

# TUTORIELS

## **L'interaction laser-matière du solide au plasma**

L. Videau<sup>1,2</sup>, M. Scius-Bertrand<sup>1</sup>, L. Berthe<sup>3</sup>

*1. CEA, DAM, DIF, F-91297 Arpajon, France*

*2. Univ. Paris Saclay, LMCE, F-91680 Bruyeres le Chatel, France*

*3. ENSAM, CNAM, CNRS, Lab. PIMM*

*laurent.videau@cea.fr*

Les travaux présentés concerneront l'étude de l'interaction laser-matière du solide au plasma, avec en particulier un focus important sur le comportement de matériaux soumis à un choc laser. Nous aborderons dans un premier temps la modélisation de l'absorption laser en comparant différentes méthodes numériques vis à vis de cas analytiques représentatifs de l'interaction d'un laser avec la matière. Nous présenterons également comment il est possible de construire les indices optiques du solide au plasma à travers des calculs de conductivités électriques. Nous discuterons ensuite des effets bidimensionnels qu'il faut prendre en compte pour restituer complètement la pression d'ablation induite par l'interaction laser-matière.

Cette étude de caractérisation de l'interaction laser-matière sera illustrée en comparant des résultats expérimentaux obtenus sur plusieurs campagnes expérimentales récentes avec des simulations numériques issues du code hydrodynamique ESTHER. Nous présenterons enfin quelques applications du choc laser, comme le développement d'une technique de test d'adhérence par choc laser ou encore la caractérisation de l'ablation laser pour différents matériaux dans le cadre d'applications spatiales.

*FORUM ILP 2021*

**Planetology, Equations Of State and phases transitions in the context of laser created High Energy Density Science**

A. Ravasio

*Laboratoire LULI, CNRS, École Polytechnique, Palaiseau, France  
alessandra.ravasio@polytechnique.fr*

Mainly motivated by the inertial confinement fusion (ICF) program, the development of pulsed-power facilities, such as high-power lasers and “Z-pinch machines”, opened extraordinary opportunities to create in laboratory matter under extreme high energy density conditions. This gave rise to a new branch of science, often called High Energy Density Science (HEDS), where a wide variety of high energy density (HED) states of matter, spanning over many orders of magnitude in density and temperature, can be produced and characterised in the laboratory. Experiments can thus explore a great variety within this wide parameter range, including matter well above solid density at temperatures of few thousand on kelvin, typical of planetary interiors.

In this talk, we will introduce this class of experiments in the context of laser-created HED. We will present how they can bring direct insights on matter properties, such as Equation of State and optical properties, at these extreme conditions, challenging even for the most advances theoretical descriptions. We will also discuss the new ability to unveil phase transitions at high pressures and temperatures, offered by the coupling of high-power lasers and X-ray free electron lasers. We will finally discuss how these new experimental data can be relevant for planetary science.

**Préférence:** poster /oral (sous réserve de l'acceptation d'une présentation orale par le comité)

**Statut de l'auteur inscrit au Forum:** chercheur

(pour les étudiant, merci d'indiquez le nom de votre Ecole Doctorale ou de votre formation)

Envoyez ce fichier rempli à : paul-edouard.masson-laborde@cea.fr

## FORUM ILP 2021

### Produire des radio-isotopes avec l'accélération laser-plasma

M.Tarisien, E.Atukpor, J.Domange et F.Hannachi,  
CENBG, Université de Bordeaux/CNRS-IN2P3, Gradignan  
tarisien@cenbg.in2p3.fr

Dès qu'il a été possible d'accélérer des particules (ions, électrons et photons de Bremsstrahlung associés) grâce à l'accélération laser-plasma (ALP), s'est posée la question d'utiliser ces projectiles pour former des radio-isotopes afin de diagnostiquer les faisceaux produits par ALP [1], de mener des études de physique nucléaire inédites [2-3] ou pour des applications médicales [4].

La formation de radio-isotopes est une application de l'ALP qui semble envisageable à moyen terme car elle nécessite des particules de relativement faibles énergies ( $< 100\text{MeV}$ ) dont les distributions n'ont pas besoin d'être très étroites. Par ailleurs la grande intensité des paquets de particules délivrés par l'ALP permet de créer instantanément de grandes quantités de radio-isotopes qui peuvent avoir des demi-vies courtes allant de quelques dizaines de ns à plusieurs minutes et qui pourront être utilisées dans les domaines cités précédemment.

Au cours de mon exposé je donnerai quelques éléments de physique nucléaire relatifs à la formation de radioisotopes après quoi je discuterai la possibilité d'utiliser les faisceaux de particules issus de l'ALP pour quelques applications.

#### References:

- [1] M. Tarisien et al, Rev.Sci.Instr. 82, 023302 (2011)
- [2] D.Denis-Petit et al., Ch.21, Applications of Laser-Driven Particle Acceleration, Eds. Parodi, Bolton, Schreiber, CRC press, ISBN 9781498766418 (5th june 2018)
- [3] F. Negoita et al., Romanian Reports in Physics, Vol. 68, Supplement, P. S37–S144, 2016
- [4] K.W.D. Ledingham and W. Galster, New Journal of Physics **12**, 045005 (2010)

**Préférence:** oral (sous réserve de l'acceptation d'une présentation orale par le comité)

**Statut de l'auteur inscrit au Forum:** chercheur / ~~post-doc~~ / étudiant

(pour les étudiant, merci d'indiquez le nom de votre Ecole Doctorale ou de votre formation)

Envoyez ce fichier rempli à : paul-edouard.masson-laborde@cea.fr

## Des environnements hydro-radiatifs astrophysiques aux plasmas laser

É. FALIZE,  
CEA-DAM-DIF F-91297, Arpajon, France  
*emeric.falize@cea.fr*

De nombreux environnements astrophysiques (intérieurs stellaires, disques et colonnes d'accrétion, sursauts X, jets supersoniques, restes de supernovæ) présentent des conditions physiques extrêmes où le rayonnement joue un rôle important dans leur dynamique et leur structure [1]. Même si les nouvelles générations de télescopes multi-longueurs permettent d'acquérir un nombre croissant de données observationnelles, celles-ci ne sont pas suffisamment contraignantes pour comprendre les mécanismes physiques sous-jacents à la production de rayonnement. L'émergence des nouvelles installations de puissance pulsées (lasers de puissance [2], Z-pinches [3]) a permis de produire des écoulements hydro-radiatifs et d'obtenir des données expérimentales inédites. Grâce à ces installations, l'hydrodynamique radiative est devenue une véritable science expérimentale. Les nombreux travaux réalisés ces dernières décennies permettent de produire et d'étudier communément tout un ensemble de structures hydro-radiatives : chocs radiatifs [4], ondes radiatives supersoniques [5], chocs d'accrétion [6].

Dans cet exposé nous passerons en revue les différents environnements hydro-radiatifs astrophysiques explorées à l'aide des lasers de puissance. Nous discuterons en détail les théories de changement d'échelle qui permet d'assurer la pertinence des expériences de laboratoire. Enfin, nous discuterons des nouvelles opportunités qu'offrent les installations de *type Mégajoule*.

### References:

- [1] D. Mihalas, ASP Conf. Proc., 288, 459 (2003)
- [2] B. Remington, R. P. Drake & D. Ryutov Rev. Modern. Phys. 78, 755 (2006)
- [3] S. Lebedev & A. Frank & D. Ryutov Rev. Mod. Phys. 91, 025002 (2019)
- [4] Th. Michel et al., Astrophys. J., 888, 25 (2020)
- [5] A. Moore et al., J. Quant. Spectro. Rad. Transfer, 159, 19 (2015)
- [6] P. Mabey et al., Scientific Reports, 9, 8157 (2019)

**Préférence:** oral invité

**Statut de l'auteur inscrit au Forum:** chercheur

# Matériaux spatiaux, évolutions et contraintes

Ch. DURIN, Centre National d'Etudes Spatiales, CNES, 18 av E. BELIN 31401 Toulouse cedex 9

## Abstract

L'objet de cette présentation est de décrire les évolutions technologiques au niveau des matériaux mises en œuvre dans les projets spatiaux. Ces changements sont liés à différentes causes notamment économiques, techniques, règlementaires et aussi à l'évolution de certains paramètres de l'environnement spatial.

Les solutions apportées à ces évolutions sont diverses et la présentation décrira les solutions de type : choix des matériaux et procédés, qualification par essais sol et modèles, évolutions des modèles d'environnement, retour d'expérience de capteurs embarqués et solutions systèmes. L'apparition de nouveaux matériaux et de nouvelles technologies sera décrite au travers de résultats d'études de recherche menées au CNES et/ou en collaboration avec nos partenaires industriels

Il n'existe pas de solution parfaite à ce problème. Il faut avoir une approche multi solutions qui vont permettre de trouver le meilleur compromis, qui respecte ces nouvelles entrées tout en ne pénalisant pas les missions spatiales.

## ATTOLab-Orme : une plateforme pour la dynamique attoseconde

P. SALIERES

*Université Paris-Saclay, CEA, CNRS, LIDYL, 91191 Gif-sur-Yvette, France  
pascal.salieres@cea.fr*

La génération d'impulsions sub-femtosecondes, dites attosecondes ( $1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$ ), a été démontrée pour la première fois en 2001 [1,2]. La forte interaction nonlinéaire entre un laser infrarouge intense et un jet de gaz rare (et plus récemment, un plasma) génère les harmoniques d'ordre élevé du laser fondamental et produit ainsi un rayonnement cohérent large bande dans l'extrême ultraviolet (XUV), correspondant à des impulsions de durée  $\sim 100$  as. Ces flashes de lumière, les plus brefs jamais réalisés, ouvrent de nouvelles perspectives pour l'exploration de la matière à une échelle de temps jusqu'ici inaccessible. C'est un nouveau domaine d'études, déjà baptisé science attoseconde, qui se propose d'étudier, voire de contrôler, les dynamiques électroniques au cœur de la matière.

La plateforme ATTOLab-Orme, dédiée à l'étude des dynamiques attosecondes en phases diluée et condensée, a été initiée par un programme Equipement d'Excellence associant plusieurs laboratoires du plateau de Saclay. Située au CEA-Orme des Merisiers, elle comprend un double laser Titane :Saphir produisant des impulsions parfaitement contrôlées (CEP-stabilisées) de 15 mJ à 1 kHz et 2 mJ à 10 kHz, qui 'pompe' des sources secondaires d'impulsions XUV atto/femtoseconde produites par génération d'harmoniques dans les gaz. Une série de stations expérimentales pour les phases diluée et condensée ont été développées, testées et commissionnées par le LIDYL et ses partenaires. La combinaison des sources attosecondes avancées et des stations expérimentales optimisées font la particularité d'ATTOLAB-Orme.

Lors de ce tutoriel, nous présenterons la plateforme ATTOLab-Orme et ferons le point sur l'état d'avancement des recherches sur les impulsions attosecondes et sur leurs applications. En particulier, nous verrons comment ces impulsions permettent de 'filmer' le processus de photoémission en temps réel, c'est-à-dire d'accéder à la dynamique attoseconde d'ionisation d'atomes et de molécules qu'il est maintenant possible de résoudre angulairement [3,4].

### Références:

- [1] Paul et al., *Science*, **292**, 1698 (2001)
- [2] Hentschel et al., *Nature*, **414**, 509 (2001)
- [3] Gruson et al., *Science*, **354**, 734 (2016)
- [4] Autuori et al., arXiv:2107.13990v1 (2021)

## **New scientific opportunities for studies of matter at extreme conditions at the European XFEL**

Sakura Pascarelli

*European XFEL, Holzkoppel 4, 22869, Schenefeld, Germany*

[sakura.pascarelli@xfel.eu](mailto:sakura.pascarelli@xfel.eu)

In the past decade we have seen very important developments in the field of accelerator based X-ray user facilities, with the advent of 4<sup>th</sup> generation synchrotron sources and MHz rate free electron lasers. The first hard X-ray free-electron laser, LCLS (US) became operational in 2009 and over the last decade four additional hard X-ray FELs have begun user operation. Among these, the Eu-XFEL is the first high photon energy FEL powered by a superconducting accelerator, leading to an increase of more than 2 orders of magnitude in the number of delivered photon pulses per second to the sample. A unique feature of X-ray FELs is the combination of the extremely short (fs) photon pulses with the short (Å) wavelengths of hard x-rays produced. These relatively new user facilities are opening novel avenues in the investigation of fundamental processes in many areas of science, from physics to chemistry, biology and materials science, because they allow investigation of matter at the time scales of electron and nuclear dynamics (down to fs), with chemical selectivity and bulk sensitivity.

After many years of construction, user operation at the Eu-XFEL ramped up gradually, and between 2017 and 2019 six instruments were delivered to the user community and are now operational. In the first part of my presentation I will briefly introduce the present performance of the facility in terms of electron and photon beam characteristics and provide an overview of recent science highlights. In the second part, I will focus on the High Energy Density (HED) instrument, a unique platform for experiments combining hard X-ray free-electron laser radiation with the capability to generate matter under extreme conditions of pressure, temperature, or electromagnetic fields. HED started user operation in May 2019 and will augment its capabilities within the next years. Scientific goals include investigation of transient extreme states of matter that can be created by intense laser pulses, diamond anvil cells, or pulsed magnets. Studies cover a wide range of HED science, including planetary and stellar interiors, impact scenarios, and intense laser-matter interactions in both fundamental research and industrial applications. I will briefly describe the status of this instrument and report first scientific results.

**3-D modeling of the laser plasma interaction at fluid scales coupled to plasma hydrodynamics, application to direct-drive ICF**

A. Colaïtis<sup>1</sup>, I. Igumenshchev<sup>2</sup>, J. Mathiaud<sup>1</sup>, V. Goncharov<sup>2</sup>

1) Centre Lasers Intenses et Applications, UMR 5107, 351 Cours de la libération, 33400 Talence, France

2) Laboratory for Laser Energetics, 250 East River Rd, Rochester, NY 14623-1212

The three major approaches to Inertial Fusion (laser direct-drive, laser x-ray indirect-drive and magnetic drive using pulsed power) rely to some extent on laser beams and face challenges related to Laser Plasma Instabilities. These non-linear processes, occurring at microscopic scales, are notoriously difficult to model at the large scale of target hydrodynamics, partly owing to the difficulty to model efficiently laser propagation. Here we present a new approach to modeling laser propagation in plasmas at the fluid scales and in 3-D. This approach is based on Inverse Ray Tracing (IRT). We present comparisons of IRT with the standard forward methods used in standard codes, in the framework of Cross-Beam Energy Transfer (CBET) calculations. This approach, implemented in the IFRIIT code, is coupled to the 3-D radiative hydrodynamics code ASTER from LLE. Applications to 3-D calculations of direct-drive ICF implosions are presented. Notably, we illustrate the role of CBET on implosion performances, in presence or not of target misalignment or beam imbalance. Finally, preliminary results of 3-D stalk modeling for direct-drive targets are presented.

This work was granted access to the HPC resources of TGCC under the allocation 2020-A0070506129 and 2021-A0090506129 made by GENCI. The software used in this work was developed in part at the University of Rochester's Laboratory for Laser Energetics.

# *FORUM ILP 2021*

## **Apport de la simulation numérique dans l'optimisation d'une configuration d'Accélérateur Laser-Plasma d'Electrons Relativistes.**

Gilles MAYNARD

Laboratoire de Physique des Gaz et des Plasmas, CNRS, Université Paris-Saclay, F-91405 Orsay  
Cedex, France

Les travaux sur l'Accélération Laser Plasma d'Electrons Relativistes (ALPER) réalisés lors de ces deux dernières décennies, tant au niveau expérimental que théorique ou en simulation numérique, ont permis d'entrer dans une nouvelle phase active de conception et de développement d'installions basées sur l'ALPER et dédiées à des applications scientifiques et sociétales. A titre d'exemple, on peut citer au niveau européen le projet Eupraxia ([www.eupraxia-project.eu](http://www.eupraxia-project.eu)) et au niveau national la feuille de route en cours d'écriture au sein du GdR Appel ([gdr-appel.fr](http://gdr-appel.fr)). Cette évolution doit pouvoir s'appuyer sur des améliorations de certaines performances des installations laser indispensables pour les applications comme la stabilité, la fiabilité, le rendement énergétique ou encore le taux de répétition. Il reste cependant encore de nombreux problèmes ouverts liés à la physique de l'interaction laser plasma dans le domaine relativiste-sous-dense pertinent pour l'ALPER et qui doivent être traités pour optimiser les schémas d'interaction en fonction des applications visées.

Mon exposé sera centré sur les résultats obtenus par simulation numérique qui, dans le cas de la recherche sur l'ALPER, a un rôle majeur. Après avoir brièvement rappelé les principes de l'ALPER et des résultats expérimentaux récents, je présenterais quelques conclusions que l'on peut déduire du travail théorique qui a été mené dans le cadre d'Eupraxia. Je me focaliserais ensuite sur l'optimisation d'un schéma à un étage basé sur l'injection par ionisation en lien avec des expériences menées par l'équipe ITFIP du LPGP, dans le cadre de collaborations, sur différentes installations (UHI100-Saclay, Lund Laser Center et Apollon). L'accent sera plus particulièrement mis sur l'importance d'intégrer, dans les optimisations par simulation numériques, des données expérimentales précises sur le profil spatio-temporel du faisceau laser à l'entrée de la cible et sur le profil en densité de cette cible.

# Ultra-high intensity lasers and quantum-electrodynamic effects

X. Ribeyre

<sup>1</sup> Univ. Bordeaux-CNRS-CEA, Centre Lasers Intenses et Applications, UMR 5107 Talence 33405, France

\* [ribeyre@u-bordeaux.fr](mailto:ribeyre@u-bordeaux.fr)

Thanks to the recent progresses in high-power laser sources, it will be possible to achieved new physical regimes. By increasing the laser intensity to the order of  $10^{17}$ - $10^{18}$  W/cm<sup>2</sup> the relativistic regime of laser matter interaction is entered. This talk addresses physical processes that mainly occurs at laser intensities larger than  $10^{22}$  W/cm<sup>2</sup>, well exceeding the relativistic threshold. At such intensity many physical processus will occurs which are predicted by the quantum-electrodynamics theory [1].

In this presentation photon-photon collision will be treated more deeply. For example, in the linear Breit-Wheeler (BW) process, electron-positron pairs will be produced in the collision of two high energy photons: the  $\gamma+\gamma$  to  $e^+e^-$  is an important physical process in astrophysics: controlling the energy release in Gamma Ray Bursts, in Active Galactic Nuclei, in black holes and other explosive phenomena [2-3]. The non-linear BW process, multi low energy photons colliding with a high energy photon produce, also produces  $e^+$ ,  $e^-$  pairs and is expected to be dominant in laser-plasma interaction fo intensities above  $10^{23}$  W/cm<sup>2</sup>. Finally, we provide details of the experimental setup to observe such processes, estimates from model and numerical simulations of the expected yield of reactions and possible ways of creation of a photon source with requested parameters [4].

[1] Di-Piazza et al. Rev. Mod. Phys, **8** (2012).

[2] Ruffini, R. et al. Physics Reports, **487**, 1-140 (2010).

[3] Ribeyre X. et al., PPCF **60**, 104001 (2018).

[4] Ribeyre X. et al. Phys. Rev. E, **93** 013201 (2016).