



Programme et publications PLÉNIÈRES

Date: Mardi, 03.07.2018	
9:30 - 10:30	PL-01: Session plénière #1
Auditorium	
16:30 - 18:30	PL-02: Session plénière #2
Auditorium	
Date: Mercredi, 04.07.2018	
14:00 - 16:00	PL-03: Session plénière #3
Auditorium	
Date: Vendredi, 06.07.2018	
14:00 - 16:00	PL-04: Session plénière #4
Auditorium	

Présentations

PL-01: Session plénière #1

Heure: Mardi, 03.07.2018: 9:30 - 10:30 · Salle: Auditorium

9:30 - 10:30

Plénière

DETECTEURS ET DETECTIONS D'ONDES GRAVITATIONNELLES

A. Brillet, C. Man, J.-Y. Vinet

Artémis/Observatoire de la Côte d'Azur/CNRS; alain.brillet49@gmail.com

Après avoir présenté rapidement l'évolution de la théorie des ondes de gravitation depuis Einstein en 1916 ainsi que quelques sources d'ondes et leurs propriétés connues ou supposées, nous nous concentrerons sur les divers aspects de l'optique des détecteurs interférométriques qui ont apporté les premières détections en 2015 et 2017. Finalement, nous discuterons l'apport de ces premières détections des points de vue physique et astrophysique et donnerons un aperçu des projets en cours

PL-02: Session plénière #2

Heure: Mardi, 03.07.2018: 16:30 - 18:30 · Salle: Auditorium

16:30 - 17:10

Plénière

LES INCROYABLES PROGRES DES SYSTEMES LASER A IMPULSIONS ULTRA-BREVES ET LEURS APPLICATIONS

C. J. Saraceno

Ruhr Universität Bochum, Allemagne; clara.saraceno@ruhr-uni-bochum.de

Les progrès réalisés pendant la dernière décennie dans la performance des lasers femtoseconde continue de révolutionner de nombreux domaines. En particulier, les lasers à haute puissance donnent de l'élan à de nombreux nouveaux domaines d'applications. Dans cette présentation, nous passerons en revue l'état de l'art des lasers femtoseconde de haute puissance, présenterons les orientations futures de la technologie et les nouveaux champs d'application rendus possibles par ces progrès.

17:10 - 17:50

Plénière

PROGRES DANS LA MESURE EN TEMPS REEL DES VAGUES SCELERATES ET DES INSTABILITES DANS LES FIBRES OPTIQUES

J Dudley¹, P Ryczkowski², M Närhi², C Billet¹, J.-M. Merolla¹, G Genty²

¹FEMTO-ST, UMR 6174 CNRS-Université Bourgogne Franche-Comté, Besançon, France; ²Laboratory of Photonics, Tampere University of Technology, Tampere, Finland; john.dudley@univ-fcomte.fr

Nous présentons un aperçu de nos travaux dans le domaine de la mesure des instabilités optiques et des vagues scélérates (« rogue waves ») observées dans plusieurs scénarios associés à la propagation non-linéaire dans des fibres optiques.

17:50 - 18:30

Plénière

PHOTONS, ELECTRONS, PLASMONS...OU EN EST-ON ?

E. Boer-Duchemin

ISMO, France; elizabeth.boer-duchemin@u-psud.fr

Dans cet exposé nous discuterons des différentes possibilités pour exciter localement et électriquement des photons et des plasmons de surfaces. En particulier nous considérerons l'utilisation d'une *jonction tunnel* comme nanosource de lumière et de plasmons et nous expliciterons quelques exemples d'expériences fondamentales et appliquées.

PL-03: Session plénière #3

Heure: Mercredi, 04.07.2018: 14:00 - 16:00 · Salle: Auditorium

14:00 - 14:40

Plénière

LASERS, ATOMES FROIDS ET MESURE DU TEMPS

C. Salomon

LKB, France; salomon@lkb.ens.fr

Nous décrivons les avancées de la mesure du Temps permises par l'utilisation des lasers pour piéger et refroidir les atomes. Au cours des deux dernières décennies la précision de la mesure du Temps a gagné environ quatre ordres de grandeur. L'erreur résiduelle des horloges optiques les plus récentes n'excède pas une seconde sur l'âge de l'univers !

14:40 - 15:20

Plénière

MIXITE DES SCIENCES ET ENJEUX DE L'INCLUSION DES FEMMES DANS LES METIERS SCIENTIFIQUES

N. Lapeyre

CERTOP, France; nlapeyre@univ-tlse2.fr

Cette intervention vise à présenter l'état de la féminisation des domaines scientifiques présents dans le colloque Optique Toulouse 2018, ainsi que les logiques d'exclusion genrées sous-jacentes à l'œuvre. Elle permettra en outre de mettre en évidence les enjeux de l'égalité professionnelle et de proposer des pistes d'inclusion des femmes.

15:20 - 16:00

Plénière

ACCELERATEUR LASER PLASMA

V. Malka^{1,2}

¹LOA, École polytechnique, ENSTA ParisTech, CNRS, Univ. Paris-Saclay, 828 Bd des Maréchaux, 91762 Palaiseau Cedex, France.; ²Department of Physics and Complex Systems, Weizmann Institute of Science, Rehovot, 761001, Israel; victor.malka@polytechnique.edu

Le contrôle du mouvement des électrons relativistes avec des lasers permet de manière efficace et élégante de produire des champs électriques ultra-intenses nécessaires à l'amélioration des paramètres de faisceaux d'électrons qu'ils produisent. C'est la maîtrise de ce mouvement qui a permis l'essor de ce nouveau type d'accélérateurs.

PL-04: Session plénière #4

Heure: Vendredi, 06.07.2018: 14:00 - 16:00 · Salle: Auditorium

14:00 - 14:40

Plénière

LES NANOPARTICULES ORGANIQUES FLUORESCENTES : UN NOUVEL OUTIL D'IMAGERIE BIOMEDICALE

S. Fery-Forgues

Laboratoire SPCMIB (CNRS UMR 5068), France; sff@chimie.ups-tlse.fr

Grâce à leurs propriétés uniques (brillance, biocompatibilité, sélectivité), ces nano-objets permettent de repousser certaines limitations inhérentes à l'imagerie optique du vivant. Quelques applications sont l'angiographie, la détection de tumeurs et l'aide au geste chirurgical.

14:40 - 15:20

Plénière

LES MICROCAVITÉS FIBRÉES ET LEURS APPLICATIONS AUX TECHNOLOGIES QUANTIQUES

J. Reichel

Laboratoire Kastler Brossel, ENS–Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, Collège de France, 24 rue Lhomond, 75005 Paris, France; jakob.reichel@ens.fr

The Fiber Fabry-Perot (FFP) cavity with laser-machined mirrors is a new type of optical microcavity which combines a rugged, miniaturized, inherently fiber-coupled design with exceptional optical properties. It has a large impact in quantum technologies and cavity electrodynamics and is now being used in applications as diverse as single-photon sources, quantum metrology, and isotopic gas analysis. I will give an introduction to FFP cavities and a brief review of some of their applications.

15:20 - 16:00

Plénière

LA MICROSCOPIE OPTIQUE COMPUTATIONNELLE

A. Sentenac, P. Chaumet, K. Belkebir, G. Soriano, H. Giovannini, G. Maire

Institut Fresnel, France; anne.sentenac@fresnel.fr

La microscopie computationnelle consiste à considérer le microscope comme un système combinant une instrumentation et des algorithmes de reconstruction.

DETECTEURS ET DETECTIONS D'ONDES GRAVITATIONNELLES

Alain Brillet¹, Catherine Man¹, Jean-Yves Vinet¹

¹ *Artémis/Observatoire de la Côte d'Azur/CNRS, Boulevard de l'Observatoire, CS 34229,06304
NICE Cedex 4, France*

abrillet@oca.eu

RÉSUMÉ

Après avoir présenté rapidement l'évolution de la théorie des ondes de gravitation depuis Einstein en 1916 ainsi que quelques sources d'ondes et leurs propriétés connues ou supposées, nous nous concentrerons sur les divers aspects de l'optique des détecteurs interférométriques qui ont apporté les premières détections en 2015 et 2017. Finalement, nous discuterons l'apport de ces premières détections des points de vue physique et astrophysique et donnerons un aperçu des projets en cours.

MOTS-CLEFS : *ondes gravitationnelles ; détecteur ; interféromètre ; trou noir*

1. INTRODUCTION

L'existence d'ondes gravitationnelles, variations temporelles de la courbure de l'espace-temps résultant du mouvement d'objets massifs avait été prévue par Einstein en 1916 comme une des conséquences de sa théorie de la Relativité Générale, publiée l'année précédente. On a douté de leur réalité physique pendant près de 40 ans, avant que le physicien britannique Pirani ne montre quels pourraient être leurs effets dans un laboratoire, puis que Joseph Weber de l'Université de Maryland ne commence à essayer de les détecter par le changement de l'amplitude des vibrations qu'elles pourraient induire dans un résonateur mécanique à très faibles pertes (des cylindres d'aluminium dont il essayait de mesurer les contraintes avec des capteurs piézoélectriques). Il a cru y être parvenu pendant quelques années, avant qu'il ne soit démontré que les signaux qu'il observait étaient beaucoup trop intenses pour être interprétés comme des ondes de gravitation, et que d'autres expérimentateurs échouent à retrouver des signaux analogues, malgré une sensibilité supérieure à la sienne. En 1972, Rai Weiss, à MIT, avait produit un rapport non publié qui proposait une autre technique de détection utilisant des interféromètres laser de dimensions kilométriques, potentiellement beaucoup plus sensibles, à condition toutefois de réaliser d'énormes progrès par rapport aux technologies existantes dans des domaines variés : puissance et stabilité des lasers, réflectivité et planéité des composants optiques, isolation sismique et précision d'alignement de ces mêmes composants, réduction des pertes mécaniques et optiques, qualité du vide dans l'interféromètre, etc... et c'est seulement à partir du début des années 1980 que l'on a commencé à espérer que des solutions puissent être trouvées. Pour ce qui concerne Virgo nous avons commencé à travailler indépendamment à Orsay (lasers et optique) et à Pise (isolation sismique) avant de faire connaissance à Rome en 1985 et de décider de travailler ensemble, compte tenu de la complémentarité de nos expertises. Le financement du projet Virgo, déposé en 1989 auprès du CNRS et de l'INFN, a été évalué indépendamment, puis approuvé par les deux institutions en 1992. La collaboration avec le projet américain de deux détecteurs, LIGO, avait commencé de façon informelle dès 1982, suivie par, de multiples échanges de chercheurs entre notre groupe d'Orsay et celui de Rai Weiss, pour aboutir en 2007 à la décision de publier ensemble tous les résultats futurs, dans la mesure où nos détecteurs auraient des sensibilités comparables. En 2010 LIGO et Virgo avaient atteint ou dépassé leurs objectifs de sensibilité, démontré une très bonne fiabilité, et commençaient la réalisation d'interféromètres de seconde génération, pour une sensibilité accrue

d'un facteur 10, qui a commencé à fonctionner en 2015 pour LIGO et en 2017 pour Virgo, et à apporter les premières détections de coalescences de trous noirs doubles, puis d'étoiles à neutrons. Ce dernier événement a rapidement été confirmé par des observations dans le domaine électromagnétique depuis les rayons g.jusqu'aux signaux hyperfréquences. Ces premières détections ont déjà permis de confirmer avec une bonne précision les principales propriétés des ondes de gravitation (polarisation, vitesse de propagation), de commencer à comprendre le processus de formation des métaux lourds, et aussi à apporter de nouvelles questions : comment se sont formés ces trous noirs de quelques dizaines de masses solaires, apparemment beaucoup plus nombreux qu'attendu par les modèles astrophysiques existants ?

2. DEVELOPPEMENTS OPTIQUES

Pendant l'exposé, nous nous concentrerons principalement sur les travaux de Virgo dans le domaines de l'optique :

- lasers Nd-YAG ultrastables de forte puissance, puis lasers fibrés
- interféromètres à recyclage, théorie et pratique
- alignement et contrôle de l'interféromètre
- nouvelle silice à très faibles pertes optiques et mécaniques
- miroirs à très faibles pertes : réflectivité 99,999%, planéité $\lambda/2000$
- compensation d'effets thermiques

LES INCROYABLES PROGRES DES SYSTEMES LASER A IMPULSIONS ULTRA-BREVES ET LEURS APPLICATIONS

Clara J. Saraceno

¹ *Photonics and Ultrafast Laser Science, Ruhr Universität Bochum, Bochum, Germany*

clara.saraceno@ruhr-uni-bochum.de

RÉSUMÉ

Les progrès réalisés pendant la dernière décennie dans la performance des lasers ultrarapides continue de révolutionner de nombreux domaines de la science et de l'industrie. En particulier, les lasers à haute puissance continuent de donner un nouvel élan dans de nombreux domaines d'applications. Dans cette présentation, nous passerons en revue l'état de l'art des lasers ultrarapides de haute puissance, présenterons les orientations futures de la technologie et les nouveaux champs d'application rendus possibles par ces progrès.

MOTS-CLEFS : *lasers ; ultrafast ; femtoseconde ; picoseconde ; THz*

Les lasers ultrarapides (picoseconde et femtoseconde) continuent d'être à l'avant-garde de nombreuses percées scientifiques et industrielles. La combinaison unique de durées d'impulsions ultracourtes et d'intensités élevées offre aux chercheurs du monde entier des possibilités uniques de dévoiler la dynamique temporelle des constituants fondamentaux de la matière, ainsi que de modifier les propriétés d'un large éventail de matériaux. Il est donc tout à fait naturel que les progrès dans la performance de ces systèmes laser agissent continuellement comme un catalyseur pour de nombreux domaines de recherche interdisciplinaires nouveaux et passionnants.

Le principal outil de travail de ce domaine reste la technologie basée sur le Ti:Sapphire (Ti:Sa) [1]. Les amplificateurs laser Ti:Sa à plusieurs étages, disponibles de façon commerciale, fournissent des impulsions avec des énergies de plusieurs millijoules dans le proche infrarouge avec des durées typiques de quelques dizaines de femtosecondes, permettant d'obtenir facilement des puissances crêtes de l'ordre du gigawatt. Cependant, la faible capacité d'extraction de chaleur de ces systèmes laser limite fortement la puissance moyenne pouvant être obtenue à quelques dizaines de watts dans les cas optimaux. Une puissance moyenne limitée à une énergie d'impulsion donnée entraîne un compromis indésirable sur le taux de répétition du train d'impulsions. Par conséquent, les chercheurs doivent souvent soit opérer à un faible taux de répétition, soit abandonner tout simplement les lignes de recherche où des énergies d'impulsions élevées sont requises.

Les systèmes laser Ti:Sa restent toutefois le principal moteur de la science ultrarapide. Un exemple frappant est le domaine de la science attoseconde dans la physique des champs élevés où les impulsions dans le proche infrarouge énergétiques (mJ) et courtes (inférieures à 100 fs) sont généralement requises pour la génération de rayonnement XUV via de la génération d'harmoniques d'ordre élevées. La plupart de ces expériences utilisent ce rayonnement XUV pour des études spectroscopiques fonctionnent donc avec des trains d'impulsions à un taux de répétition de quelques kilohertz à quelques dizaines de kilohertz, limité par la disponibilité de sources combinant des impulsions énergétiques à un taux de répétition plus élevé. Dans ce domaine, ainsi que dans de nombreux autres domaines de la science et de l'industrie le faible taux de répétition des sources laser à haute énergie actuelles est une limitation importante ou, dans certains cas, même une limitation fondamentale. Très généralement, un taux de répétition plus élevé à une énergie impulsienne donnée améliorera les statistiques dans pratiquement toutes les méthodes de mesure où des signaux intégrés dans le temps sont enregistrés, ou permettrait d'augmenter la vitesse de

mesure dans des expériences à prise unique, ou bien, dans le meilleur des cas, une combinaison bénéfique des deux.

Dans la recherche scientifique, la plupart des efforts visant à augmenter la puissance moyenne des lasers ultrarapides ont été jusqu'à présent motivées par les applications mentionnées ci-dessus, nécessitant des impulsions XUV pour diverses études spectroscopiques [2]. En fait, un grand nombre de méthodes expérimentales résolues en temps utilisant des impulsions XUV peuvent être considérablement améliorées si un flux plus élevé est disponible [3]. Ces expériences ont déjà fortement bénéficiées des derniers progrès dans l'amélioration de systèmes laser de puissance moyenne élevée < 10 W pouvant tenir sur une table optique, et continuent à progresser de pair avec le développement de ces sources laser ultrarapides, qui continuent d'atteindre de nouvelles limites.

Néanmoins, les progrès réalisés dans le développement de systèmes laser ultrarapides plus puissants (> 50 W) ont été en grande partie motivés par le marché industriel grandissant de l'usinage laser de haute précision. Dans ce cas, l'ablation à froid d'une grande variété de matériaux peut être conduite à des vitesses très rapides si un taux de répétition plus élevé est disponible à une énergie d'impulsion suffisante. Il est intéressant de noter que la majorité des systèmes laser ultrarapides de puissance, récemment démontrés, l'ont en fait été dans un environnement de R&D industriel.

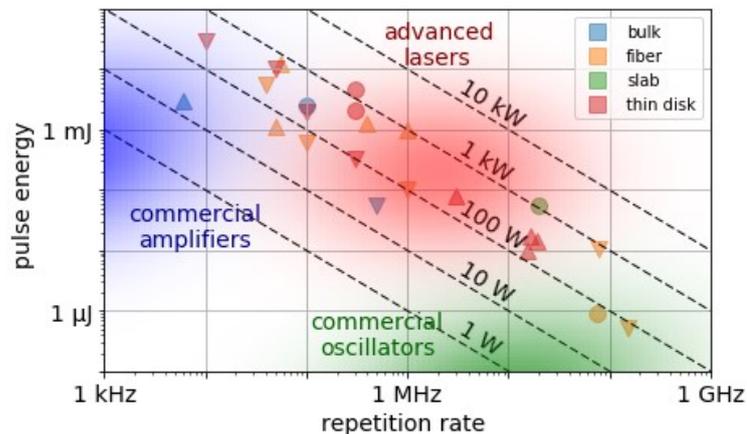


Figure 1: Etat de l'art de systèmes laser ultrarapides de puissance basés sur différentes géométries laser. Cette figure illustre la tendance de la technologie laser ultrarapide actuelle vers une puissance moyenne de plusieurs kilowatts.

En outre, de nombreux autres nouveaux domaines de recherche émergent aujourd'hui du fait de la disponibilité de ces sources, en particulier dans d'autres régions du spectre électromagnétique. Il existe en particulier une nette tendance à développer des sources de haute puissance sur une large gamme spectrale allant du XUV au régime THz [4], en passant par les gammes UV et infrarouge moyen et lointain, pour lesquels les matériaux laser sont peu établis ou n'existent tout simplement pas pour la génération directe d'impulsions courtes. Cette tendance a été soutenue par les progrès parallèles dans les méthodes de conversion non linéaires (cristaux non-linéaires, fibres creuses remplies de gas, etc.), qui rendent très attrayante l'utilisation de lasers NIR puissants comme lasers à pompe. Dans cette présentation, nous passerons en revue l'état de l'art des sources laser ultrarapides à haute puissance, et nous présenterons les tendances actuelles de la technologie et des applications.

- [1] W. Sibbett, A. A. Lagatsky, and C. T. A. Brown, "The development and application of femtosecond laser systems," *Optics Express*, vol. 20, pp. 6989-7001, Mar 26 2012.
- [2] F. Calegari, G. Sansone, S. Stagira, C. Vozzi, and M. Nisoli, "Advances in attosecond science," *Journal of Physics B-Atomic Molecular and Optical Physics*, vol. 49, Mar 28 2016.
- [3] T. Südmeyer, S. V. Marchese, S. Hashimoto, C. R. E. Baer, G. Gingras, B. Witzel, *et al.*, "Femtosecond laser oscillators for high-field science," *Nature Photonics*, vol. 2, pp. 599-604, 2008.
- [4] C. J. Saraceno, "Mode-locked thin-disk lasers and their potential application for high-power terahertz generation," *Journal of Optics*, vol. 20, p. 044010, 2018.

PROGRES DANS LA MESURE EN TEMPS REEL DES VAGUES SCELERATES ET DES INSTABILITES DANS LES FIBRES OPTIQUES

J. M. Dudley ⁽¹⁾, P. Ryczkowski ⁽²⁾, M. Närhi ⁽²⁾, C. Billet ⁽¹⁾, J.-M. Merolla ⁽¹⁾, G. Genty ⁽²⁾

¹ Institut FEMTO-ST, UMR 6174 CNRS-Université Bourgogne Franche-Comté, Besançon, France

² Laboratory of Photonics, Tampere University of Technology, Tampere, Finland

john.dudley@univ-fcomte.fr

RÉSUMÉ

Nous présentons un aperçu de nos travaux dans le domaine de la mesure des instabilités optiques et des vagues scélérates (« rogue waves ») observées dans plusieurs scénarios associés à la propagation non-linéaire dans des fibres optiques.

MOTS-CLEFS : *optique ultrarapide, fibre optique non-linéaire, instabilités*

Ces dernières années ont vu des avancées spectaculaires dans la mesure en temps réel des signaux optiques non répétitifs ultra-rapides, ce qui a permis une meilleure compréhension de la physique sous-jacente à la propagation de ces signaux (1,2). Jusqu'à présent, les études réalisées se sont fondées sur des mesures en temps réel, effectuées soit dans le domaine spectral en utilisant des techniques de transformée de Fourier dispersive, soit dans le domaine temporel via une technique de lentille temporelle permettant d'obtenir une résolution inférieure à la picoseconde. Dans le contexte de la propagation dans des fibre optique non linéaires, ces techniques temps-réel ont été mises en application pour étudier l'instabilité de la modulation, la génération de supercontinu ou bien les turbulences optiques. D'une manière générale, les techniques de mesure en temps réel sont en passe de devenir un outil standard, très utile à la compréhension de l'influence et des effets du bruit sur toute une gamme de scénarios de propagation non linéaire (3-8).

Dans cet article, nous passerons en revue nos travaux récents dans ce domaine, et nous présenterons également la première utilisation simultanée des techniques spectrales et temporelles pour caractériser les instabilités observées lors de la génération de structures dissipatives dans un laser à fibre. Ces résultats permettent de fournir une image unique de l'évolution interne des solitons dissipatifs dans un système laser, et nous prévoyons d'autres applications de cette approche dans l'optimisation des performances et de la stabilité des lasers.

RÉFÉRENCES

1. Goda, K. & Jalali, B. Dispersive Fourier transformation for fast continuous single-shot measurements, *Nat. Photon.* **7**, 102-112 (2013).
2. Solli, D.R., Ropers, C., Koonath, P. & Jalali, B. Optical rogue waves, *Nature* **450**, 1054-1057, (2007).
3. Godin, T. et al. Real time noise and wavelength correlations in octave-spanning supercontinuum generation, *Opt. Exp.* **21**, 18452-18460 (2013).
4. Solli, D.R., Herink, G., Jalali, B. & Ropers, C. Fluctuations and correlations in modulation instability, *Nat. Photon.* **6**, 463-468 (2012).
5. Wetzel, B. et al. Real-time full bandwidth measurement of spectral noise in supercontinuum generation, *Sci. Rep.* **2**, 882 (2012)
6. Suret, P. et al. Single-shot observation of optical rogue waves in integrable turbulence using time microscopy, *Nat. Commun.* **7**, 13136 (2016).
7. Närhi, M. et al. Real-time measurements of spontaneous breathers and rogue wave events in optical fibre modulation instability. *Nat. Commun.* **7**, 13675 (2016).
8. Ryczkowski P. et al. Real-time full-field characterization of transient dissipative soliton dynamics in a mode-locked laser, *Nature Photonics* **12**, 221–227 (2018)

PHOTONS, ÉLECTRONS, PLASMONS...OÙ EN EST-ON ?

Elizabeth Boer-Duchemin

Institut des Sciences Moléculaires d'Orsay (ISMO), CNRS, Univ Paris Sud, Université Paris-Saclay,
Orsay, France

Elizabeth.Boer-Duchemin@u-psud.fr

RÉSUMÉ

Dans cet exposé nous discuterons des différentes possibilités pour exciter localement et électriquement des photons et des plasmons de surfaces. En particulier nous considérerons l'utilisation d'une *jonction tunnel* comme nanosource de lumière et de plasmons et nous expliciterons quelques exemples d'expériences fondamentales et appliquées.

MOTS-CLEFS : *plasmonique ; nanosource ; plasmons de surface ; jonction tunnel*

Le succès de la miniaturisation de l'électronique est bien connu : nos téléphones portables, par exemple, sont de plus en plus petits et de plus en plus puissants. Il n'en reste pas moins que l'électronique est fondamentalement limitée en vitesse et en bande passante. Par contraste, de grandes quantités d'information sont transportées à haute fréquence par des fibres optiques qui restent relativement volumineuses, car elles sont limitées en taille par la diffraction. Et si nous pouvions simultanément profiter de la miniaturisation de l'électronique et de la haute fréquence de la photonique ? C'est l'idée de la "plasmonique", qui utiliserait des "plasmons de surface polaritons" dans ses circuits — c'est-à-dire des oscillations collectives d'électrons sur la surface d'un métal qui sont couplées à une onde électromagnétique.

Pour qu'un jour les circuits plasmoniques puissent devenir une réalité, il faudra disposer d'une nanosource *électrique* pour ces plasmons de surface. En particulier, les plasmons de surface peuvent être excités électriquement par un faisceau d'électrons de haute énergie de l'ordre quelques dizaines de keV (comme par ex. dans un microscope électronique en transmission à balayage [1]). Cependant, un tel dispositif n'est pas compatible des futures applications. Une autre possibilité, qui est à la fois électrique, locale et de *basse* énergie (de l'ordre de 2 à 3 eV), est d'utiliser une *jonction tunnel*. Comme prototype, nous pouvons considérer la jonction tunnel formée par la pointe métallique d'un microscope à effet tunnel (STM) d'une part, et un échantillon métallique d'autre part [2]. Les plasmons de surface excités sont ensuite transformés en lumière, et ce sont ces photons qui sont détectés. Une telle nanosource pourrait être donc considérée comme une nanosource de plasmons de surface mais aussi de lumière.

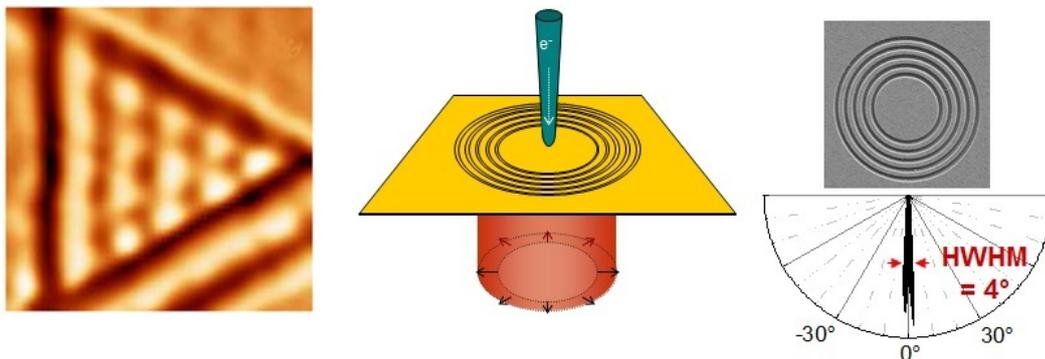


FIGURE 1 : Gauche : Intensité de photons émis en fonction de la position de l'excitation STM sur un îlot triangulaire d'or (taille de l'image : 11 nm; $I_{tunnel} = 300$ nA; $V = 1,73$ V; $T = 7$ K; $h\nu = 1,7$ eV) [3]; Centre et droite : excitation STM d'une lentille plasmonique formée par des sillons annulaires dans un film d'or (diamètre intérieur = 5 μ m). Cette excitation génère un faisceau de faible divergence possédant des propriétés de polarisation particulières [4].

C'est le courant tunnel *inélastique* qui est considéré comme la source de l'excitation [2, 5], et il peut être assimilé à un dipôle vertical oscillant [6]. En même temps, il est bien connu dans le domaine de la science des surfaces que le microscope à effet tunnel sonde la densité locale des états électroniques [7]. Dès lors, est-ce que le STM-nanosource est capable de sonder la densité locale d'états *électromagnétiques*? C'est l'une des questions qui seront abordées durant cet exposé.

Les avantages de la STM-nanosource — le fait qu'elle soit localisée et facilement déplacée — sont exploités dans des expériences plutôt fondamentales [8, 9, 10, 11, 12, 13] ainsi que dans des expériences tournées vers les applications [4, 14]. Par exemple, le couplage dipôle-dipôle intermoléculaire a été finement sondé en utilisant cette technique [11]. Ailleurs, la STM-nanosource a été utilisée pour activer une microsource de lumière directionnelle et de faible divergence [4] (voir Figure 1). Nous n'illustrerons ici que quelques exemples des multiples possibilités offertes par une nanosource de plasmons et de photons.

RÉFÉRENCES

- [1] M. Kociak and O. Stéphan, "Mapping plasmons at the nanometer scale in an electron microscope," *Chemical Society Reviews*, 2014 2014.
- [2] J. K. Gimzewski, J. K. Sass, R. R. Schlitter, and J. Schott, "Enhanced photon-emission in scanning tunnelling microscopy," *Europhysics Letters*, vol. 8, no. 5, pp. 435–440, Mar. 1989.
- [3] G. Schull, M. Becker, and R. Berndt, "Imaging confined electrons with plasmonic light," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 101, p. 136801, Sep 2008. [Online]. Available : <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.101.136801>
- [4] S. Cao, E. Le Moal, E. Boer-Duchemin, G. Dujardin, A. Drezet, and S. Huant, "Cylindrical vector beams of light from an electrically excited plasmonic lens," *Applied Physics Letters*, vol. 105, no. 11, pp. –, 2014. [Online]. Available : <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/apl/105/11/10.1063/1.4895769>
- [5] J. Lambe and S. L. McCarthy, "Light emission from inelastic electron tunneling," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 37, pp. 923–925, Oct 1976. [Online]. Available : <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.37.923>
- [6] P. Johansson, "Light emission from a scanning tunneling microscope : Fully retarded calculation," *Phys. Rev. B*, vol. 58, pp. 10 823–10 834, Oct 1998. [Online]. Available : <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.58.10823>
- [7] J. Tersoff and D. R. Hamann, "Theory of the scanning tunneling microscope," *Phys. Rev. B*, vol. 31, pp. 805–813, Jan 1985. [Online]. Available : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.31.805>
- [8] T. Wang, E. Boer-Duchemin, Y. Zhang, G. Comtet, and G. Dujardin, "Excitation of propagating surface plasmons with a scanning tunnelling microscope," *Nanotechnology*, vol. 22, no. 17, p. 175201, Apr. 2011.
- [9] P. Bharadwaj, A. Bouhelier, and L. Novotny, "Electrical excitation of surface plasmons," *Physical Review Letters*, vol. 106, no. 22, p. 226802, Jun. 2011.
- [10] P. Merino, C. Grosse, A. Roslowska, K. Kuhnke, and K. Kern, "Exciton dynamics of c60-based single-photon emitters explored by hanbury brown-twiss scanning tunnelling microscopy," *Nature Communications*, vol. 6, pp. 8461–, Sep. 2015. [Online]. Available : <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms9461>
- [11] Y. Zhang, Y. Luo, Y. Zhang, Y.-J. Yu, Y.-M. Kuang, L. Zhang, Q.-S. Meng, Y. Luo, J.-L. Yang, Z.-C. Dong, and J. G. Hou, "Visualizing coherent intermolecular dipole–dipole coupling in real space," *Nature*, vol. 531, pp. 623–, Mar. 2016. [Online]. Available : <http://dx.doi.org/10.1038/nature17428>
- [12] H. Imada, K. Miwa, M. Imai-Imada, S. Kawahara, K. Kimura, and Y. Kim, "Real-space investigation of energy transfer in heterogeneous molecular dimers," *Nature*, vol. 538, pp. 364–, Oct. 2016. [Online]. Available : <http://dx.doi.org/10.1038/nature19765>
- [13] B. Doppagne, M. C. Chong, E. Lorchat, S. Berciaud, M. Romeo, H. Bulou, A. Boeglin, F. Scheurer, and G. Schull, "Vibronic spectroscopy with submolecular resolution from stm-induced electroluminescence," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 118, p. 127401, Mar 2017. [Online]. Available : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.118.127401>
- [14] S. Cao, E. Le Moal, F. Bigourdan, J.-P. Hugonin, J.-J. Greffet, A. Drezet, S. Huant, G. Dujardin, and E. Boer-Duchemin, "Revealing the spectral response of a plasmonic lens using low-energy electrons," *Phys. Rev. B*, vol. 96, p. 115419, Sep 2017. [Online]. Available : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.96.115419>

LASERS, ATOMES FROIDS ET MESURE DU TEMPS

SFO TOULOUSE 2018

Christophe Salomon

*Laboratoire Kastler Brossel, Ecole Normale supérieure, Université PSL, Sorbonne Université,
24 rue Lhomond, 75005 Paris, France*

salomon@lkb.ens.fr

RÉSUMÉ

Nous décrivons les avancées de la mesure du Temps permises par l'utilisation des lasers pour piéger et refroidir les atomes. Au cours des deux dernières décennies la précision de la mesure du Temps a gagné environ quatre ordres de grandeur. L'erreur résiduelle des horloges optiques les plus récentes n'excède pas une seconde sur l'âge de l'univers [1] !

Nous rappellerons les principes du piégeage et refroidissement d'atomes par laser et montrerons comment l'instrumentation a été fiabilisée, miniaturisée, et adaptée à l'industrie et au domaine spatial [2]. Les horloges et senseurs inertiels à atomes froids initialement conçus et développés dans les laboratoires deviennent aujourd'hui des instruments commerciaux aux applications nombreuses et diverses.

Nous décrivons enfin quelques tests de physique fondamentale et de la relativité que ces nouveaux instruments au sol ou dans l'espace permettent. Ainsi, dans le cadre de la mission spatiale PHARAO/ACES développée par le CNES et l'ESA une horloge à atomes froids permettra de tester le décalage gravitationnel des horloges au niveau de 2 ppm et d'effectuer des comparaisons d'horloges au niveau intercontinental avec une précision relative de fréquence de 10^{-17} [3,4].

MOTS-CLEFS : *atomes froids, lasers, horloges, tests fondamentaux*

RÉFÉRENCES

- [1] Andrew D. Ludlow, Martin M. Boyd, Jun Ye, E. Peik, and P. O. Schmidt, *Optical atomic clocks*, Rev. Mod. Phys. **87**, 637 (2015)
- [2] Ph. Laurent, M. Abgrall, Ch. Jentsch, P. Lemonde, G. Santarelli, A. Clairon, I. Maksimovic, S. Bize, Ch. Salomon, D. Blonde, J.F. Vega, O. Grosjean, F. Picard, M. Saccoccio, M. Chaubet, N. Ladiette, L. Guillet, I. Zenone, Ch. Delaroche, Ch. Sirmain, *Design of the cold atom PHARAO space clock and initial test results*, Appl. Phys. B **84**, 683-690 (2006),
- [3] Luigi Cacciapuoti and Christophe Salomon, *Space Clocks and Fundamental Tests: the ACES experiment*, EPJ Special topics, **172**, 57 (2009)
- [4] P. Laurent, D. Massonnet, L. Cacciapuoti, C. Salomon, *The ACES /PHARAO space mission*, Comptes-Rendus Acad. Sciences, Paris, **16**, 540 (2015)

MIXITE DES SCIENCES ET ENJEUX DE L'INCLUSION DES FEMMES DANS LES METIERS SCIENTIFIQUES

Nathalie Lapeyre¹

¹ CERTOP-CNRS Centre d'Etude et de recherches Travail Organisation Pouvoir, UMR 5044,
Université Toulouse Jean Jaurès, 31058 Toulouse, France

nlapeyre@univ-tlse2.fr

RÉSUMÉ

Cette intervention vise à présenter l'état de la féminisation des domaines scientifiques présents dans le colloque Optique Toulouse 2018, ainsi que les logiques d'exclusion genrées sous-jacentes à l'œuvre. Elle permettra en outre de mettre en évidence les enjeux de l'égalité professionnelle et de proposer des pistes d'inclusion des femmes.

MOTS-CLEFS : *féminisation, genre, égalité professionnelle, inclusion.*

1. INTRODUCTION

De nombreuses recherches menées en sciences humaines et sociales, particulièrement en histoire et en sociologie, ont montré le caractère séculaire de la sous-représentation des femmes au sein des métiers scientifiques et techniques, ainsi que de la production des savoirs en général.

2. LES SCIENCES ONT UN GENRE : FOCUS SUR LES DYNAMIQUES DE L'EXCLUSION DES FEMMES DES SCIENCES

Dans un premier temps, cette communication vise à dresser un état des lieux de la situation contemporaine, sachant que la physique et le domaine de l'optique et de la photonique n'échappent pas à cette dynamique historique. Il s'agit de montrer que les sciences ont un genre, tout en réalisant un focus sur les différentes dynamiques de l'exclusion, au sein des disciplines scientifiques et des métiers afférents. La position dominée des femmes dans l'institution s'explique de multiples manières. Ces dernières oscillent de l'autocensure, soit de facteurs liés aux femmes elles-mêmes, leurs intérêts différenciés, leurs manières singulières d'envisager les carrières et la progression professionnelle, leur personnalité « peu adaptée à la science » [1]; aux mécanismes de discrimination structurelle des femmes, liés à l'organisation de travail, la configuration de ses relations sociales, les réseaux de sociabilité ou encore l'ensemble des interactions au sein du collectif de travail, normées et codifiées au masculin. Dans les organisations académiques, ces derniers mécanismes de reproduction de la domination masculine restent cachés, plus couramment nommés « effet Mathilda » [2] afin de les visibiliser.

Ces différentes dynamiques s'ancrent dans une construction historique et sociale spécifiques, qui assigne aux femmes et aux hommes des places et des fonctions différenciées dans les sociétés, par le biais de stéréotypes et de mythes qui « sexualisent le savoir et donc le pouvoir » [3]. Cette construction sociale d'un rapport genré aux disciplines scientifiques, produisant l'exclusion des femmes des sciences, et agissant d'autant plus si on se rapproche des sommets des carrières scientifiques, selon la logique du plafond de verre [4], s'inscrit dans des logiques européennes voire mondialisées de sous-représentation des femmes. Ainsi, combien recense-t-on de grandes physiciennes ? [5] Et comment se configure la ségrégation sexuée interne des métiers de la physique

et/ou de l'optique, aussi bien à l'université qu'au sein des grands organismes de recherche ? Quelle est l'ampleur des inégalités de carrières entre les femmes et les hommes ?

3. ENJEUX DE L'ÉGALITÉ PROFESSIONNELLE ET EXPÉRIENCES D'INCLUSION DES FEMMES AU SEIN DES MÉTIERS SCIENTIFIQUES

Dans un deuxième temps, nous nous demanderons pourquoi et dans quelle mesure il est possible de penser l'inclusion des femmes au sein des métiers scientifiques. Afin de dépasser les inégalités et la ségrégation sexuée des carrières dans le monde du travail scientifique, quelques expérimentations récentes permettent néanmoins d'avancer quelques « bonnes pratiques » en faveur de l'égalité professionnelle femmes-hommes. Nous présenterons ainsi des pistes concrètes issues de la mise en œuvre et de l'expérimentation de politiques d'égalité professionnelle dans divers contextes scientifiques. Nous mettrons particulièrement en évidence la manière dont ces politiques ont fait leurs preuves dans d'autres champs scientifiques, notamment dans l'informatique [6] et dans l'industrie l'aéronautique [7].

Ces dernières politiques impliquent un changement de culture et de pratiques dans les domaines où elles agissent (dans les cursus de formation et/ou au sein du monde professionnel). Elles retravaillent notamment la question du/des pouvoir(s) et du rapport au pouvoir, pouvant aller jusqu'à faire émerger de nouvelles formes et/ou visages de l'*empowerment* des femmes, pouvant être traduit par « pouvoir d'agir », qui peuvent être actuellement perceptibles au sein des entreprises et/ou organisations de travail. Ainsi, nos dernières recherches mettent en évidence que de nouvelles formes d'émancipation des femmes (cadres et ingénieures) émergent alors, afin d'aboutir à la construction d'une dimension plus collective et plus partagée de l'*empowerment* (*empowerment* transformatif) [8].

CONCLUSION

Cette présentation permettra d'esquisser quelques pistes d'actions concrètes qui pourraient être transférables dans le monde de la physique et de l'optique. Dans un contexte d'ouverture de la recherche à la société dans la diversité de ses composantes, la contribution des femmes aux sciences a vocation à être à l'agenda du monde de la recherche dans l'avenir [9].

RÉFÉRENCES

- [1] S. Beaufays, et B. Krais, « Femmes dans les carrières scientifiques en Allemagne : les mécanismes cachés du pouvoir », *Travail, Genre et Sociétés*, vol. n° 14, no. 2, pp. 49-68, 2005.
- [2] C. Marry, et I. Jonas, « Chercheuses entre deux passions. L'exemple des biologistes », *Travail, Genre et Sociétés*, vol. n° 14, no. 2, pp. 69-88, 2005.
- [3] Michèle Le Doeuff, *Le sexe du savoir*, Editions Aubier, 1998.
- [4] M. Buscatto, et C. Marry, « Le plafond de verre dans tous ses éclats. La féminisation des professions supérieures au XXe siècle », *Sociologie du Travail*, vol. 51, no. 2, pp.170-182, 2009.
- [5] https://www.refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/pdf/2014/04/refdp_41.pdf
- [6] C. Morley, et I. Collet, « Femmes et métiers de l'informatique : un monde pour elles aussi », *Cahiers du Genre*, vol. 62, no. 1, pp. 183-202, 2017.
- [7] Nathalie Lapeyre, « Des avions et des femmes. Politique d'égalité professionnelle dans une entreprise aéronautique en France », in Nadya Araujo Guimaraes, Margaret Maruani, Bila Sorj (Eds), *Genre, race, classe. Travailler en France et au Brésil* (pp. 195-206), Paris, L'Harmattan, Logiques Sociales.
- [8] N. Lapeyre, « Le travail de l'*empowerment* au sein des organisations », *Cahiers du Genre*, n°63, pp. 81-98, 2017.
- [9] D. Gardey, « La part de l'ombre ou celle des lumières ? Les sciences et la recherche au risque du genre », *Travail, Genre et Sociétés*, vol. 14, no. 2, pp. 29-47, 2005.

ACCÉLÉRATEUR LASER PLASMA

Victor Malka^{1,2}

¹LOA, École polytechnique, ENSTA ParisTech, CNRS, Univ. Paris-Saclay, 828 Bd des Maréchaux, 91762 Palaiseau Cedex, France.

²Department of Physics and Complex Systems, Weizmann Institute of Science, Rehovot, 761001, Israel.

victor.malka@polytechnique.edu

RÉSUMÉ

Le contrôle du mouvement des électrons relativistes avec des lasers permet de manière efficace et élégante de produire des champs électriques ultra-intenses nécessaires à l'amélioration des paramètres de faisceaux d'électrons qu'ils produisent. C'est la maîtrise de ce mouvement qui a permis l'essor de ce nouveau type d'accélérateurs que sont les accélérateurs laser plasma.

MOTS-CLEFS : *accélérateur ; plasma ; laser*

1. INTRODUCTION

Les accélérateurs de particules ont permis de réaliser des découvertes majeures concernant la structure de la matière et des interactions fondamentales. Ils ont de plus ouvert un très vaste domaine d'applications innovantes touchant de nombreux domaines. C'est pour répondre à la demande croissante des chercheurs de différentes communautés scientifiques que ces dernières années ont été marquées par l'émergence d'installations délivrant des faisceaux aux performances records: faisceaux de protons à quelques TeV avec des luminosités extrêmes d'intérêt pour la physique des hautes énergies, faisceaux d'électrons à très forts courants pour la production de flash X femtosecondes en utilisant le schéma de laser à électrons libres ou encore faisceaux d'électrons picosecondes pour la production de faisceaux X par rayonnement synchrotron. Ces accélérateurs reposent sur l'utilisation de cavités radio-fréquences (RF) dont le champ accélérateur est limité à quelques dizaines de mégavolt par mètre: au-delà de cette valeur, les parois de la structure commencent à être endommagées par le champ électrique qui les ionise (c'est le phénomène de claquage). Cette limite du champ explique pourquoi les accélérateurs deviennent de plus en plus grands. Par exemple, Le Grand Collisionneur de Hadrons (LHC) du CERN, près de Genève, qui a permis avec succès la mesure de la masse du boson de Higgs [1], est un accélérateur circulaire aussi long que le boulevard périphérique de Paris. Son possible successeur pourrait être l'International Linear Collider (ILC) qui utilisera 16000 cavités RF pour accélérer des électrons et des positrons à 250 Gigaélectronvolt (GeV) sur 31 km ou le Compact Linear Collider (CLIC), d'une longueur de 40 km, qui fera des collisions électrons positrons à 3 Teraélectronvolt (TeV). La longueur des accélérateurs ne pouvant croître indéfiniment, on comprend toute l'importance de trouver des solutions alternatives à l'accélération de particules.

2. PRINCIPE DE L'ACCELERATEUR LASER-PLASMA

L'utilisation de plasma permet de pallier à cet inconvénient : les plasmas étant des milieux ionisés, ils sont capables de supporter des champs électriques de l'ordre de quelques centaines de gigavolt par mètre, soit plus de 10000 fois plus élevés que les champs utilisés dans les accélérateurs conventionnels, permettant ainsi une diminution significative de la longueur d'accélération. Ces champs électriques de grandes amplitudes peuvent être excités lors de l'interaction d'un laser ultra-intense et ultra-court avec un plasma. Sous l'effet du champ laser très intense, le gaz est ionisé de façon quasi-instantanée par le pied de l'impulsion laser. Le reste de l'impulsion laser interagit donc avec un plasma. Dans ce régime de l'interaction laser-plasma à ultra-haute intensité la force pondéromotrice qui agit comme une force de pression de radiation pousse les électrons hors des zones

de champs forts. Elle provoque ainsi un déplacement des électrons alors que les ions, plus lourds, n'ont pas le temps de bouger. On établit ainsi un champ de charge d'espace qui provoque l'oscillation des électrons autour des ions une fois le laser passé. Ce phénomène permet d'exciter une onde plasma de forte amplitude et dont la vitesse de phase est égale à la vitesse de groupe du laser dans le plasma (soit proche de la vitesse de la lumière). Cette interaction donne lieu à la génération de véritables faisceaux d'électrons dont le schéma de principe est représenté sur la figure 2 et sur la photo correspondante. Ce concept d'accélérateur « laser-plasma » a été proposé dès 1979 par T. Tajima et J. Dawson dans le régime linéaire [1]. Ce régime qui permettait d'obtenir des champs d'accélération de GV/m. Un saut prodigieux a été réalisé en 2002 avec la démonstration du régime non-linéaire et l'obtention de champ électrique crête dépassant le TV/m [2] et ensuite en 2004 avec la production de faisceaux mono-énergétique avec un faisceau laser [3], puis en 2006 avec la première démonstration d'un faisceau stable et tunable en charge et en énergie dans le schéma de collisions d'impulsions [4].

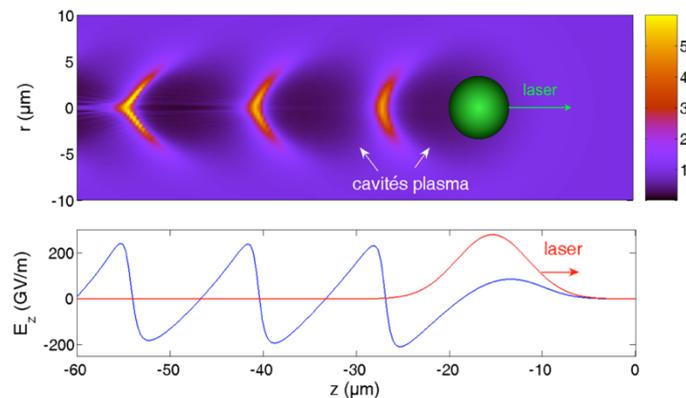


Figure 1 : L'impulsion laser (en verte) crée une perturbation de densité électronique (figure du haut). Le profil du champ électrique associé à cette onde plasma relativiste est illustré sur la figure du bas.

Ce régime non-linéaire facilite l'injection d'électrons et assoupli les contraintes de guidage. Ici, les composantes longitudinales et transverses du champ électrique atteignent facilement des amplitudes de l'ordre de 100 GeV/m. La figure 1 illustre les champs longitudinaux et transversaux produits dans ce régime non linéaire. La taille typique de la cavité est de l'ordre de la longueur d'onde de plasma λ_p , qui varie avec $n_e^{-1/2}$. Elle est d'environ 10 microns pour une densité de plasma de 10^{19} cm^{-3} . Ce régime a donné naissance un nouvel essor au domaine qu'ainsi qu'à une plétore de nouveaux schémas permettant d'améliorer de façon simple la production de faisceaux d'électrons stables et quasi mono-énergétiques au moyen d'un seule impulsion laser [4-7]. Je montre dans la suite deux concepts récemment démontrés [8].

3. MANIPULATION D'ÉLECTRONS RELATIVISTES

Contrôler l'injection : Le contrôle de l'injection dans un gradient de densité descendant, dont le schéma de principe est illustré sur la figure 2, repose sur le ralentissement de la vitesse de l'onde plasma dans la rampe de densité. Ce ralentissement qui correspond à une augmentation de la taille de la cavité abaisse le seuil de piégeage des électrons du plasma qui provoque dans le cas d'un gradient raide une injection très localisée et donc favorise l'obtention de faisceau d'électrons de bonnes qualités [9]. Le gradient raide de densité est obtenu en insérant au-dessus d'un jet de gaz une lame fine qui provoque un choc. La position du choc le long de l'axe de propagation du laser permet de changer la longueur de l'accélérateur et donc le contrôle de l'énergie des électrons produits.

Surmonter la longueur de déphasage : Dans les accélérateurs laser plasma, la vitesse de groupe du laser étant inférieure à c , les électrons injectés dans le champ accélérateur atteignent une vitesse relativiste qui peut dépasser la vitesse de groupe du laser. Ils sont accélérés jusqu'à ce qu'ils atteignent

le centre de la cavité où le champ électrique devient décélérateur [10]. La distance d'accélération optimale correspond à cette longueur. L'idée originale, dont le schéma de principe est illustré sur la figure 3, consiste à manipuler la phase des électrons dans le champ de sillage, afin de les ramener dans la région accélératrice, permettant ainsi un regain de leur énergie. Ce rephasage est opéré en augmentant la densité sur le trajet du faisceau laser à l'endroit où les électrons atteignent le centre de la bulle. Un faisceau d'électrons de 125 MeV a, par ce processus, vu son énergie presque doublée.

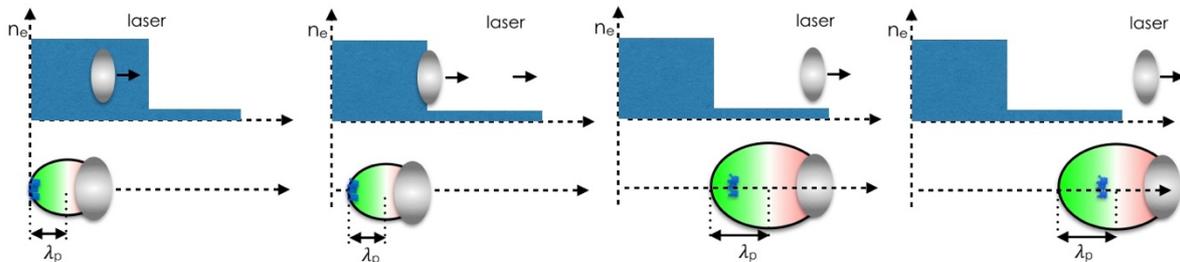


Figure 2 : Schéma de principe de l'injection de gradient de densité. Les profils de densité des deux jets sont représentés en bleu et l'impulsion laser se propage de gauche à droite. Lorsque la densité du plasma diminue, la longueur de la cavité augmente, ce qui permet l'injection d'électrons et le gain d'énergie. La rampe de densité forte est nécessaire pour localiser l'injection et réduire la propagation de l'énergie.

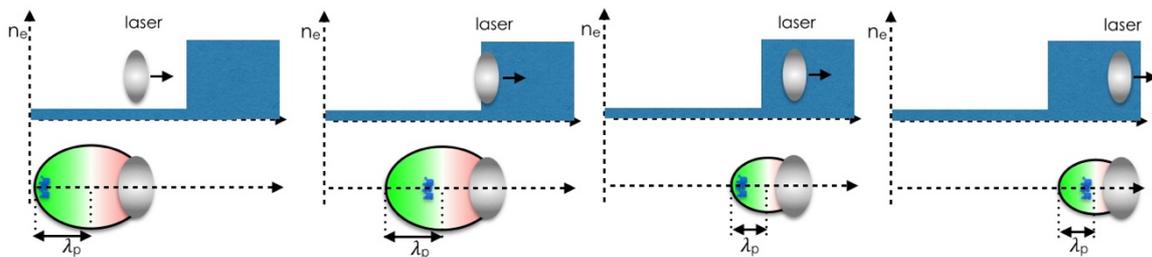


Figure 3 : Schéma de principe du booster plasma. Les électrons sont accélérés dans la première partie de la cible où la densité est la plus faible jusqu'à atteindre la longueur de déphasage. A cette position la densité augmente fortement et les électrons sont à nouveau accélérés.

RÉFÉRENCES

- [1] Tajima T. And Dawson J., Phys. Rev. Lett. 43 (1979) 267
- [2] V. Malka *et al.*, Science 22 (2002) 298
- [3] A. Pukhov and J. Meyer-Ter-Vehn, Appl. Phys. B 74 (2002) 355
- [4] C. G. R. Geddes, Cs. Toth, J. Van Tilborg, E. Esarey, C. B. Schroeder, D. Bruhwiler, C. Nieter, J. Cary and W. P. Leemans, Nature 431 (2004) 538
- [5] J. Faure, Y. Glinec, A. Pukhov, S. Kiselev, S. Gordienko, E. Lefebvre, J.-P. Rousseau, F. Burgy and V. Malka, Nature 431 (2004) 541
- [6] S. P. D. Mangles *et al.*, Nature 431 (2004) 535
- [7] J. Faure, C. Rechatin, A. Norlin, A. Lifschitz, Y. Glinec and V. Malka, Nature 444 (2006) 737
- [8] V. Malka, EuroPhysics Letters, 115 (2016) 54001
- [9] C. Thauray, E. Guillaume, A. Lifschitz, K. Ta Phuoc, M. Hansson, G. Grittani, J. Gautier, J.-P. Goddet, A. Tafzi, O. Lundh and Malka V., Scientific Reports, 5:16310 (2015) Doi: 10.1038/Srep16310
- [10] E. Guillaume, A. Döpp, C. Thauray, K. Ta Phuoc, A. Lifschitz, G. Grittani, J.-P. Goddet, A. Tafzi, A. Chou, S. W. Veisz and Malka V., Phys. Rev. Lett. 115, 155002 (2015)

LES NANOPARTICULES ORGANIQUES FLUORESCENTES : UN NOUVEL OUTIL D'IMAGERIE BIOMEDICALE

Suzanne Fery-Forgues

¹ Laboratoire SPCMIB, CNRS UMR 5068, Université de Toulouse III Paul Sabatier, 118 route de Narbonne, Toulouse, 31062, France

sff@chimie.ups-tlse.fr

RÉSUMÉ

Les nanoparticules organiques fluorescentes permettent de combiner diverses propriétés (brillance, biocompatibilité, sélectivité pour une cible biologique) sur la même plateforme de taille nanométrique. Quelques applications en imagerie optique du vivant sont l'angiographie, la détection de tumeurs et l'aide au geste chirurgical.

MOTS-CLEFS : *Nanoparticule ; fluorescence ; imagerie ; diagnostic*

1. INTRODUCTION

L'imagerie par fluorescence est une technique sensible qui permet de visualiser des structures anatomiques ou pathologiques et de suivre en temps réel divers processus physiologiques. Cependant, son utilisation *in vivo* est limitée, entre autres, par la faible fluorescence des biomolécules natives et par le fait que les sondes fluorescentes moléculaires adaptées demandent un gros effort de synthèse et sont souvent interceptées dans l'organisme avant d'atteindre leur cible biologique. Ces difficultés peuvent être contournées grâce à l'utilisation de nanoparticules organiques fluorescentes (FON) qui, grâce à leurs propriétés structurales et fonctionnelles uniques, apparaissent comme de nouveaux agents de contraste extrêmement intéressants pour l'imagerie médicale non invasive *in vivo* et le diagnostic.

2. NATURE DES NANOPARTICULES ORGANIQUES FLUORESCENTES

Au début des années 2000, les FON ont fait leur entrée dans la grande famille des nanoparticules (NP), qui comprenait déjà celles à base de semi-conducteurs, d'or et de carbone. La taille des FON est comprise entre 30 et 100 nm, parfois davantage, et influence peu leurs propriétés physiques car on ne rencontre pas dans le domaine organique les effets quantiques caractéristiques des NP inorganiques. En revanche, ces propriétés peuvent être largement modifiées à travers les changements chimiques apportés aux molécules par voie de synthèse. La moindre toxicité des FON est aussi un avantage par rapport à leurs analogues inorganiques.

3. LA CONCEPTION DES FON : UN JEU DE LEGO MOLECULAIRE

Les FON sont constituées d'au moins deux parties, le cœur et la surface, qui jouent un rôle différent et peuvent être modifiées indépendamment jusqu'à ce que les propriétés souhaitées soient atteintes. Leur préparation met à profit l'affinité des molécules les unes pour les autres et cet auto-assemblage a souvent lieu spontanément en solution aqueuse. Le cœur contient en général un colorant organique fluorescent, utilisé soit à faible concentration après dispersion dans une matrice (par ex. un polymère), soit à des concentrations élevées, voire pur [1]. Dans ces derniers cas, la quantité importante de molécules fluorescentes confère aux FON une très grande brillance par rapport à celle des colorants dissous. Le confinement des molécules explique aussi la meilleure stabilité chimique et photochimique. Cependant, la mise au point des colorants organiques est délicate, car ces molécules aromatiques planes s'empilent naturellement les unes sur les autres à l'état solide, générant ainsi des interactions défavorables à la fluorescence. En plus de présenter la

couleur et l'intensité d'émission requises, les colorants doivent être conçus avec une géométrie dans l'espace telle que tout empilement devient impossible.

Si le cœur des FON assure les propriétés optiques, leur surface permet de faire varier la solubilité, la stabilité, et les propriétés biologiques [2]. Ainsi, des dérivés de sucres (polysaccharides) ou de polyéthylène glycol (PEGs) donnent aux FON une bonne affinité pour l'eau et masquent ces particules par rapport au système immunitaire. Des motifs de reconnaissance peuvent aussi être accrochés chimiquement à la surface des FON de manière à augmenter leur affinité pour une cible biologique. Il s'agit par exemple de biomolécules qui viendront se fixer dans les récepteurs surexprimés à la surface des cellules cancéreuses.

4. UTILISATION EN IMAGERIE OPTIQUE *IN VIVO*

Parce qu'elles circulent plus longtemps dans l'organisme que des molécules dissoutes, les FON peuvent être utilisées en angiographie pour visualiser les petits capillaires sanguins. Elles sont aussi plus à même d'atteindre les tissus ciblés et de s'y fixer. Une application est la détection des tumeurs cancéreuses. Ainsi, des cancers précoces de l'œsophage ont pu être détectés chez le petit animal en utilisant un micro-endoscope confocal et des FON comme agent d'imagerie (Fig. 1) [3].



Fig. 1. a) Structure des FON utilisées. b) Micro-endoscopie confocale sur un rat porteur d'un modèle de tumeur. c) Image d'un cancer de l'œsophage 2h après injection i.v. des FON. Excitation 488 nm. Les tissus sains ne sont pas fluorescents. La malignité des cellules marquées est attestée par l'analyse histologique [3].

5. VERS LA MULTIMODALITÉ

Les FON étant constituées d'un assemblage de briques moléculaires, le modèle peut être complexifié avec un effort de synthèse relativement réduit par rapport à celui que demandent les molécules multifonctionnelles. En ce qui concerne le diagnostic, la tendance actuelle est à la détection bi- ou multimodale utilisant diverses techniques d'imagerie. Pour cela, on associe aux FON des molécules qui permettent l'absorption dans l'infra-rouge, divers composants métalliques (gadolinium, oxyde de fer) pour augmenter le contraste par IRM, ou même des radionucléides pour la scintigraphie. On peut aussi incorporer des molécules biologiquement actives, et combiner ainsi le diagnostic et la thérapeutique dans des systèmes dits « théranostiques ».

CONCLUSION

Le développement des FON est encore récent, même si les principes de base sont maintenant connus. Dans un futur proche, la versatilité des FON devrait permettre d'en faire des outils d'imagerie optique très performants pour des applications précises.

RÉFÉRENCES

- [1] S. Fery-Forgues, "Fluorescent organic nanocrystals and non-doped particles for biological applications", *Nanoscale*, 5(18), 8428-8442, 2013.
- [2] B. A. Kairdolf, X. Qian, and S. Nie, "Bioconjugated nanoparticles for biosensing, in vivo imaging, and medical diagnostics", *Anal. Chem.* 89, 1015-1031, 2017.
- [3] E. Dassie, D. Arcidiacono, I. Wasiak, N. Damiano, L. Dall'Olmo, C. Giacometti, S. Facchin, M. Cassaro, E. Guido, F. De Lazzari, O. Marin, T. Ciach, S. Fery-Forgues, A. Alberti, G. Battaglia, and S. Realdon, "Detection of fluorescent organic nanoparticles by confocal laser endomicroscopy in a rat model of Barrett's esophagus adenocarcinoma", *Int. J. Nanomed.* 10, 6811-6823, 2015.

LES MICROCAVITÉS FIBRÉES ET LEURS APPLICATIONS AUX TECHNOLOGIES QUANTIQUES

Jakob Reichel¹

¹ *Laboratoire Kastler Brossel, ENS–Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, Collège de France, 24 rue Lhomond, 75005 Paris, France*

jakob.reichel@ens.fr

RÉSUMÉ

The Fiber Fabry-Perot (FFP) cavity with laser-machined mirrors is a new type of optical microcavity which combines a rugged, miniaturized and inherently fiber-coupled design with exceptional optical properties. Finesse values exceeding 10^5 are routinely achieved. Furthermore, FFP cavities combine small waist and mode volume with open access to the cavity mode, making them ideally suited as a light-matter interface for atomic and solid-state quantum emitters. As a consequence, they have a large impact in the fields of quantum technologies and cavity electrodynamics, and are now being used in applications as diverse as single-photon sources, entanglement-enhanced metrology, and isotopic gas analysis. I will give an introduction to FFP cavity technology and a brief review of some of its applications.

MOTS-CLEFS : *microcavités, technologies quantiques, atomes froids, optique fibrée*

Optical microcavities play an important role in classical and quantum optical technologies. They ensure small spot size in the read/write laser beams of CD and DVD players and can be used as tunable channel filters in telecom equipment. In quantum optics, they enable strong light-matter coupling by reducing the cross-section of the optical mode to a size that can approach the scattering cross-section of the quantum emitter. In recent years, quantum technologies have become a driving force for the development

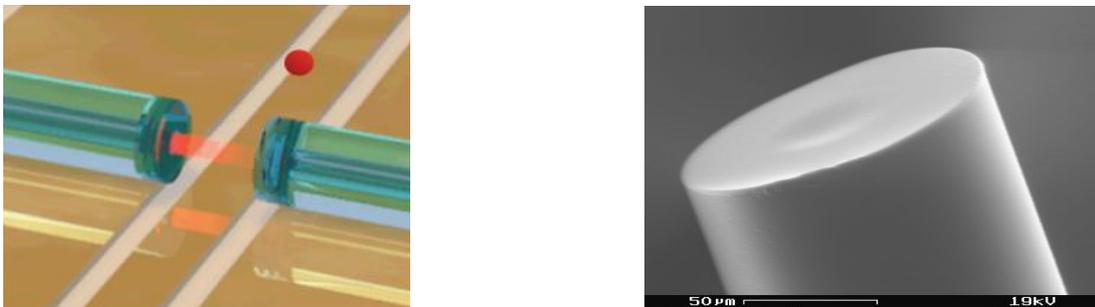


FIGURE 1 : Left : Artist's view of a two-fiber FFP cavity. Right : SEM micrograph of a CO₂ laser-machined mirror surface on a 125 μm diameter fiber.

of novel optical microcavities [1–5]. Indeed, high-fidelity control over light-matter coupling at the single-quantum level plays a prominent role in all quantum technologies. A light-matter quantum interface is the key to quantum memories — devices that can store the quantum state of an incoming photonic qubit over long times. Furthermore, the cavity mode can be used to engineer multiparticle entanglement in an ensemble of N atomic or solid-state qubits which couple to that mode. These are reasons why cavity quantum electrodynamics (CQED) [6] has gained a vast practical importance. Cavities for these applications should have lowest loss, strong atom-photon coupling, and efficient fiber coupling. My group has developed the Fiber Fabry-Perot (FFP) cavity with laser-machined mirrors [3, 7, 8], which combines these properties in a robust, miniature device. It has a large impact in experimental quantum information science, now being used by more than a dozen research groups with many different quantum emitters, from neutral atoms [3, 9], molecules [10] and trapped ions [11, 12] to quantum dots [13, 14] and wells [15],

carbon nanotubes [16, 17], and diamond NV centers [18], as well as in quantum optomechanics [19] and isotopic gas analysis [20]. It is also being used in an intriguing novel imaging method, scanning cavity microscopy [21].

RÉFÉRENCES

- [1] K. J. Vahala, “Optical microcavities,” *Nature*, vol. 424, pp. 839–845, 2003.
- [2] T. Aoki, B. Dayan, E. Wilcut, W. P. Bowen, A. S. Parkins, H. J. Kimble, T. J. Kippenberg, and K. J. Vahala, “Observation of strong coupling between one atom and a monolithic microresonator,” *Nature*, vol. 443, pp. 671–674, 2006.
- [3] Y. Colombe, T. Steinmetz, G. Dubois, F. Linke, D. Hunger, and J. Reichel, “Strong atom-field coupling for Bose-Einstein condensates in an optical cavity on a chip,” *Nature*, vol. 450, pp. 272–276, 2007.
- [4] M. Poellinger, D. O’Shea, F. Warken, and A. Rauschenbeutel, “Ultrahigh- q tunable whispering-gallery-mode microresonator,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 103, p. 053901, 2009.
- [5] J. D. Thompson *et al.*, “Coupling a single trapped atom to a nanoscale optical cavity,” *Science*, vol. 340, p. 1202, 2013.
- [6] S. Haroche and J.-M. Raimond, *Exploring the Quantum*. Oxford : Oxford University Press, 2006.
- [7] D. Hunger, T. Steinmetz, Y. Colombe, C. Deutsch, T. W. Hänsch, and J. Reichel, “A fiber Fabry-Perot cavity with high finesse,” *New J. Phys.*, vol. 12, p. 065038, 2010.
- [8] D. Hunger, C. Deutsch, R. J. Barbour, R. J. Warburton, and J. Reichel, “Laser micro-fabrication of concave, low-roughness features in silica,” *AIP Adv.*, vol. 2, p. 012119, 2012.
- [9] G. Barontini, L. Hohmann, F. Haas, J. Estève, and J. Reichel, “Deterministic generation of multiparticle entanglement by quantum zeno dynamics,” *Science*, vol. 349, p. 1317, 2015.
- [10] C. Toninelli, Y. Delley, T. Stöferle, A. Renn, S. Götzinger, and V. Sandoghdar, “A scanning microcavity for in-situ control of single-molecule emission,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 97, p. 021107, 2010.
- [11] M. Steiner, H. M. Meyer, C. Deutsch, J. Reichel, and M. Köhl, “Single ion coupled to an optical fiber cavity,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 110, p. 043003, 2013.
- [12] B. Brandstätter, A. McClung, K. Schuppert, B. Casabone, K. Friebe, A. Stute, P. O. Schmidt, C. Deutsch, J. Reichel, R. Blatt, and T. E. Northup, “Integrated fiber-mirror ion trap for strong ion-cavity coupling,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 84, no. 12, p. 123104, 2013.
- [13] E. B. Flagg, A. Muller, S. V. Polyakov, A. Ling, A. Migdall, and G. S. Solomon, “Interference of single photons from two separate semiconductor quantum dots,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 104, p. 137401, 2010.
- [14] M. Miguel-Sánchez, A. Reinhard, E. Togan, T. Volz, A. Imamoğlu, B. Besga, J. Reichel, and J. Estève, “Cavity quantum electrodynamics with charge-controlled quantum dots coupled to a fiber Fabry-Perot cavity,” *New J. Phys.*, vol. 15, p. 045002, 2013.
- [15] B. Besga, C. Vaneph, J. Reichel, J. Estève, A. Reinhard, J. Miguel-Sánchez, A. Imamoğlu, and T. Volz, “Polariton boxes in a tunable fiber cavity,” *Phys. Rev. Applied*, vol. 3, p. 014008, 2015.
- [16] S. Stapfner, L. Ost, D. Hunger, J. Reichel, I. Favero, and E. M. Weig, “Cavity-enhanced optical detection of carbon nanotube brownian motion,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 102, p. 151910, 2013.
- [17] A. Jeantet, Y. Chassagneux, C. Raynaud, P. Roussignol, J. S. Lauret, B. Besga, J. Estève, J. Reichel, and C. Voisin, “Widely tunable single-photon source from a carbon nanotube in the purcell regime,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 116, p. 247402, 2016.
- [18] R. Albrecht, A. Bommer, C. Pauly, F. Mücklich, A. W. Schell, P. Engel, T. Schröder, O. Benson, J. Reichel, and C. Becher, “Narrow-band single photon emission based on a single NV center coupled to an all-fiber-cavity,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 105, p. 073113, 2014.
- [19] A. D. Kashkanova, A. B. Shkarin, C. D. Brown, N. E. Flowers-Jacobs, L. Childress, S. W. Hoch, L. Hohmann, K. Ott, J. Reichel, and J. G. E. Harris, “Superfluid brillouin optomechanics,” *Nature Phys.*, vol. 13, no. 1, pp. 74–79, 2017, 1745-2473.
- [20] B. Petrak, N. Djeu, and A. Muller, “Purcell-enhanced Raman scattering from atmospheric gases in a high-finesse microcavity,” *Phys. Rev. A*, vol. 89, p. 023811, 2014.
- [21] M. Mader, J. Reichel, T. W. Hänsch, and D. Hunger, “A scanning cavity microscope,” *Nature Comm.*, vol. 6, p. 7249, 2015.

La microscopie optique computationnelle

A. Sentenac, P. Chaumet, K. Belkebir, A. Soriano, H. Giovannini, G. Maire

Institut Fresnel, Faculté de St Jérôme, Marseille France

anne.sentenac@fresnel.fr

Depuis son apparition, il y a plus de deux siècles, le microscope optique s'est décliné sous de nombreuses configurations[1], (microscope en transmission sensible à l'absorption, microscope de phase ou en champ sombre pour spécimens transparents, microscope de polarisation pour les matériaux anisotropes ...) et les images d'un même échantillon, selon l'instrument choisi, peuvent s'avérer fort différentes. Ainsi, partant d'un phénomène physique identique, la diffraction de la lumière par un objet, les informations obtenues en changeant les conditions d'illumination et de détection varient.

La plupart des efforts pour améliorer les microscopes ont porté sur le développement instrumental, fabrication d'objectifs plus performants et combinaisons illumination-détection différentes. Cependant, plus récemment, les progrès des capteurs numériques (caméras), des outils de contrôle de la lumière (modulateur spatial de lumière) et des moyens de calculs, ont ouvert la voie aux développements numériques.

La microscopie computationnelle consiste à considérer le microscope comme un système regroupant une instrumentation et des algorithmes de reconstruction. L'échantillon est éclairé sous différentes illuminations et les données enregistrées (qui ne sont pas toujours directement interprétables par l'opérateur) sont combinées numériquement pour former l'image de l'objet. Ce traitement numérique, reposant sur une modélisation physique du lien entre les données et l'échantillon, permet d'extraire de manière optimale l'information contenue dans le champ diffracté et de tirer profit de connaissances *a priori* sur l'objet.

Nous verrons dans cet exposé comment l'approche computationnelle peut être une solution intéressante pour augmenter les performances de la microscopie optique [2-6].

MOTS-CLEFS : *microscopie optique, résolution, reconstruction*

[1] A. Sentenac et J. Mertz 'Unified description of 3D diffraction microscopy, from transmission microscopy to optical coherence tomography: Tutorial', J. Opt. Soc. Am. A, **35**, 748 (2018)

[2] V. Lauer 'New approach to optical diffraction tomography yielding a vector equation of diffraction tomography and a novel tomographic microscope' J. Microsc., **205**, 165 (2002).

[3] G. Maire et al, 'Experimental demonstration of quantitative imaging beyond Abbe's limit with optical diffraction tomography', Phys. Rev. Lett. **102**, 213905 (2009)

[4] L. Tian and L. Waller, '3d intensity and phase imaging from light field measurements in an led array microscope,' Optica, **2**, 104 (2015).

[5] Ting Zhang et al 'Far-field diffraction microscopy at $\lambda/10$ resolution', Optica, **3**, 609, (2016)

[6] A. Badon et al 'Smart optical coherence tomography for ultra-deep imaging through highly scattering media', **2**,11 (2016)