ont été changés et les dispositifs de contrôle les plus avancés ont été implantés (miroir déformable, stabilisateurs de pointé et de fréquence, contrôle actif du profil spectral et temporel, etc.) C'est également ●●●

EDP Sciences lance une nouvelle collection :
Institut d'Optique Graduate School Textbook

Parution le 25/08/2022 du premier ouvrage :

Optical Models for Material Appearance



This book is an introduction to the fundamental notions of optics which allows to understand the radiometric quantities measured with common devices, to learn how to analyze them, and to review some classical optics-based predictive models for various types of materials and structures.

The author, **Mathieu Hébert**, is professor assistant at Institut d'Optique Graduate School

ISBN 978-2-7598-2647-6

260 pages, 95 €



En vente sur laboutique.edpsciences.fr
(section des livres en anglais)

la seule plate-forme de ce type installée dans un laboratoire de l'IN2P3 (Institut National de Physique des Particules et de Physique Nucléaire) du CNRS. Les programmes de recherche qui sont menés sur cette installation vont de la thématique historique sur les sources secondaires de rayonnement EUV (Extrême ultraviolet), à l'accélération laser plasma et à l'étude prospective d'effets de QED (Electrodynamique Quantique) dans le vide en présence d'un champ laser extrêmement intense. Ces effets n'ont jamais encore été observés à ce jour compte tenu du manque de disponibilité des sources capables de les produire significativement.

LES SOURCES DE LUMIÈRE COHÉRENTE XUV PORTANT DES MOMENTS ORBITAUX ANGULAIRES

LASERIX contribue à un domaine très actif de la recherche actuelle sur les sources de lumière exotiques dans l'extrême ultraviolet (EUV), une gamme de longueur d'onde de quelques dizaines de nanomètres et dont les photons portent des énergies de quelques dizaines d'eV. C'est typiquement celle produite sur des synchrotrons comme SOLEIL mais les sources EUV générées par laser peuvent être naturellement plus compactes et intrinsèquement cohérentes (durées d'impulsions sub picoseconde). Les vortex optiques sont des faisceaux lumineux portant un moment orbital angulaire qui se traduit par une phase spatiale en spirale qui varie comme le produit du moment orbital par l'angle azimutal autour de l'axe de propagation. Les modes propres ont une forme annulaire et les propriétés d'interaction de cette lumière avec la matière sont étonnantes et nouvelles. En France, la thématique des vortex optiques EUV a été introduite par une équipe du LIDYL (CEA Saclay) qui a démontré la possibilité d'obtenir par génération d'harmonique d'ordre élevé (par exemple $q=25$) [2] dans un gaz un

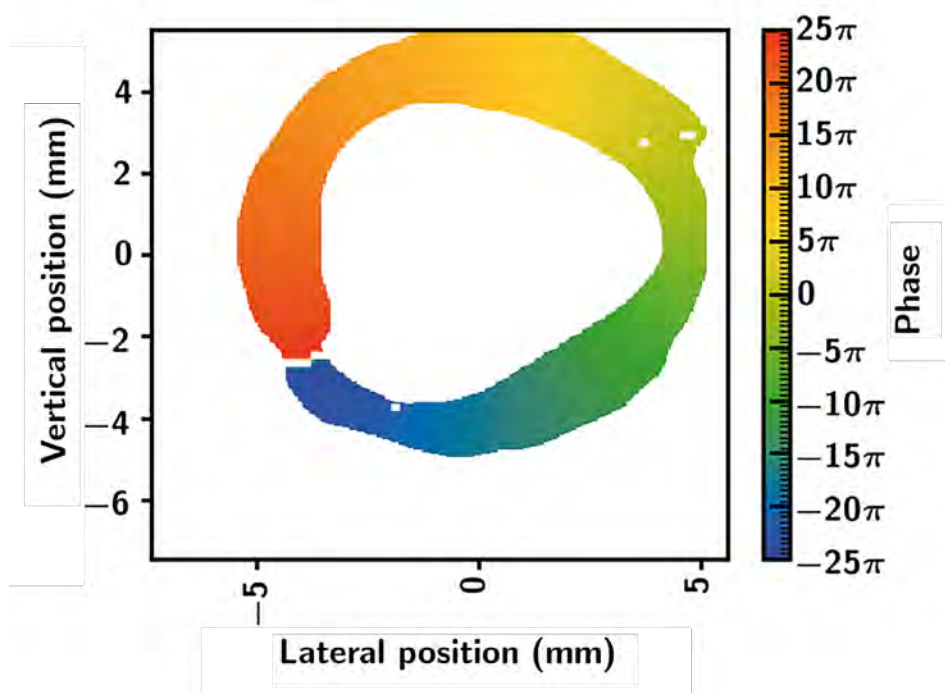


Figure 1. Image d'un analyseur de front d'onde Hartmann pour un faisceau vortex de l'harmonique 25 générée à partir d'un faisceau infrarouge portant un moment $l=1$, reconstruction du profil d'intensité (à gauche) et du profil de phase (à droite).

vortex optique de lumière EUV à partir d'un vortex infrarouge de pompe (portant $l=1$) en suivant la loi qui traduit le fait que le moment orbital angulaire porté par l'harmonique q d'un faisceau généré par un laser de moment angulaire initial l est bien ql . LASERIX a été pionnier dans la caractérisation quantitative de ces faisceaux [3] en démontrant qu'il était possible de mesurer directement la phase spatiale des vortex EUV avec un dispositif de mesure de front d'onde de type Hartmann (en collaboration avec la société Imagine Optic). Expérimentalement cela implique de mesurer une phase spatiale qui varie de 50π sur un tour dans une gamme de longueurs d'onde courtes. Nous avons pu montrer que la pureté des modes obtenus par transformée de Fourier azimutale du profil d'amplitude et de phase mesuré n'était pas parfaite compte tenu du caractère non perturbatif de la génération d'harmoniques mais que la quantité de photons produits et la qualité et la

stabilité de ces faisceaux permettaient de les utiliser pour explorer de nouveaux régimes de l'interaction lumière matière.

Une fois ces faisceaux vortex obtenus par génération d'harmoniques caractérisés, nous les avons amplifiés dans un plasma d'ions multichargés. Ce plasma est pompé par une série d'impulsions laser intenses pour induire une inversion de population transitoire de quelques picosecondes correspondant à une transition laser dans le domaine EUV (32,6 nm). On parle alors de laser X : cette technique d'amplification d'harmonique est délicate à mettre en œuvre expérimentalement car elle exige une excellente superposition spectrale, spatiale (précision du micron) et temporelle (picoseconde ou moins) entre le faisceau à amplifier et la fenêtre de gain. Elle est démontrée depuis une vingtaine d'année pour des faisceaux gaussiens. L'injection dans ce milieu à gain d'une portion de faisceau vortex aboutit bien à une amplification et permet

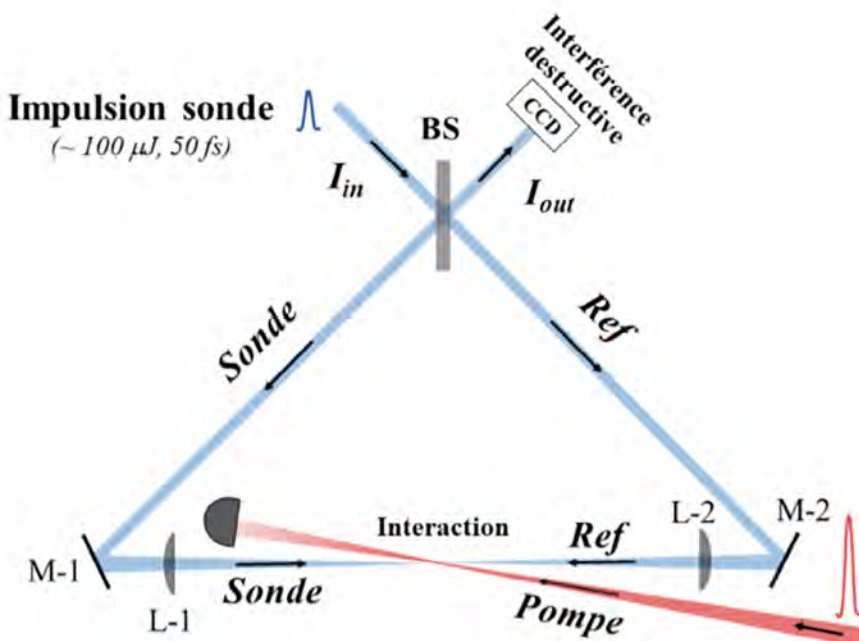
également de révéler en champ lointain le caractère rotatoire de la lumière vortex. On observe que le faisceau amplifié est dévié angulairement d'une quantité qui dépend directement du moment angulaire porté par le faisceau : par exemple le sens de la rotation dépend du signe algébrique du moment.

L'ACCÉLÉRATION LASER PLASMA : LE PROJET PALLAS

Depuis des avancées expérimentales majeures dans lesquelles la France a été pionnière dès le début 2000 tant par ses laboratoires de recherche que par ses entreprises laser, l'accélération laser plasma est à un stade où elle doit démontrer la maturité de sa technologie pour imaginer que dans un futur proche on construise effectivement une nouvelle génération d'accélérateurs compacts pour la physique des particules, les nouvelles sources de lumière type bêtatron ou XFEL, ou les applications médicales avec des particules ou des rayonnements secondaires. Les champs accélérateurs supérieurs de plus de trois ordres de grandeur à ce qui peut être obtenu avec les technologies RF conventionnelles les plus

avancées motivent cette recherche mais de nombreux verrous doivent encore être levés. Ils concernent la stabilité et la qualité des faisceaux de même que la cadence maximale de tirs que l'on peut atteindre avec un coût énergétique acceptable. C'est l'objet du projet européen EUPRAXIA dont la France est partenaire à travers notamment le projet PALLAS auquel contribue LASERIX. Ce projet vise à concevoir le premier étage d'un accélérateur : un injecteur, qui produit un faisceau d'électrons relativistes d'énergie modérée (200 MeV) mais de qualité contrôlée en énergie, charge, pureté spectrale et spatiale. Si la physique du processus est globalement comprise, son caractère hautement non linéaire, mis en regard de la difficulté à caractériser donc à contrôler très précisément tir à tir des spécifications complexes du profil spatio-spectro-temporel du laser rendent la tâche exaltante. On prévoit un couplage avec les nouvelles technologies de simulation et de gestion instantanée de quantités massives de données qui permettent de mettre en place des boucles de stabilisation. À l'issue, ce faisceau pourra être ●●●

Figure 2. Schéma de principe de l'interféromètre de Sagnac pour la détection d'effets de QED dans le vide soumis à un champ électromagnétique lumineux extrême.



MESO

**A NEW TOOL FOR
INTERFEROMETRY
APPLICATIONS**

Insensitive to vibrations

**At-wavelength
metrology**

**Flat surfaces
from 1.5 to 6"**

Parallel optics testing

sales@imagine-optic.com
+33 164 861 560

www.imagine-optic.com



accélération vers des énergies supérieures à la dizaine de GeV s'il est injecté après mise en forme dans un étage purement accélérateur.

RALENTIR LA VITESSE DE LA LUMIÈRE DANS LE VIDE AVEC DES IMPULSIONS LASER INTENSES

La vitesse de la lumière dans le vide est l'une des grandes constantes universelles en physique. Elle définit désormais l'unité de temps et de longueur d'espace. Pourtant la théorie quantique de l'électromagnétisme (QED) prédit que l'indice optique de la lumière dans le vide devrait augmenter lorsque ce dernier est soumis à un champ électromagnétique intense [5]. Cette étonnante propriété n'a encore jamais été observée.

L'expérience DeLLight (Deflection of Light by Light) cherche à mesurer cet effet en utilisant des impulsions laser ultra brèves (femtosecondes) et ultra intenses. L'impulsions laser intense, dite pompe, est focalisée dans un volume de vide de quelques centaines de micromètres cube, produisant des champs électriques et magnétiques extrêmement intenses. Une seconde impulsion laser de basse intensité, dite sonde, traverse au même instant ce volume de vide modifié. Ce faisceau sonde est alors dévié en présence d'un gradient d'indice, comme cela est observé dans les mirages. Une mesure positive par l'expérience DeLLight serait un résultat majeur. Cela démontrerait expérimentalement que la vitesse de la lumière dans le vide peut être réduite, au sens classique du terme à l'échelle macroscopique, en présence de champs intenses.

La déviation prédite dans les conditions de l'expérience DELIGHT sur LASERIX est extrêmement faible, de quelques dixièmes de picoradians (correspondant à la déviation d'une distance de la taille d'un atome après 1 km de propagation). Cette déviation est détectée grâce à l'utilisation d'un interféromètre dit de Sagnac

Une mesure positive par l'expérience DeLLight serait un résultat majeur. Cela démontrerait expérimentalement que la vitesse de la lumière dans le vide peut être réduite, au sens classique du terme à l'échelle macroscopique, en présence de champs intenses.

qui permet d'amplifier le signal recherché. Le principe est de faire interférer de façon destructive l'impulsion déviée (sonde) par la même impulsion non perturbée (référence). Plus l'interféromètre sera bien réglé, sans aucun défaut d'alignement, plus l'extinction sera forte en sortie de l'interféromètre et plus le signal recherché sera élevé. L'objectif est d'atteindre une extinction de 4.10^{-6} correspondant à une amplification d'un facteur 250 du signal de déflexion. Avec l'énergie disponible sur LASERIX, cela correspond à une déflexion de l'ordre de 0,02 nm. Il faut également être capable de focaliser extrêmement précisément les impulsions laser dans l'interféromètre sans détériorer la sensibilité de mesure de ce dernier. Enfin il faut pouvoir mesurer très précisément (à 10 nanomètres près) la position transverse de l'impulsion laser en sortie

de l'interféromètre afin de pouvoir détecter un signal positif après environ 1 mois de données collectées à la cadence de 10 Hz, soit des dizaines de millions de tirs. Ce sont là les enjeux technologiques de ce projet.

CONCLUSION

Les sources laser de lumière ultra-intenses permettent de créer des conditions d'interaction lumière matière dont les horizons sont sans cesse repoussés par les nouvelles sources disponibles (le paramètre clé étant l'énergie mais il ne faut toutefois pas négliger la cadence de tir) avec désormais plusieurs propositions concrètes d'expériences visant à tester d'ici quelques années de nouveaux régimes de QED dans le vide (limite de Schwinger notamment). Pour les applications les plus anciennes comme les sources de rayonnement XUV et l'accélération laser plasma, largement étudiée depuis 20 ans, les enjeux actuels se situent plutôt dans une phase de maturation des technologies pour aboutir à des sources fiables, compactes et de haute cadence, pour des utilisateurs qui pourront ignorer les principes et la complexité requises pour produire ce type de source. La plateforme LASERIX, en contact des communautés de chercheurs fondamentaux et ingénieurs, d'étudiants et d'industriels du domaine mène en parallèle ces activités qui bénéficient l'une l'autre de progrès fondamentaux ou technologiques. ●

RÉFÉRENCES

- [1] <http://hebergement.universite-paris-saclay.fr/laserix/fr/>
- [2] <https://doi.org/10.1051/978-2-7598-2719-0>
- [3] F. Sanson, Opt. Lett. **43**, 2780 (2018)
- [4] <https://www.in2p3.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/vers-une-infrastructure-europeenne-pour-la-rd-sur-les-accelerateurs-plasma>
- [5] S. Robertson, Phys. Rev. A **100**, 063831 (2019)