

Photoniques

LA LUMIÈRE ET SES APPLICATIONS

ACTUALITÉS

**L'ignition : un pas décisif
pour la fusion**

ENTRETIENS

**François Cochard
Thierry Dupoux**

OSEZ L'OPTIQUE

**Coronographe
des étoiles en labo**

ACHERER

**Analyseur
de front d'onde**

DOSSIER

ASTROPHOTONIQUE

- **PALOHA : l'optique non linéaire et fibrée au service de la haute résolution en astronomie**
- **La courbure de capteurs d'image : une amélioration astronomique ?**
- **Astrophotonique : les défis à relever pour les futures puces optiques destinées à l'observation astronomique**
- **AMKIDs : nouveaux détecteurs supraconducteurs ultrasensibles pour l'astronomie**



Photoniques est éditée par la Société Française de Physique, association loi 1901 reconnue d'utilité publique par décret du 15 janvier 1881 et déclarée en préfecture de Paris.

<https://www.sfpnet.fr/>

Siège social : 33 rue Croulebarbe, 75013 Paris, France

Tél. : +33(0)1 44 08 67 10

CPPAP : 0124 W 93286

ISSN : 1629-4475, e-ISSN : 2269-8418

www.photoniques.com

Le contenu rédactionnel de Photoniques est élaboré sous la direction scientifique de la Société française d'optique
2 avenue Augustin Fresnel
91127 Palaiseau Cedex, France
Florence HADDOUCHE
Secrétaire Générale de la SFO
florence.haddouche@institutoptique.fr

Directeur de publication

Jean-Paul Duraud, secrétaire général de la Société Française de Physique

Rédaction

Rédacteur en chef

Nicolas Bonod

nicolas.bonod@edpsciences.org

Journal Manager

Florence Anglézio

florence.anglezio@edpsciences.org

Secrétariat de rédaction et mise en page

Agence de communication la Chamade

<https://agencelachamade.com/>

Comité de rédaction

Pierre Baudoz (Observatoire de Paris), Marie-Begoña Lebrun - (Phasics), Benoît Cluzel - (Université de Bourgogne), Émilie Colin (Lumibird), Sara Ducci (Université de Paris), Céline Fiorini-Debuisschert (CEA), Riad Haidar (Onera), Patrice Le Boudec (IDIL Fibres Optiques), Christian Merry (Laser Components), François Piuze (Société Française de Physique), Marie-Claire Schanne-Klein (École polytechnique), Christophe Simon-Boisson (Thales LAS France), Ivan Testart (Photonics France).

Advertising

Annie Keller

Cell phone: +33 (0)6 74 89 11 47

Phone/Fax: +33 (0)1 69 28 33 69

annie.keller@edpsciences.org

International Advertising

Bernadette Dufour

Cell phone + 33 7 87 57 07 59

bernadette.dufour@edpsciences.org

Photoniques est réalisé par EDP Sciences, 17 avenue du Hoggar, P.A. de Courtaboeuf, 91944 Les Ulis Cedex A, France
Tél. : +33 (0)1 69 18 75 75
RCS : EVRY B 308 392 687

Gestion des abonnements

abonnements@edpsciences.org

Impression

Fabrègue imprimeur
B.P. 10

87500 Saint-Yrieix la Perche

Dépôt légal : Janvier 2023

Route : STAMP (95)



Éditorial



NICOLAS BONOD

Rédacteur en chef

L'optique vers de nouveaux horizons

La photonique et l'instrumentation optique ont été au cœur de quelques uns des plus grands projets scientifiques modernes. Nous avons assisté ces derniers mois à des annonces majeures qui bouleversent nos connaissances et ouvrent de nouveaux horizons.

Les premières images du télescope spatial James Webb dévoilées le 12 juillet 2022 ont été largement à la hauteur des attentes puisqu'elles ont permis d'identifier en quelques semaines des galaxies bien plus éloignées que celles cartographiées jusqu'à présent. Depuis, les résultats spectaculaires s'enchaînent et les instruments embarqués font merveille. NIRCam et MIRI ont acquis des images à haut contraste de l'exoplanète HIP 65426 b dont la qualité permet désormais d'envisager l'observation de plus petites exoplanètes. La spectroscopie proche infra-rouge a également permis l'identification de dioxyde de carbone dans l'atmosphère de l'exoplanète WASP-39 b, une première. Cette série de découvertes a profondément marqué l'année 2022 et ouvre une nouvelle ère de l'observation spatiale.

En écho à ces résultats, ce numéro présente un dossier sur l'astrophotonique. Le lien entre l'astronomie et l'optique a depuis toujours été très étroit. Il n'est donc pas surprenant de voir l'astronomie moderne s'emparer des technologies les plus avancées de la photonique pour casser de nombreux verrous.

Des confins de l'univers au confinement inertiel sur Terre... Le projet

de fusion par confinement inertiel laser a franchi une étape décisive le 5 décembre 2022 au National Ignition Facility (NIF) du Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL).

L'annonce d'un gain en énergie de 150% entre l'énergie délivrée par la fusion et celle des faisceaux laser est une étape majeure dans la quête de la fusion nucléaire contrôlée par confinement inertiel laser. Le développement d'une source d'énergie par fusion d'isotopes de l'hydrogène, deutérium et tritium, est un enjeu majeur qui va et qui doit mobiliser nos énergies pour les décennies à venir. Il faut mesurer l'immensité de la tâche : établir les conditions nécessaires à la fusion et les rendre compatibles avec une production stable, fiable et rentable d'énergie. Mais réalisons que 6 décennies seulement séparent la découverte du laser des premiers résultats de fusion par confinement laser, 5 seulement depuis la publication du principe de fusion nucléaire par confinement laser. S'il est difficile de prédire l'avancement dans 5 décennies, nous pouvons espérer que ces tout derniers résultats motiveront le développement de nouvelles installations dédiées à la production d'énergie par confinement laser.

Nous le voyons, les progrès de l'optique n'ont cessé d'ouvrir de nouveaux horizons. Au regard du potentiel des technologies photoniques et du talent des nombreux scientifiques qui les développent, nul doute que l'optique continuera à l'avenir à ouvrir notre regard sur notre monde.



Sommaire

www.photoniques.com

N° 117

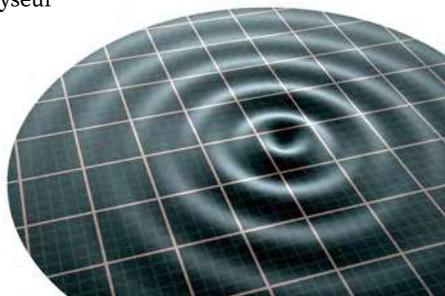
16 L'IGNITION : UN PAS DÉCISIF POUR LA FUSION



34

La courbure de capteurs d'image : une amélioration astronomique ?

49 Acheter un analyseur de front d'onde



ACTUALITÉS

- 03 Éditorial et actualité de la SFO
- 06 Informations partenaires
- 14 Hommage à Jean-Marc Fournier
- 15 Création du GDR CHALCO
- 16 L'ignition : un pas décisif pour la fusion
- 17 Mots croisés
- 18 Liaison par fibre optique de 1023 km pour coupler 2 horloges atomiques entre Paris et Turin

ENTRETIENS

- 20 François Cochard, Shelyak
- 22 Thierry Dupoux, Photonics France & Safran

OSEZ L'OPTIQUE

- 24 Coronographe des étoiles en laboratoire... et découvrir des planètes

DOSSIER : PHOTONIQUE & MOBILITÉ

- 30 PALOHA : l'optique non linéaire et fibrée au service de la haute résolution en astronomie
- 36 La courbure de capteurs d'image : une amélioration astronomique ?
- 40 Astrophotonique : les défis à relever pour les futures puces optiques destinées à l'observation astronomique
- 46 AMKIDs : nouveaux détecteurs supraconducteurs ultrasensibles pour l'astronomie

ACHETER

- 51 Un analyseur de front d'onde

PRODUITS

- 57 Nouveautés

Annonces

2B Lighting 25, 39
Ardop 29, IV° de couv.
Comsol 31
Edp Sciences 19, 41

EPIC 35
FC Equipments 47
HTDS 21
Idil Fibres Optiques 49
Imagine Optic 23

IOGS 27
Laser Component 37
MKS II° de couv.
Opton Laser 33, 45
Phasics 53

Spectrogon 51
Trioptics 43
Wavetel 55

Crédit photo (couverture) : © iStockPhoto

L'édito de la SFO



ARIEL LEVENSON

Président de la SFO

Une discipline au potentiel illimité, une technologie diffusante, la photonique est partout !

Lors de nos échanges à distance grâce aux liaisons optiques, lorsque nous prenons des photographies avec nos mobiles, dans les phares et capteurs de nos voitures, dans certains soins médicaux, pour le nettoyage des bâtiments, la dépollution... on pratique ou bénéficie de la photonique (des fois sans le savoir). La photonique apporte des solutions pour dépasser les limites dans des domaines extrêmement variés, de l'électronique à l'observation et la manipulation des nanomatériaux et en médecine, biologie, astronomie, ou encore pour le développement de technologies quantiques... Impossible d'être exhaustif dans cet Edito. La photonique est partout !

Aussi nombreux que soient ces exemples, ils n'illustreraient que la partie visible de l'iceberg. Porter ces solutions à maturité en répondant à des défis divers, qui plus est aux interfaces de multiples disciplines, n'est pas l'aboutissement d'un parcours linéaire. Rappelons-nous de la fameuse boutade « le laser, une solution à la recherche d'un problème ». Idem pour l'essor de l'optique non-linéaire, bien malin celui qui aurait anticipé ses succès en microscopie et imagerie pour la biologie, ou pour les technologies quantiques... Encore une fois, la place me manque pour multiplier les exemples. Soyons clairs, il ne s'agit pas d'affirmer qu'une découverte n'a aucune chance de trouver rapidement un marché, mais de souligner que cela n'est souvent pas le cas et que même lorsqu'il l'est, cette avancée bénéficie d'un terreau et d'efforts collectifs que l'on peut tracer directement ou indirectement.

La photonique est partout ! Y compris et surtout dans des centaines de laboratoires français de recherche et développement qui construisent l'avenir, pour qu'un jour les nouveaux concepts en photonique puissent continuer à diffuser et à apporter des réponses aux besoins de la recherche dans des domaines variés et aux besoins de la société et ce, même lorsque ces besoins sont aujourd'hui difficiles à formuler, voire inconnus.

Décideurs scientifiques et politiques, il est temps de fertiliser et d'arroser d'avantage le terreau de la photonique. Non seulement pour son apport en tant que technologie diffusante, qui en a certes bien besoin, mais également en tant que discipline en elle-même, discipline au potentiel illimité et porteuse d'avenir.

2022 a été une belle année pour la SFO ! Nos nouveaux statuts ont été déposés pour la demande de Reconnaissance d'Utilité Publique. Notre Congrès OPTIQUE Nice 2022 a été un franc succès. La série des Wavinaires, créée en partenariat avec les GdR Ondes et Complexe, ravit les nombreux participants. Que dire du Prix Nobel attribué à notre cher Alain Aspect ! La mobilisation et l'enthousiasme de nos jeunes ont été remarquables et présagent d'une belle année 2023.

Photoniques 117 fait la transition entre 2022 et 2023. Je souhaite saisir l'occasion pour réitérer mes chaleureuses félicitations à notre Comité de rédaction, orchestré de main de maître, subtile, par Nicolas Bonod, son Editeur en chef. Les six numéros de cette année nous ont proposé un voyage à travers la diversité photonique, en nous laissant apercevoir sa vitalité et celle des communautés académique et industrielle françaises et européennes. Ils ont illustré ô combien éloquemment, que la photonique est partout !

Et puisque nous y sommes,... 2023 est l'année du 40^{ème} anniversaire de la SFO, que nous célébrons dans chacun des six prochains numéros de Photoniques avec des articles qui allieront notre riche histoire et notre avenir excitant, pour continuer à explorer avec vous le potentiel illimité de la photonique.

Excellente année à tous et que la fête commence !

Photoniquement vôtre
Ariel Levenson
Directeur de recherche CNRS
Président de la SFO

AGENDA

■ **2023 est l'année du 40^e anniversaire de la Société Française d'Optique. La SFO porte l'engagement de la communauté de l'Optique-Photonique depuis 1983.**

■ **JNOG Lyon 2023**
SFO Colloque - JNOG Club
5 au 7 juillet 2023

■ **Optomecanique & nanophononique**
SFO International Thematic School Houches Physics School, Chamonix Mont Blanc Valley, France
April 17- 28 2023

■ **Lidar summer school**
SFO International Thematic School Summer school at the observatoire of Haute Provence, OHP, France
June 11- 16 2023

■ **Waves in complex media**
SFO International Thematic School Houches Physics School, Chamonix Mont Blanc Valley, France
September 17- 29 2023

■ **EOSAM 2023 in Dijon**
SFO and EOS shared organization Dijon, France
September 2023 11- 15 2023
Save the date and Follow us on <https://www.sfoptique.org/>

LES ÉVÈNEMENTS PARRAINÉS PAR LA SFO

■ **Frisno 16 EIN Gedi, Israel**
The 16th European/ French Israeli Symposium on Nonlinear and Quantum Optics
January 15 - 19 2023

■ **Colloque Interdisciplinaire en Instrumentation**
Du 25/01/2023 au 27/01/2023
Grenoble
Le 9^e colloque Interdisciplinaire en Instrumentation (C2I)

■ **Congrès de la Société Française de Physique**
Du 3/07/2023 au 7/07/2023
Paris

Retrouvez tous les événements de la SFO sur <https://www.sfoptique.org/>

40^e Journées Nationales d'Optique Guidée

INL, l'Institut des Nanotechnologies de Lyon



Du mercredi 5 au vendredi 7 juillet 2023, Lyon ville des lumières accueille la communauté francophone de l'optique guidée dans une ambiance conviviale autour des télécommunications optiques, de l'optique intégrée, des lasers fibrés ou intégrés, des capteurs et de l'instrumentation optique.

JNOG LYON 2023, c'est l'occasion de fédérer les différentes branches de l'Optique guidée avec la programmation de deux conférences plénières, 5 conférences thématiques et des sessions posters. Un espace d'expositions industrielles constitue également un terrain propice aux échanges entre industriels et opticiens. La présence de start-ups est fortement encouragée. Plus de 150 chercheurs et industriels sont attendus.

Cette quarantième édition des Journées Nationales d'Optique Guidée de la Société Française d'Optique a pour spécificité d'accueillir pour la première fois, la cérémonie de remise des Prix Jean Jerphagnon, dont le Jury est présidé par le prix Nobel de Physique 2022, Alain Aspect qui nous fera l'honneur de participer à une table ronde. Après un après-midi exceptionnel, le diner de GALA, constituera un moment convivial pour prolonger le plaisir de cet échange. Le Comité Local d'Organisation et le comité scientifique sous la présidence de Christian GRILLET avec la participation du club Jeunes nouvellement créé de la Société Française d'Optique mettront tout en œuvre pour faire de ce grand colloque biennal, la plus belle vitrine des valeurs communes que nous portons : la jeunesse et le dynamisme, la parité et l'ouverture ainsi que l'excellence scientifique.

Réservez dès maintenant et profitez des Tarifs EarlyBird

La plateforme de soumission est ouverte jusqu'au 15 mars 2023.

Suivez-nous sur <https://www.sfoptique.org>



CLUB DES JEUNES DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE D'OPTIQUE

Nous sommes heureux et fiers de nos jeunes opticiens qui s'organisent au sein de la Société Française d'Optique pour mener les missions qui leur tiennent à cœur :

Promouvoir les activités scientifiques et techniques de la communauté, à travers les canaux d'information de la SFO.

- Organiser des journées scientifiques nationales ou des sessions de colloques regroupant les jeunes de la SFO.
- Faciliter l'insertion professionnelle des jeunes diplômés du club.
- Faciliter le contact entre les acteurs industriels, les jeunes chercheurs et les étudiants en photonique/optique.

- Faire le lien entre les différents « student chapters » et associations du domaine de la photonique et de l'optique sur le plan national et international.
- Représenter les jeunes de la SFO aux journées de vulgarisation scientifique.
- Faciliter le lien entre les jeunes chercheurs et la SFO.
- Promouvoir les activités de recherches des jeunes chercheurs de la SFO.
- Créer des interactions entre les jeunes chercheurs du club SFO.

Les fondateurs et représentants du club des Jeunes de la SFO :
Sidi Ely AHMEDOU (XLIM, Limoges),
Pierre BALAGE (CELIA, Bordeaux),
Souhaila BOUBLOUH (UFC, Besançon),
Melissa HEDIR (C2N, Palaiseau),
et Paul JIMENEZ (INL, Lyon).

L'ignition : un pas décisif pour la fusion

Sébastien LE PAPE

Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses, CNRS, École polytechnique - Institut Polytechnique de Paris, CEA, Sorbonne Université, 91128 Palaiseau cedex, France

<https://doi.org/10.1051/photon/202211716>

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.

Cinquante ans après la première publication de John Nuckolls décrivant le principe de la Fusion par Confinement Inertiel à l'aide de lasers de puissance, l'ignition a été atteinte sur le National Ignition Facility (NIF) au Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL). Dans la nuit du 5 décembre 2022, des réactions de fusion ont dégagé 3,15 MJ d'énergie nucléaire, pour 2,05 MJ d'énergie laser, soit un gain de l'ordre de 150 %.

L'énergie libérée dans une réaction de fusion est directement reliée à la différence de masse entre les atomes fusionnant - deux isotopes de l'hydrogène : le deutérium et le tritium - et le produit de cette fusion - un atome d'hélium et un neutron - conformément à la formule d'Albert Einstein $E=mc^2$.

Produire ces réactions de fusion est un vrai défi car les noyaux doivent vaincre une répulsion naturelle due à leurs charges toutes deux positives. Pour contrer cette répulsion, il faut apporter au milieu fusible une quantité d'énergie élevée en le chauffant à des températures extrêmes, de l'ordre de 100 millions de degrés Celsius. Si l'on veut que l'énergie dégagée par les réactions de fusion soit supérieure à l'énergie investie pour les initier, il faut que la quantité de neutrons produits soit suffisante ; un critère établi par John Lawson dit que le produit entre la densité du milieu et la durée durant laquelle les noyaux restent proches (temps de confinement) doit alors être le plus grand possible. Dans le cas de la Fusion par Confinement Inertiel, avec des temps de confinement assez courts, de l'ordre de 0,1 milliardièmes de secondes, la densité du milieu doit être de l'ordre de mille fois la densité du solide.

Pour atteindre ces conditions, un grand nombre de faisceaux laser irradient les parois internes d'un cylindre en or/uranium appauvri d'un centimètre de longueur et, en les chauffant, transforment ces parois en plasmas émetteurs de rayonnement X. Ces rayons X implosent alors de manière sphérique une capsule de diamant, d'environ 2 millimètres de diamètre, par effet fusée, à une vitesse avoisinant les 400 km/s. Le milieu fusible deutérium-tritium contenu dans la capsule est comprimé et, en son centre, porté à la bonne température.

Les premières expériences sur le NIF, de 2009 à 2012, n'ont pas été concluantes, avec un dégagement d'énergie neutronique de seulement quelques kJ. Les faibles performances de ces implosions furent alors imputées à la présence d'instabilités hydrodynamiques, liées à des non-uniformités d'irradiation, agissant comme des glaçons dans un bol d'eau chaude, refroidissant le point chaud et empêchant de fait un grand nombre de réactions de fusion de se produire. Une fois ce problème identifié, des modifications



Figure 1 : Cible tirée sur le NIF. © National Ignition Facility

apportées à la forme temporelle de l'impulsion laser ont permis de multiplier par 10 les performances de ces implosions (2013-2016). Les années suivantes (2017-2019), avec l'avènement des capsules en diamant remplaçant les capsules en plastique utilisées au préalable, ont vu le rendement du four à rayons X et la symétrie de l'implosion grandement améliorés, ce qui a, à peu de choses près, permis de définir la cible actuelle. Néanmoins ces implosions souffraient encore d'un refroidissement intempestif du point chaud, dû non plus à la croissance d'instabilités hydrodynamiques mais à la qualité de fabrication des capsules en diamant. La présence de cavités de taille micronique à l'intérieur de leur paroi a ainsi pendant longtemps réduit la performance des implosions en induisant l'injection dans le point chaud d'éléments non fusibles ou froids.

Un capillaire en verre de 10 microns de diamètre, servant à remplir la capsule avec le combustible Deutérium-Tritium (DT), était également à l'origine d'un mélange néfaste ; en réduisant sa taille de 10 à 5 puis 2 microns de diamètre, la masse de carbone ou de DT froid injecté lors de l'implosion a été réduite, conduisant aux performances actuelles.

Ces 13 années de recherches sur le NIF ont donc permis d'atteindre l'ignition en alliant compréhension des phénomènes physiques dégradant les performances (instabilités hydrodynamiques, interaction laser-plasma, symétrie de l'implosion) et amélioration de l'ingénierie de l'ensemble cible/laser (augmentation de l'énergie laser et contrôle de sa mise en forme temporelle, capsule en diamant, capillaire en verre).

Le NIF est une installation laser conçue initialement pour des applications défense, tout comme le Laser Mégajoule à Bordeaux. Pour

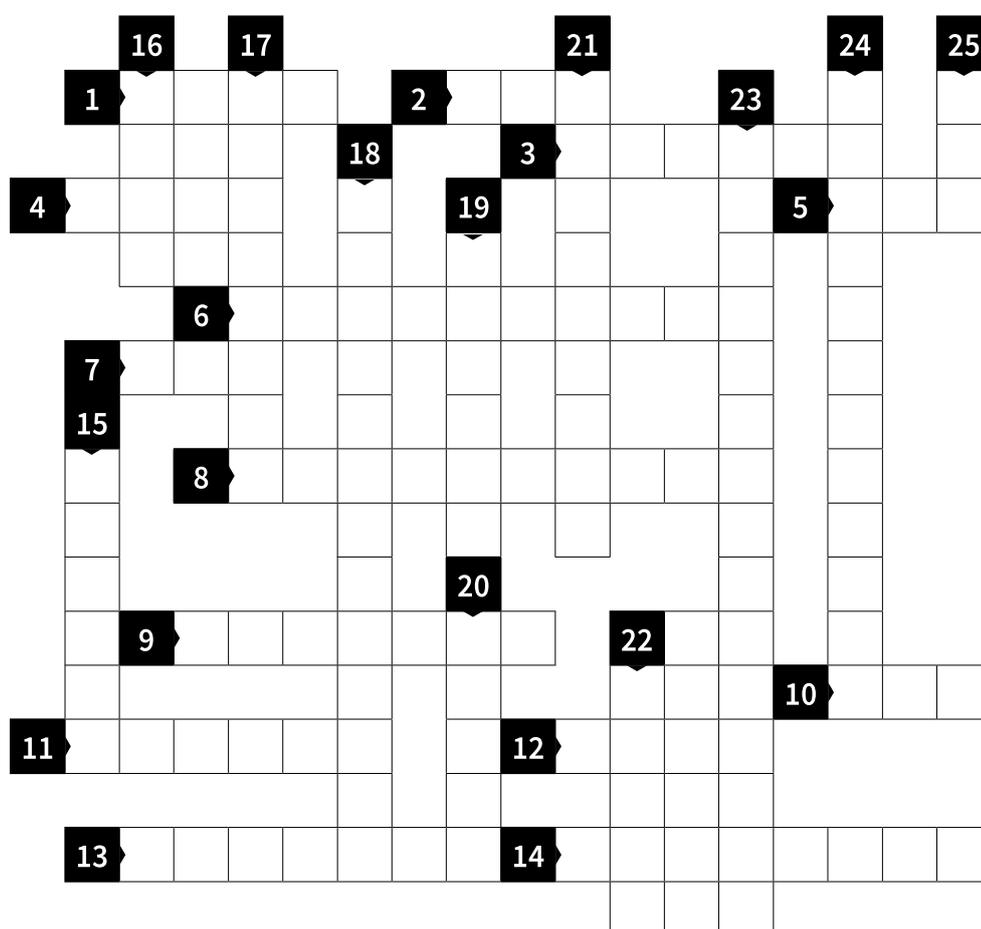
envisager la fusion comme source d'énergie viable, de nombreux points d'ingénierie restent à résoudre : augmenter la cadence de tir des lasers pour atteindre 10-15 tirs par seconde, réduire le coût des cibles utilisées, réfléchir avec la communauté de la fusion par confinement magnétique aux problèmes de résistance des matériaux

dans ces environnements extrêmes et enfin augmenter de manière significative l'énergie de fusion générée par chaque implosion (à environ 100 fois l'énergie laser pour que le processus soit rentable). Atteindre l'ignition n'est que la première étape sur la longue route vers la fusion pour l'énergie, mais il s'agit une étape cruciale. ●

MOTS CROISÉS

SUR LE THÈME DE L'ASTROPHOTONIQUE

Par Philippe ADAM



SOLUTION SUR
PHOTONIQUES.COM



- | | | | |
|----|--|----|--|
| 1 | Technologie pour détecteurs et capteurs | 14 | Couple satellitaire |
| 2 | Opère à Pasadena ... et dans l'espace | 15 | Mesure le bruit ambiant... de l'univers |
| 3 | Peut être aussi adaptative | 16 | Opérateur spatial français |
| 4 | Un œil à quelques millions de kilomètres | 17 | Qualifie une station alternative et périodique |
| 5 | Grand Photonicien Spatial ! | 18 | Cacher ce disque que je ne saurais voir |
| 6 | Peut qualifier une enfance atmosphérique agitée | 19 | Astronome américain... télescopique |
| 7 | Prend le problème sous le bon angle | 20 | Les Piliers de la Création en est une célèbre |
| 8 | Vivier de sœurs jumelles pour la Terre | 21 | Pionnier de l'imagerie électronique |
| 9 | Monde lointain | 22 | Optical Payload for Lasercomm Science |
| 10 | Fenêtre pour observer | 23 | Technique spatialisée avec LISA |
| 11 | Configuration télescopique | 24 | Découpage d'image par région d'intérêt |
| 12 | Les surfeurs sur site n'échappent pas à son objectif | 25 | Orbite à 400 km au-dessus de nos têtes |
| 13 | Œil de poisson dans l'espace | | |

LIAISON PAR FIBRE OPTIQUE DE 1023 KM POUR COUPLER 2 HORLOGES ATOMIQUES ENTRE PARIS ET TURIN

Une équipe de recherche internationale a mis au point un lien par fibre optique de 1023 km entre les instituts de métrologie de Paris et de Turin pour la diffusion des signaux issus d'horloges atomiques, sans dégradation de leur précision. Cet outil fiable et robuste est indispensable aux nouveaux développements de métrologie comme le développement d'échelles de temps plus précises basées sur des fréquences optiques.

Les laboratoires de métrologie comme le LNE-SYRTE à Paris ou l'INRIM à Turin détiennent des horloges atomiques extrêmement performantes utilisées pour maintenir les échelles de temps qui servent de référence au niveau français et international, comme le Temps Atomique International. Afin de pouvoir comparer les signaux délivrés par ces horloges, il est nécessaire qu'elles puissent communiquer entre elles. La technique utilisant des réseaux de satellites étant devenue trop imprécise par rapport à la stabilité en fréquence des meilleures horloges atomiques, une autre option s'est développée consistant à utiliser les réseaux de fibre optique.

Une collaboration franco-italienne entre le Laboratoire de physique des lasers (LPL, CNRS / Université Sorbonne Paris Nord), Systèmes de Référence Temps-Espace (SYRTE, CNRS / Observatoire de Paris – PSL / Sorbonne Université), le Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE) et l'Istituto nazionale di ricerca metrologica (INRIM) à Turin vient de démontrer le fonctionnement quasiment sans interruption pendant quatre mois d'une liaison par fibre optique de 1023 km entre les instituts métrologiques italien et français. C'est la première fois qu'une liaison d'une telle longueur fonctionne 24 heures sur 24 aussi longtemps, ce qui montre son potentiel à offrir un service scientifique en continu. La partie française s'appuie sur l'infrastructure de recherche REFIMEVE qui permet de disséminer sur plus de 6000 km de liens optiques sur tout le territoire national, via le réseau de fibres optiques de RENATER, la stabilité et l'exactitude des références nationales temps-fréquence élaborées par le LNE-SYRTE.

Le faisceau d'un laser asservi à l'horloge atomique de référence est injecté dans la fibre optique sur un des canaux réservés du multiplex, les autres restant utilisés pour transmettre les données de télécommunications sans perturbation du signal. Tout au long du parcours, des stations relais permettent de répéter le signal pour l'injecter d'un lien à un autre. Les bruits induits par les fluctuations thermiques et les vibrations acoustiques, qui sont susceptibles de dégrader le signal transmis, sont compensés avec un système électronique.

La liaison franco-italienne a permis de comparer pendant quatre mois les horloges atomiques au Cs, Rb et Yb des deux pays, soulignant le potentiel des liens optiques fibrés pour évaluer les bilans d'incertitude de ces horloges. La caractérisation de l'incertitude induite par l'utilisation du lien optique (inférieure à 6.10^{-19}) conforte l'idée qu'il pourra être utilisé dans le



Schéma des liaisons par fibre optique permettant de transférer des signaux ultrastables de temps et de fréquence en France et dans les pays voisins. La liaison franco-italienne s'appuie sur l'infrastructure nationale de recherche REFIMEVE entre Paris et Modane.

Crédit : C. Clivati et al., Phys. Rev. Applied **18**, 054009 (2022)

développement d'échelles de temps basées sur l'optique. En effet la définition actuelle de la seconde, reposant sur une transition atomique du ^{133}Cs dans le domaine micro-onde, a une précision de l'ordre de 10^{-16} . En utilisant plutôt des transitions dans le domaine optique d'atomes ou d'ions, cette précision pourrait atteindre 10^{-18} . Des applications multiples en découleraient comme la mesure encore plus précise du champ gravitationnel terrestre ou des constantes fondamentales de la physique et le test des théories physiques au-delà du modèle standard. Ces résultats sont publiés dans la revue Physical Review Applied. De nombreuses autres applications des liens optiques, et en particulier de REFIMEVE, sont en cours d'exploration, notamment en photonique et en spectroscopie atomique et moléculaire de précision. ●

SOURCE

Actualité scientifique de l'Institut de physique du CNRS du 20/12/2022

POUR EN SAVOIR PLUS

C. Clivati et al., "Coherent optical fiber link across Italy and France,"

Phys. Rev. Applied **18**, 054009 (2022)

DOI: 10.1103/PhysRevApplied.18.054009

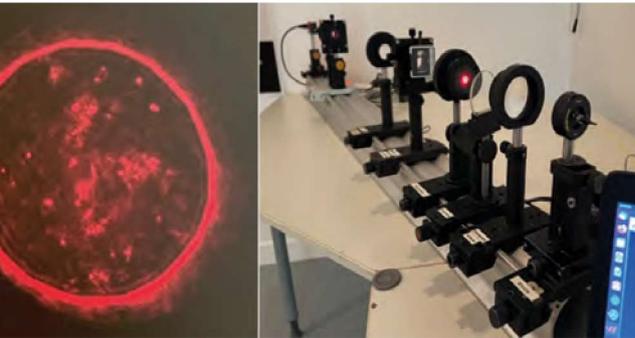
<https://www.refimeve.fr/index.php/fr/>

Coronographe des étoiles en laboratoire... et découvrir des planètes

Pierre BAUDOZ

LESIA, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université,
Université Paris Cité, 5 place Jules Janssen, 92195 Meudon, France

pierre.baudoz@obspm.fr



Éteindre une étoile, voilà une drôle d'idée !

C'est pourtant que ce que l'on propose aux étudiants avec cette expérience. L'objectif est de comprendre le principe du coronographe appliqué à l'observation de planètes extrasolaires. Avec un montage simple, on démontre comment atténuer optiquement la lumière d'une étoile sans modifier l'image d'une planète extrasolaire qui orbite autour de cette dernière.

<https://doi.org/10.1051/photon/202211724>

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.

Le critère de Rayleigh considère que l'on peut distinguer deux points distincts du champ de vue lorsque le maximum principal de l'image d'un des objets coïncide avec le minimum de l'autre image. Cette définition du pouvoir de résolution est incomplète si l'on n'ajoute pas que les sources doivent avoir le même éclairement. Prenons deux objets ponctuels d'éclairements très différents, la diffraction augmente significativement la distance minimale nécessaire pour les distinguer puisque la source faible n'est détectée que lorsqu'elle produit un éclairement significativement supérieur aux pieds de la tâche de diffraction de l'objet brillant.

Pour rétablir la capacité de distinguer les deux objets, il faut soit minimiser les pieds de la tâche de diffraction par des techniques d'apodisation (au risque de conserver l'objet central brillant en général trop

éblouissant pour les caméras) soit supprimer la lumière de la source centrale sans modifier la transmission du reste du champ de vue. C'est l'objectif de la coronographie.

Un banc de démonstration

La coronographie est une technique qui permet donc d'augmenter la dynamique des observations en diminuant voire supprimant la lumière de l'objet placé sur l'axe central de l'instrument tout en modifiant au minimum la transmission du reste du champ de vue.

Son application étant principalement astronomique, elle est rarement enseignée dans les cursus optiques. Pourtant, elle ne comporte pas de difficulté conceptuelle et représente une très belle application des principes de diffraction de la lumière. Cette technique se trouve

de plus aujourd'hui au cœur des nouveaux instruments d'imagerie astronomique dans le contexte de détection de planètes extrasolaires. Par exemple, 2 des 3 instruments du télescope spatial James Webb lancé en décembre 2021 intègrent des coronographes et les 3 premiers instruments du futur télescope géant européen de 39m de diamètre en seront également équipés.

Nous avons développé un petit banc de démonstration au sein du laboratoire LESIA de l'Observatoire de Paris. Il est utilisé pour des enseignements au niveau Master 2 mais également pour des démonstrations grand public lors de portes ouvertes par exemple. Le banc démontre plutôt la coronographie stellaire qui est apparue dans les années 80 et qui a pris tout son essor depuis une vingtaine d'année avec son utilisation pour la détection de planètes extrasolaires (Voir encart).