Lundi 2 juin

Fundamental plasma physics from astrophysics to the laboratory

Anna GRASSI

LULI, Sorbonne Université, CNRS, École Polytechnique, CEA, 75252 Paris, France anna.grassi@polytechnique.edu

High-energy density laboratory experiments exploiting fast beams of charged particles and high-power lasers provide a unique tool to study complex plasma phenomena directly relevant to astrophysics. Indeed, from astrophysical observations, the local plasma conditions are poorly constrained and the microscopic details of the physics at play cannot be directly resolved, making it challenging to identify the underlying physics behind exotic and distant astrophysical objects.

Laboratory experiments can reproduce plasma conditions similar to the astrophysical ones. Hence, they help test theoretical models as well as validate numerical simulation codes, which operate at finite resolution and under various degrees of approximation. Several phenomena of classical plasma physics have been investigated with laboratory astrophysics experiments, such as turbulence, magnetic reconnection, shocks, and instabilities in the collisionless regime, which govern the energy dissipation in a wide range of astrophysical plasmas, from the solar atmosphere to more remote and extreme environments such as black hole accretion disks.

Laser facilities delivering extreme intensities further open the way to reach relativistic conditions, characterize electron-positron pair generation, and even QED effects at play, for instance, in the magnetospheres of compact objects.

In this tutorial, I will detail the basic concepts and requirements behind the similarity of astrophysical and laboratory plasmas, highlighting the limits given by collisionality or other processes that break the scaling between the two systems. I will provide an overview of the recent experimental efforts with different classes of lasers. I will focus on the study of particle acceleration in kJ ns-laser facilities via shocks and magnetic reconnection relevant to cosmic ray generation, and present some ideas for future studies on ultra-high intensity lasers.

The coupling between laser experiments, theoretical modeling, and numerical simulations is critical in understanding plasma processes and relating them with astrophysics. I will, therefore, describe the most commonly used numerical tools and how they can be used to guide the planning of an experimental campaign and interpret the experimental results.

Simulations and Experiments of Shocks in Weakly Collisional Plasmas

T. Seebaruth^{1,2,3} A. Ciardi¹, A. Grassi², R. Smets³, B. B. Albertazzi², J.-R. Marquès², A. Triantafyllidis², D. Oportus², Y. Toyoda⁴, S. Yakura⁴, H. Kondo⁵, H. Kawakatsu⁵, T. Takezaki⁵, T. Morita⁶, Y. Sato⁷, K. Takahashi⁸, K. Koba⁸, T. Ogawa⁸, R. Shiiba⁸, S. J. Tanaka⁸, S. Isayama⁵, S. Matsukiyo⁷, K. Sakai⁷, K. Tomita⁹, R. Yamazaki¹⁰, T. Sano⁵, Y. Sakawa⁴.

1 Sorbonne Université, Paris Observatory, Paris, France.

2 Sorbonne Université, École Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris,, CNRS, CEA, Paris, France

3 Sorbonne Université, LPP, CNRS, Université Paris-Saclay, École Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris, Paris, France

4 Institute of Laser Engineering, Osaka University, Japan.

5 Department of Physical Sciences, Aoyama Gakuin University, Japan.

6 Faculty of Engineering, University of Toyama, Japan.

7 Faculty of Engineering Sciences, Kyushu University, Japan.

8 Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University, Japan.

9 National Institute for Fusion Science, Japan.

10 Division of Quantum Science and Engineering, Hokkaido University, Japan.

Thershi.seebaruth@obspm.fr

Collisional shocks play a fundamental role in both astrophysical environments and laboratory experiments. The classical fluid structure consists of an ion compression shock embedded within a thermal shock, which is divided into a thermal precursor (ahead of the ion shock) and a relaxation layer (behind the ion shock). This structure serves as a playground for non-thermal effects to emerge [1,2], particularly within the thermal precursor, where non-thermal ions can counter-stream against the bulk flow, modify the shock structure and, under certain conditions, drive instabilities.

Using high-energy-density laser experiments on the LULI2000 and GEKKO XII facilities, we achieved time-resolved measurements of shock profiles with unprecedented detail. Diagnostics, including Thomson scattering, allowed us to probe ion and electron temperatures and densities across the different regions of the shock structure. Complementary state-of-the-art MHD and fully kinetic simulations (PIC) are presented to interpret the experimental data and provide insight into the underlying physical mechanisms. FLASH [3], an extended-MHD code, is used to simulate large-scale plasma dynamics under experimentally relevant conditions, guiding the experiments and analyzing the data. Smilei [4], a fully kinetic particle-in-cell code, is used to investigate the mechanisms responsible for generating non-thermal ions through 1D simulations of shock formation and its evolution toward a steady-state condition.

Préférence: Oral

References

[1] Vidal, F. et al. lon kinetic simulations of the formation and propagation of a planar collisional shock wave in a plasma. *Phys. Fluids B* (1993).

[2] Rinderknecht, H. G. et al. Highly Resolved Measurements of a Developing Strong Collisional Plasma Shock. *Phys. Rev. Lett.* 120 (2018).

[3] Fryxell, B. et al. FLASH: An adaptive mesh hydrodynamics code for modeling astrophysical thermonuclear flashes. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 131 (2000).

[4] Derouillat, J. et al. Smilei: A collaborative, open-source, multi-purpose particle-incell code for plasma simulation. *Comput. Phys. Commun.* 222, 351–373 (2018).

Investigation of the generation of high-Alfvénic-Mach-number shocks and of the associated ion energization using ultra-short laser pulse

<u>W. Yao</u>^{1, 2}, I. Cohen², J. Beard³, G. Bleotu⁴, L. Rovige⁵, V. Valenzuela-Villaseca⁶, X. Jin⁷, Y. Heller², A. Ciardi¹, J. Fuchs²

 ¹ Observatoire de Paris, LUX, Paris, France
 ² CNRS, LULI, Paris, France
 ³ CNRS, LNCMI, Toulouse, France
 ⁴ ELI, NP, Ilfov, Romania
 ⁵ University of California–Los Angeles, Los Angeles, CA 90095, USA
 ⁶ Princeton University, Princeton, New Jersey, USA
 ⁷ Peking University, Beijing, China Weipeng.yao@obspm.fr

The origin of high-energy cosmic particles remains an unresolved challenge in astrophysics, with collisionless shock waves identified as a significant source. These shocks transfer energy to particles through interactions with the ambient medium, playing a crucial role in the acceleration process [1-3]. In our study, we demonstrate the laboratory production of high-Alfvénic-Mach-number magnetized collisionless shocks using short-pulse PetaWatt lasers, i.e., the Apollon laser facility, in combination with strong magnetic fields reaching up to 40 T [4].

To characterize these shocks, we employed multiple diagnostic tools. Optical interferometry and proton radiography were used to analyze the shock structure and measure the Mach number, providing detailed insights into the dynamics of the shock front. Additionally, a Thomson parabola spectrometer was utilized to measure the energization of protons extracted from the ambient gas, achieving proton energies up to 13 MeV. These results showcase the efficient energy transfer from the shock wave to the particles. Ongoing particle-in-cell simulations are being conducted to further investigate and clarify the underlying mechanisms of particle acceleration within these shocks. The simulations aim to provide a deeper understanding of the processes driving the observed energization and the potential transition to other acceleration mechanisms.

Préférence: oral

References

[1] Yao, W., et al. "Laboratory evidence for proton energization by collisionless shock surfing." Nature Physics 17.10 (2021): 1177-1182. <u>https://doi.org/10.1038/s41567-021-01325-w</u>

[2] Yao, W., et al. "Detailed Characterization of a Laboratory Magnetized Supercritical Collisionless Shock and of the Associated Proton Energization." Matter and Radiation at Extremes, vol. 7, no. 1, Dec. 2021, p. 014402, <u>https://doi.org/10.1063/5.0055071</u>

[3] Yao W, et al. "Laboratory investigation of proton energization off shock drifting." 4 weeks of beamtime at the VULCAN laser facility. Aug 14 - Sep 15 (2023), Manuscript in preparation.

[4] Yao, W., Fuchs, J., et al., "Investigation of the generation of high-Alfvénic-Mach-number shocks and of the associated ion energization using ultra-short laser pulse", 5 weeks of beamtime scheduled at the Apollon laser facility (Oct. 19 - Nov. 22) in 2024.

De l'échelle astrophysique au laboratoire : étude de la structure de double chocs dans les éjectas de novæ avec le projet CIRENE.

L. DOLLERSCHELL¹, L. VAN BOX SOM ^{1,2}, B. ALBERTAZZI ³, A. ARAUDO ^{4,5}, C. BUSSCHAERT ¹, A. CASNER ¹, N. CHARPENTIER ¹, R. DEVRIENDT ¹, M. FONTAINE ¹, TH. GOUDAL ¹, M. JULLIEN ¹, Y. MARCHENAY ¹, D. OPORTUS ³, B. PERES ¹, G. RIGON ⁶, Y. SAKAWA ⁷, A. TRIANTAFYLLIDIS ³, E. FALIZE ¹

¹ CEA-DAM-DIF, 91297, Arpajon, France

² Université Paris-Saclay, CEA, LMCE, F-91680 Bruyères-le-Châtel, France

³ LULI-CNRS, Ecole Polytechnique, CEA, Université Paris-Saclay, Palaiseau Cedex, France

⁴ Extreme Light Infrastructure ERIC,ELI Beamlines Facility, Za Radnicí 835, CZ-25241, Dolní Brežany, Czech Republic

⁵ Laboratoire Univers et Particules de Montpellier (LUPM) Université Montpellier, CNRS/IN2P3, CC72, place Eugène Bataillon, 34095, Montpellier Cedex 5, France

⁶ Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, United States of America

⁷ Institute of Laser Engineering, Osaka University, Osaka 565-0871, Japan

lea.dollerschell@gmail.com

Les chocs radiatifs sont fondamentaux dans les phénomènes astrophysiques, en particulier dans les éjectas de novæ [Warner, 1995]. Leur rayonnement est très intense et multi-longueurs d'onde reflétant la complexité de la structure émettrice [Chomiuk et al., 2021]. L'observation d'un rayonnement X durs soutient l'hypothèse de la présence de structures de double chocs (S2C) pouvant être radiatives [Aydi et al., 2020]. Cependant, les observations directes de ces chocs restent difficiles en raison de leur enfouissement profond dans l'éjecta et de l'épaisseur trop petite de la zone radiative pour être détectée par les télescopes [Chomiuk et al., 2021]. C'est dans ce cadre que s'inscrit le projet d'astrophysique de laboratoire CIRENE (Chocs Internes Radiatifs dans les Ejecta de NovaE). Il vise à modéliser la S2C afin de pouvoir la reproduire en laboratoire en utilisant des installations laser de haute énergie dans un environnement contrôlé par de nombreux diagnostics.

Ce travail présente des simulations hydrodynamiques à l'échelle astrophysique effectuées avec le code RAMSES [*Teyssier, 2002*] pour modéliser l'évolution de la S2C en prenant en compte du refroidissement par bremsstrahlung. Elles révèlent d'importants effets de refroidissement derrière le choc transmis, conduisant à de forts gradients de densité et de température. En outre, un cadre analytique est développé à partir de *Metzger et al., 2014* pour comparer les résultats des simulations et prédire les paramètres clés de la S2C. Il permet de reproduire avec succès ces résultats et permet une étude paramétrique détaillée [*Dollerschell et al., 2025*].

A l'aide de lois d'échelle adaptées [*Falize et al., 2011 ; Del Valle et al., 2022*], nous démontrons que la S2C peut être miniaturisée en laboratoire tout en maintenant des conditions similaires aux échelles astrophysiques, garantissant ainsi la pertinence des observations expérimentales [*Dollerschell et al., 2025*]. Nous présentons une cible pour l'installation laser LULI2000 permettant d'observer la structure à double choc pour la toute première fois.

En combinant les simulations, la modélisation théorique et la miniaturisation en laboratoire, cette étude ouvre la voie à l'étude directe de la S2C. Elle offre une opportunité unique d'affiner notre compréhension de la dynamique des chocs astrophysiques et de valider les modèles actuels.

Préférence : oral

Références :

- Aydi, E. et al. – Early spectral evolution of classical novæ: consistent evidence for multiple distinct outflows – ApJ 905: 62-94 (2020)

- Chomiuk, L. et al. - New insights into classical novæ - ARAA 59: 391-444 (2021)

- Del Valle, M. V. et al. - Adiabatic-radiative shock systems in YSO jets and novæ outflows - A&A ,660, A104 (2022)

- Dollerschell et al. - From Astrophysical Scales to the Lab: Investigating Novae Ejecta's Complex Shock Structures - (2025), in prep

- Falize, É. et al.– Similarity properties and scaling laws of radiation hydrodynamic flows in laboratory astrophysics – ApJ 730: 96-102 (2011)

- Metzger, B. D. et al. - Shocks in nova outflows, I. Thermal emission - MNRAS 442: 713-731 (2014)

- Teyssier, R. – Cosmological hydrodynamics with adaptative mesh refinement, a new high-resolution code called RAMSES – A&A 385: 337-364 (2002)

- Warner, B. - Cataclysmic variable stars - Camb. Astrophys. Ser., Vol. 28 (1995)

Mardi 3 juin

Études expérimentales des explosions électriques confinées appliquées au foudroiement d'aéronefs

A. Jarnac, R. Sousa Martins, F. Tholin, C. Zaepffel, P. Lalande DPHY, ONERA, Université Paris-Saclay, 91120, Palaiseau, France amelie.jarnac@onera.fr

Le remplacement de l'aluminium par des composites à fibres de carbone (CFRP) dans l'industrie aéronautique s'inscrit dans une démarche d'aviation durable. Les CFRP ont été introduits à l'origine à des endroits spécifiques (aile et queue) et représentaient 10 % de la structure dans les années 90 (Airbus A330), ils constituent désormais l'ensemble du fuselage et atteignent 50 % de la structure pour les avions les plus récents (Airbus A350). Or comparé à l'aluminium, les CFRP ont une conductivité thermique et électrique plus faible, produisant un endommagement thermomécanique plus sévère en cas d'impact de la foudre [1]. Cela a conduit à retarder le développement de plusieurs programmes d'avions, mais aussi, en phase opérationnelle, à immobiliser l'avion pendant plusieurs jours pour maintenance.

Afin de protéger les avions contre le risque foudre, les avionneurs utilisent des protections appelées « LSP » (Lightning Strike Protection), qui consistent en un fin maillage ou tissu métallique positionné entre le CFRP et la couche de peinture. Parcourues par un courant foudre impulsionnel (100 kA, 50 μ s), les LSP subissent une vaporisation explosive confinée entre le CFRP et la peinture. Ceci conduit à une surpression importante responsable de l'arrachement de la peinture et des dommages mécaniques (rupture, délaminage et fracturation) du panneau composite [2,3]. L'interaction d'un arc électrique à fort courant avec des structures aéronautiques est donc un problème multi-physique impliquant : la physique du plasma d'arc, les changements de phase, la mécanique des fluides compressible et la mécanique du solide.

Afin d'étudier l'explosion des LSP, l'ONERA mène une approche couplée entre études expérimentales et numériques. Le but de cet exposé est de présenter la stratégie expérimentale, qui s'appuie sur des configurations académiques pour découpler les phénomènes de l'interaction arc-matériau et permettre validation des outils numériques en 1D et en 2D. On abordera l'ensemble des moyens mis en œuvre (chargement laser vs électrique, développement de différents diagnostics, utilisation des grands instruments) ainsi que les chalenges expérimentaux.

Une partie des travaux présentés bénéficie du cadre collaboratif de la fédération de recherche Choco-DYN.



Figure 1 : a) Photographie du banc foudre de l'ONERA (GRIFON) lors d'un test. b) Deux images de l'interaction arc-matériau extraites d'une vidéo enregistrée par une caméra rapide à un retard de 0 μ s et 143 μ s par rapport au début du tir. c) Schéma des processus d'interaction arc-matériau.

Oral (invité)

- L. Chemartin et al., Direct Effects of Lightning on Aircraft Structure: Analysis of the Thermal, Electrical and Mechanical Constraints, AerospaceLab, p. 1-15 (2012)
- [2] V. Kumar et al., Factors affecting direct lightning strike damage to fiber reinforced composites: A review, Composites Part B 183, 107688 (2020)
- [3] C. Karch et al., Modelling Mechanical Lightning Loads in Carbon Fibre-Reinforced Polymers, International Journal of Solids and Structures 162, 217 (2019)

Marion Harmand

SICLAMEN

Abstract Forum ILP 2025

Mesure d'équation d'état & de diagramme de phase du Molybdène sous choc

V. PELLIER^{1,2}, A. DENOEUD¹, S. BRYGOO¹, A. RAVASIO², T. VINCI², A. SOLLIER¹, A. BENUZZI-MOUNAIX¹

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

² LULI, CEA, CNRS, Ecole Polytechnique, Palaiseau, 91120, France

La description physique du régime de la « Warm Dense Matter » constitue un enjeu de la physique moderne. En effet, ce régime thermodynamique exotique (situé entre la physique des phases condensées et celle des plasmas) se révèle particulièrement complexe dans sa description théorique [1]. Cette complexité induit des différences notables entre les transitions de phases mesurées expérimentalement [2] et celles obtenues au travers des simulations, elles-mêmes basées sur différents modèles physiques. En outre, des divergences entre les diagrammes de phases expérimentaux persistent en fonction du régime de compression (statique vs. Dynamique) [3]. Le caractère cinétique de la compression dynamique modifie la nature et/ou les conditions des transitions de phase solide-solide et solide-liquide. Ces modifications ne sont, pour l'instant, que partiellement comprises par les modèles théoriques. De ce fait, la mesure expérimentale demeure la manière la plus sûre pour construire un diagramme de phase cinétique valide.

Depuis plusieurs années, un diagnostic de diffraction X [4] visant à identifier la phase d'un matériau cristallin comprimé a été développé sur l'installation LULI2000. Grâce à une synchronisation judicieuse des deux chaines Nord et Sud de l'installation LULI2000 (l'une utilisée afin de comprimer dynamiquement la matière et l'autre afin de générer une source X quasi-monochromatique), ce diagnostic nous a permis d'étudier les diagrammes de phases cinétiques de différents métaux de transition (Fe, Ni, Mo, Ta) le long de leur Hugoniot principal, au travers de l'identification des phases matérielles comprimées (solide cristalline ou liquide) et en mesurant (si possible) leur masse volumique jusqu'à la fusion. En plus de notre diagnostic de diffraction X, un dispositif VISAR fut utilisé pour remonter aux vitesses particulaires associées. Celles-ci nous ont permis, couplées à nos mesures de masse volumique, d'obtenir des mesures absolues sur l'Hugoniot principal. Nous présentons ici les résultats obtenus sur le Molybdène, pour des pressions jusqu'à 4 Mbar.

References:

[1] – John A. Moriarty, Ultrahigh-pressure structural phase transitions in Cr, Mo, and W, Phys. Rev. B 45, 5 (1992).

[2] – J. Wang et al., X-ray diffraction of molybdenum under shock compression to 450 GPa, Phys.Rev.B. 92, 174114 (2015).

[3] – R. Hrubiak, Y. Meng & G. Shen, *Microstructures define melting of molybdenum at high pressures*, Nature Communications **8**, 14562 (2017).

[4] – A. Denoeud *et al.*, *X-ray powder diffraction in reflection geometry on multi-beam kJ-type laser facilities*, Rev. Sci. Instrum. **92**, 013902 (2021).

(Préférences : Présentation Orale)

Experimental and numerical investigation of laser intensity distribution influence on laser pressure loading.

M. Weber^{a,b}, Y. Raffray^c, B. Aubert^c, A. Benuzzi-Mounaix^a, M.Harmand^b, D. Hebert^c, B. Jodar^d, D. Loison^e, L. Videau^d, T. Vinci^a, L. Berthe^b
^aLaboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses (CNRS UMR 7605) Route de Saclay91128 Palaiseau.
^bProcedes et Ingenierie en Mecanique et Materiaux (CNRS UMR 8006) 151 Boulevardde l'Hopital 75013 Paris.
^cCEA CESTA 15 avenue des Sablieres 33114 Le Barp.
^dCEA DAM DIF Chemin du Ru 91680 Bruyeres-le-Chatel.
^eInstitut Physique de Rennes (CNRS UMR 6251) Allee Jean Perrin 35042 Rennes. *mathieu.weber@polytechnique.edu*

Laser shocks applications are numerous and various [1-4]. They all require to know how pressure loading - due to laser irradiation - is influenced by laser parameters [5-8]. This study aims at analyzing the influence of laser intensity distribution on pressure loading. This work presents results from laser shots proceeded at LULI2000 on Aluminium with LiF window targets. First, laser parameters are introduced and radial distribution of laser intensity is estimated thanks to a fourfold Gaussian distribution [9-10]. Then, experimental results and post-mortem samples are analyzed. Afterwards, two methods of laser pressure loading estimation - considering laser intensity distribution - are used and compared. First one with the 1D multi-physics simulation code ESTHER and second one coupling the use of both ESTHER and the 2D hydrodynamics simulation code HESIONE. Discussion illustrates the accuracy of these two methods regarding experimental results. Finally, future possible works are suggested as testing the methodology on other laser facilities or using a 2D/3D multi-physics simulation code.

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

References

[1] P. Peyre, R. Fabbro, Laser shock processing: a review of the physics and applications 27 (12) 1213–1229.

doi:10.1007/BF00326477.URLhttps://link.springer.com/10.1007/BF00
326477

[2] A. Benuzzi-Mounaix, M. Koenig, G. Huser, B. Faral, D. Batani, E. Henry, M. Tomasini, B. Marchet, T. A. Hall, M. Boustie, T. De Ress´eguier, M. Hallouin, F. Guyot, D. Andrault, T. Charpin, Absolute equation of state measurements of iron using laser driven shocks 9 (6) 2466–2469. doi:10.1063/1.1478557.URLhttps://pubs.aip.org/pop/article/9/6/246 6/319085/Absolute-equation-of-state-measurements-of-iron

[3] Y. Raffray, B. Jodar, J.-C. Sangleboeuf, A. Benuzzi-Mounaix, T. Vinci,L. Berthe, E. Lescoute, E. Barraud, E. Brambrink, R. Daudin, J.-J.Blandin, D.

Laurent Mercadier

Abstract for the ILP forum 2025

Transient spectroscopies at the SCS instrument of European XFEL

The Spectroscopy and Coherent Scattering (SCS) Instrument of the European X-ray Free Electron Laser (EuXFEL) provides time-resolved X-ray spectroscopy tools to investigate the electronic structure of solids and liquids and reveal material dynamics on nanometer length scales using soft x-rays. Two experiment stations, FFT and XRD, are provided for solid state sample environments, facilitating forward- and back-scattering geometries for thin films, complex samples and single crystals, respectively. One experimental chamber, CHEM, is dedicated to femto-chemistry with liquid jets. The main classes of experiments are time-resolved and comprise X-ray Absorption Spectroscopy (tr-XAS) and X-ray Magnetic Circular Dichroism (XMCD) in transmission geometry, Small Angle X-ray Scattering (tr-SAXS) from thin films and nanostructures, Coherent Diffraction Imaging and (sub)-microsecond X-ray photon correlation spectroscopy, Resonant Inelastic X-ray Scattering (tr-RIXS) from thin films, crystals and liquids, X-ray Diffraction (tr-XRD) of electronic superstructures and lattices in crystals, and nonlinear X-ray – matter interaction. An emphasis on recent experiments of tr-XAS of XFEL-heated warm dense matter will be given [1]. Possibilities of two-color short pulses (2fs) non-resonant X-ray pump and resonant XMCD probe will also be presented.

[1] Mercadier et al., Nature Physics 20, 1564–1569 (2024)

Étude des transitions de phase non-équilibres dans le silicium sous excitation laser femtoseconde

T. ITINA, D. IVANOV Laboratoire Hubert Curien, UMR CNRS 5516/UJM, Saint-Etienne tatiana.itina@univ-st-etienne.fr

Les transitions de phase non-équilibres dans le silicium induites par des impulsions laser ultracourtes sont essentielles pour des applications avancées en microélectronique et optoélectronique. Ce travail présente une modélisation numérique des transitions de phase induites par laser dans le silicium à l'aide d'un modèle hybride atomistique-continuum. En combinant des simulations de dynamique moléculaire (MD) et un modèle continu modifié (nTTM), nous étudions les phénomènes de fusion, d'ablations et d'amorphisation dans des conditions extrêmes de fluence et de pression. Nos résultats montrent que la température des porteurs libres et l'énergie thermique jouent un rôle crucial dans la détermination de la profondeur de fusion et des mécanismes de transition de phase, mettant en évidence des différences significatives entre les mécanismes de fusion hétérogène et homogène. En particulier, nous observons une dépendance marquée du comportement de fusion à l'orientation cristalline du silicium, avec des orientations <111> montrant une fusion plus rapide que les orientations <001>. De plus, le modèle hybride MD-nTTM permet une meilleure prédiction de la profondeur de fusion et des dynamiques d'amorphisation par rapport aux modèles continus classiques, comme le modèle nTTM, et fournit des informations précieuses pour le contrôle des processus de structuration de surface et des applications de stockage d'informations dans les matériaux à base de silicium. Ces résultats ouvrent la voie à l'optimisation des procédés de fabrication basés sur les lasers pour des applications de haute précision dans le domaine de la microélectronique.

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

- [1] D.S. Ivanov, L.V. Zhigilei, "Combined Atomistic-Continuum Modelling of Short-Pulse Laser Melting and Disintegration of Metal Films," Phys. Rev. B, 68, 064114 (2003).
- [2] T.E. Itina et al., "Interaction of femtosecond laser pulses with dielectric materials: insights from numerical modelling," Journal of Optoelectronics and Advances Materials, 12(3), 470-473 (2010).

High Power Nanosecond Laser for Dynamic Shock Compression and roadmap to kJ-class laser at high repetition rate

O. ZABIOLLE, S. BRANLY, F. MOLLICA, F. FALCOZ, A. GOLINELLI, P. LEROY, P-M. PAUL AMPLITUDE LASER GROUP, 33600 Pessac, France olivier.zabiolle@amplitude-laser.com

Key words: Pulse shaped nanosecond laser, Dynamic Shock Compression, High Average Power, High Peak Power, kJ-class laser

We report here the latest achievements in the development of high energy high repetition rate nanosecond lasers along with our road map aimed at ramping up the energy to kJ level with a very high repetition rate (one shot every 60 seconds!) which is requested by the users.

Amplitude has developed few years ago high-power nanosecond amplifier based on Pseudo Active Mirror Disk Amplifier Module (PAMDAM) technology. This technology allows to significantly increase the repetition rate of high energy nanosecond and it has been developed in both ND:YAG (Premiumlite-YAG) and ND:Glass (Premiumlite-Glass) versions. The Premiumlite-YAG laser is capable of delivering up to 75J at 10Hz (750W average power) at 1064nm in a single beam and a single pulse and has proved very high reliability and stability over 14 days of uninterrupted operation who is suitable for near.

On the other hand, the Premiumlite-Glass laser is capable of delivering up to 250J at 0.1Hz at 1053nm in a single beam and a single pulse. Thanks to a specific front-end, the pulse width of this laser can vary from a few ns to 15ns with a high resolution (125 ps) programmable pulse shape that is suitable for Laser Driven Dynamic Shock Compression. In this report, we will present first some of the lasers that has already been developed, manufactured, and delivered (European Synchrotron Radiation Facility, Los Alamos National laboratory) and the perspective of scaling the above-mentioned technology to kJ-class laser thought THRILL project.

We will continue this report by presenting our partnership with Focused Energy Inc. to develop and manufacture two kJ-class lasers, one for ignition with picosecond adjustable pulse width and the other one for compression with adjustable nanosecond pulse width. This development is supported by the Federal Agency for Breakthrough Innovations in Germany.



Fig. 1 : 3D view of the Premiumlite

Préférence : oral

Physique des atomes complexes, ionisation et émission radiative des éléments lourds : des plasmas créés par laser et par XFEL aux plasmas de tokamaks.

Olivier Peyrusse (LP3, Univ. Aix-Marseille)

Dans le cadre des plasmas, la physique atomique est impliquée dans le calcul de diverses quantités comme la distribution des états de charge et les propriétés radiatives. Ces quantités sont à leur tour utilisées pour le calcul des propriétés de transport, des pertes radiatives, les diagnostics spectroscopiques, etc...

Le calcul de ces quantités nécessite un calcul préalable de la distribution de population sur les nombreux niveaux d'énergie atomiques ou ioniques. Que ce soit dans les plasmas naturels ou de laboratoire, cette distribution est rarement donnée par les lois de l'équilibre thermodynamique. Aussi, pour les éléments lourds, l'énumération et le calcul de ces niveaux d'énergie est une tâche difficile, sans parler de toutes les transitions collisionnelles ou radiatives possibles.

La difficulté réside dans le fait que l'on est confronté à des situations de complexités différentes, depuis les configurations atomiques simples à couches presque fermées jusqu'aux configurations en couches ouvertes avec beaucoup d'électrons. C'est le domaine de la physique des atomes complexes où des propriétés globales émergent de ces grands ensembles de niveaux.

Après un rappel des méthodes standards pour aborder la physique atomique des corps lourds, on présentera ici les différences entre les plasmas à "haute densité" (par exemple, les plasmas produits par laser) et les plasmas à "faible densité" (par exemple, les plasmas du cœur des tokamaks) en termes de modélisation collisionnelle-radiative.

Ensuite, nous discuterons du problème de l'exhaustivité de la liste des configurations atomiques incluses dans les calculs sur des exemples concrets comme :

- le calcul de l'émission d'un élément lourd irradié par laser,
- le calcul de l'ionisation d'un élément lourd irradié par un rayonnement X monochromatique intense,
- le calcul de l'ionisation et de l'émission radiative du tungstène dans les plasmas de tokamaks.

Une conclusion est que les méthodes de calcul standards (par exemple la méthode Distorted-Wave pour les sections efficaces de collision) utilisées pour l'évaluation des taux de transition collisionnels ou radiatifs, sont satisfaisantes à condition qu'une liste correcte (et suffisamment exhaustive) de configurations soit utilisée dans les calculs.

Forum ILP 2025

THRILL project: advancing technology in the field of high-energy highrepetition-rate lasers

Vincent Bagnoud

GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenfoschung GmbH, Darmstadt, Germany

The EU-funded THRILL project [1] (2023-2026) deals with providing new schemes and devices for pushing forward the limits of research infrastructures (RI) of European relevance and ESFRI landmarks. To do so, the project partners have identified several technical bottlenecks in high-energy high-repetition-rate laser technology that prevent it from reaching the technical readiness level required to technically specify and build the needed devices, and guaranteeing sustainable and reliable operation of such laser beamlines at the partnering RIs. Advancing the technical readiness of these topics is strategically aligned with the long-term plans and evolution of the ESFRI landmarks FAIR, ELI (-BL) and EuXFEL, and RI APOLLON, bringing them to the next level of development and strengthening their leading position.

The project is focused and deliberately restricted to three enabling technologies, which require the most urgent efforts and timely attention by the community: high-energy high-repetition-rate amplification, high-energy beam transport and optical coating resilience for large optics. To reach our goals, the major activity within THRILL will be organized around producing several prototypes demonstrating a high level of technical readiness. Our proposal is addressing not yet explored technical bottlenecks – such as transport over long distances of large-aperture laser beams via relay imaging using all-reflective optics – and aims at proposing concrete steps to increase the performances and effectiveness of the industrial community through the co-development of advanced technologies up to prototyping in operational environments.

In this tutorial, I will review the needs of the community in term of high-energy laser capabilities and review the solutions that are being prepared for the next generation of research lasers.

References

[1] www.thrill-project.eu

Alessandra Benuzzi Mounaix

Quel laser pour la HDE en France 2030 ?

Mercredi 4 juin

Probing thermodynamic and transport properties of expanded warm dense matter by isochoric heating

<u>B. JODAR</u>^{1,2}, L. REVELLO^{1,2}, F. BRIEUC^{1,2}, J. BOUST^{1,2}, J. AUPERIN^{1,2}, F. ZUCCHINI³, A. LOYEN³, S. BERGEY³, C. SCHENEGG³, E. BARRAUD^{1,2}, T. GERAL^{1,2}, M. LAGREE^{1,2}, L. VIDEAU^{1,2}, C. BLANCARD^{1,2} and V. RECOULES^{1,2} ¹CEA, DAM, DIF, F-91297 Arpajon, France ²Université Paris Saclay, CEA, LMCE, F-91680 Bruyères-Le-Châtel, France ³CEA, DAM, GRAMAT, F-46500 Gramat, Franc benjamin.jodar@cea.fr

In high-energy-density physics, Warm Dense Matter (WDM) physics has been identified as a challenging research area due to its unique location in the density-temperature map at the junction of plasma, solid and liquid states. Many of the assumptions and approximations that have been successfully applied either in plasma physics or in condensed matter theory do not apply, making it difficult to develop a consistent model for WDM. Over the past decades, exploring this regime has become crucial for laboratory astrophysics or Inertial Confinement Fusion.

For these reasons, a pulsed-power facility has been recently developed at CEA DAM Île-de-France for studying the expanded part of WDM regime. It is based on the pulsed Joule heating technique, originally proposed by Korobenko et al. [1], for inducing a solid to plasma phase transition to metallic foils confined into a sapphire cell [2]. In this presentation, we report about recent experiments conducted on aluminum and copper to assess electrical conductivity and thermodynamic properties across a density range from solid-state value down to 1/8 of the initial density, with pressure reaching up to 12 GPa and temperature up to 10 eV. Experimental results are compared to DFT-MD simulations and various equation of state and conductivity models extracted from the literature. As a result, our experimental data appear to be able to improve significantly the modelling of EOS and electrical conductivity in expanded WDM regime.

Préférence: oral

- V. N. Korobenko and A. D. Rakhel. Technique for measuring thermophysical properties of refractory metals at supercritical temperatures. *International Journal of Themophysics* 20, (4) :1257-1266 (1999).
- [2] B. Jodar, L. Revello, J. Auperin, E. Lescoute, J.-M.Chevalier, G. De Lachèze-Murel, A. Marizy, T. Géral, C. Blancard and L. Videau. A pulsed power facility for studying the warm dense matter regime. *Review of Scientific Instruments* 95, 103526 (2024).

Réseaux de neurones informés sur la physique pour les équations d'état

Corisande LAMY, Gilles KLUTH CEA DAM DIF, 91297 Arpajon, France

Les équations d'état sont utilisées dans les simulations hydrodynamiques pour la fermeture de systèmes d'équations de conservation, et permettent notamment de définir la pression P et l'énergie interne E, pour une densité et une température données. Elles sont calculées pour une certaine grille en densité et température, par un modèle de notre choix^[1,2], et leur valeurs sont enregistrées de telle sorte à former une équation d'état dite "tabulée". C'est cette dernière qui sera ultérieurement appelée dans une simulation hydrodynamique par l'intermédiaire d'un interpolateur numérique.

Les réseaux de neurones artificiels sont des interpolateurs universels et ont prouvé leur capacité d'interpolation dans de nombreux domaines. On s'intéresse ici aux réseaux informés sur la physique (Physics Informed Neural Networks ou PINN). L'apprentissage de ce genre de réseaux est intéressant pour les équations d'état car il met en jeu à la fois des données et des équations aux dérivées partielles qui décrivent des lois physiques. Or, une des contraintes physiques que doivent respecter les équations d'état est la cohérence thermodynamique. Les interpolateurs numériques classiques sont le plus souvent appelés sur des grandeurs thermodynamiques séparément et peuvent conduire à des interpolations qui ne respectent plus la cohérence thermodynamique. Des articles récents ont montré que des PINNs étaient capables d'imposer cette contrainte dans leur apprentissage, en plus d'atteindre des taux de précision élevés^[3-5] au prix d'un nombre élevé de données. Dans cette présentation, les performances de PINNs sont comparées à celles d'interpolateurs numériques plus classiques^[6-8] sur des données produites à l'aide d'un modèle analytique de l'énergie libre d'Helmotz^[7]. La dérivation exacte de ce modèle analytique permet ainsi une vérification exacte de la précision de chacune des méthodes.

Préférence: oral

- [1] R. More, K. Warren, D. Young, and G. Zimmerman, Phys. Fluids 31, 3059 (1988).
- [2] B. Militzer, F. Gonzalez-Cataldo, S. Zhang, K. P. Driver and F. Soubiran, *Phys. Rev. E* 103, 013203 (2021).
- [3] D. Rosenberger, K. Barros, and T. Germann, Phys. Rev. E 73, 045301 (2022).
- [4] G. Chaparro and E. Muller, J. Chem. Phys. 158, 184505 (2023).
- [5] T. Callow, E. Kraisler, and A. Cangi, arXiv 2305.06856 (2023).
- [6] G. I. Kerley, No. LA-6903-MS, Los Alamos National Lab. (1977)
- [7] F. D. Swesty, J. of Comp. Phys, 127(1) p. 118-127 (1996)
- [8] M. Zeman, M. Holec and P. Vachal, Computers & Mathematics with App, 78(2) p. 483-503 (2019)

Integration of Machine Learning-Based Plasma Acceleration Simulations into Geant4: A Case Study with the PALLAS Experiment

A.HUBER¹, K.CASSOU², V.KUBYTSKYI², M.LENIVENKO², A.SYTOV³ ¹ LP2I-Bordeaux CNRS/IN2P3/Université de Bordeaux, Gradignan ² IJC-Lab CNRS/IN2P3, Orsay ³ Instituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Ferrara) huber@lp2ib.in2p3.fr

Plasma acceleration is a groundbreaking technology with applications in accelerator and light source facilities, medical and nuclear physics, and beyond. However, their development and optimization rely on computation-ally intensive Particle-in-Cell (PIC) simulations, requiring specialized expertise and multiple simulation tools, significantly limiting broader adoption.

Geant4 [1] is a widely used Monte Carlo (MC) simulation toolkit for modeling particle interactions with matter in high-energy, nuclear, accelerator, medical physics and space science. Many Geant4 applications are adaptable for plasma acceleration, which is currently missing in this toolkit.

We present the first integration of a Machine Learning (ML)-based surrogate model [2-3], trained on PIC simulations, into Geant4 as a particle source. This enables the generation and tracking of plasma-accelerated beams within complete experimental setups, unifying plasma acceleration and MC-based simulations. Our implementation focuses on the PALLAS laser-plasma accelerator test facility [4], integrating its full experimental setup into Geant4. We describe the ML model, its integration into Geant4, and key simulation results, demonstrating the feasibility of start-to-end simulations of plasma acceleration applications within a unified framework.

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

- [1] S. Agostinelli et al., NIMA 506, 250-303 (2003).
- [2] G. Kane et al. arXiv2408.15845 (2024).
- [3] P. Drobniak et al., PRAB 26, 091302 (2023)
- [4] https://pallas.ijclab.in2p3.fr/

Étude ab initio du SiO₂ dans le régime de la matière dense tiède

F. Soubiran, V. Recoules, F. Brieuc, A. Blanchet CEA-DAM-DIF, F-91297 Arpajon, France Université Paris-Saclay, CEA, Laboratoire Matière en conditions extrêmes, 91680 Bruvères-le-Châtel, France

Le dioxyde de silicium est un matériau géophysique essentiel mais il est également très largement utilisé comme étalon standard dans les expériences de choc. Durant les impacts planétaires géants de même que dans les expériences laser, le SiO₂ est soumis à des conditions de pressions et de températures extrêmes. Dans les deux cas, le matériau est d'abord comprimé le long du Hugoniot puis subit une détente isentropique. Dans les expériences de chocs, il peut également subir un choc secondaire vers des compressions encore plus élevées. Comme ce matériau sert de référence, il est nécessaire d'avoir une caractérisation précise dans les conditions extrêmes.

Dans cette présentation, nous montrerons les résultats d'une série de simulations numériques de dynamiques moléculaires quantiques appliquées au SiO₂. Ces simulations nous ont permis de dériver une équation d'état dans le régime pertinent pour les expériences laser. Nous montrerons une série de comparaisons avec l'expérience permettant de valider la robustesse et la précision de cette équation d'état pour une utilisation dans la méthode de désadaptation d'impédance. Nous avons également exploré les propriétés structurelles et de transport qui sont pertinentes pour les modèles géophysiques et hydrodynamiques.

Préférence : oral

Science attoseconde : Des découvertes pionnières aux défis actuels

Thierry RUCHON LIDYL, Université Paris-Saclay, CEA, 91191 Gif-sur-Yvette, France Thierry.ruchon@cea.fr

Le prix Nobel de physique 2023 a récompensé les contributions essentielles d'Anne L'Huillier, Pierre Agostini et Ferenc Krausz à l'essor actuel de la science attoseconde (une attoseconde = 10^{-18} s); science qui s'attache à décrire les dynamiques électroniques dans la matière avec une résolution temporelle attoseconde. En découvrant un phénomène d'optique extrêmement non linéaire, la génération d'harmoniques d'ordre élevé, et en développant les méthodes permettant la caractérisation temporelle du rayonnement émis, les lauréats du prix Nobel ont permis de franchir la « barrière femtoseconde » au début des années 2000 [1]. Dans une approche historique, nous reviendrons sur les grandes étapes qui ont jalonné le chemin vers ce nouveau domaine. Nous décrirons ensuite quelques développements récents de ces sources, mais aussi de leurs applications en optique et physique de la matière diluée et condensée. En particulier, nous détaillerons une approche réconciliant les descriptions non perturbatives habituelles, en terme de champ, de la génération d'harmonique d'ordre élevé, et leur pendant en terme de photons [2-4].



(Gauche) Dispositif expérimental utilisé par Anne L'Huillier au CEA pour l'étude des harmoniques d'ordre élevés. (Droite) Spectromètre à temps de vol à bouteille magnétique utilisé par Pierre Agostini au LOA puis au CEA pour la mesure du profil temporel d'impulsions attosecondes.

- [1] Ruchon, T. et al., 2023. Photoniques **122**, 21-24. <u>https://doi.org/10.1051/photon/202212221</u>
- [2] Luttmann, M. et al., 2023. Science Advances, 9(12). http://dx.doi.org/10.1126/sciadv.adf3486
- [3] Vimal, M. et al., 2023. Physical Review Letters, 131(20), 203402. <u>http://dx.doi.org/10.1103/-physrevlett.131.203402</u>
- [4] Luttmann, M. et al., 2023. Physical Review A, **108**(5), 053509. <u>http://dx.doi.org/10.1103/-physreva.108.053509</u>

Toward inertial fusion energy with lasers and reactor design

X. Ribeyre¹, H. Chesneau², H. Besaucèle², J. Néauport¹, and A. Casner¹ 1-CEA, DAM, CEA-CESTA, F-33114 Le Barp, France 2-GenF, 2 Avenue Gay Lussac, 78990 Elancourt, France xavier.ribeyre@cea.fr

For the first time in any fusion approach, a target gain greater than one was achieved on 5 December, 2022 at the National Ignition Facility (USA) using lasers in an indirect drive configuration [1]. This breakthrough has since been repeated five times, establishing fusion as a possibility nor than a concept. Inertial fusion for energy production and power plant design now gains in credibility.

In this work, after recall of major historical achievement in fusion research, we will present some backgrounds of ignition physics to achieved high target gain. Then we will gives fundamental principles and parameters reactors design, emphasizing the key challenges and obstacles in their development. We analyze various reactor figures of merit and discuss different hydro-scaled target designs, exploring different ignition schemes. This analysis aims to clarify the current state and future prospects of laser-driven fusion technology.

This project was supported by the French government as part of France 2030 (AAP Réacteurs Nucléaires Innovants - #DOS0237680/00).

Préférence: oral

- H. Abu-Shawareb et al., Phys. Rev. Lett. 132, 065102 (2024); O. A. Hurricane, High Energy Density Physics 53, 101157 (2024).
- [2] X. Ribeyre, H. Chesneau, H. Besaucèle, J. Néauport and A. Casner, manuscript submitted to Physics of Plasmas.
- [3] H. Besaucèle, Photoniques review, **128**, 39 (2024).

Simulations de production de particules alpha par accélération laser-plasma dans les installations PW

<u>T. Carrière¹</u>, C. Caizergues ¹, D.Singappuli¹, H. Larreur^{1,2}, M.Huault¹, K. Batani³, E. d'Humières¹, D. Raffestin¹, D. Batani¹, M. Tarisien⁴, Ph. Nicolaï¹

¹CELIA (Centre Lasers Intenses et Applications), CNRS, CEA, Université de Bordeaux, UMR 5107, France ²University of Salamanca, Salamanca, Spain ³Institute of Plasma Physics and Laser Microfusion, Hery 23, 01-497, Warsaw, Poland

⁴Laboratoire de physique des 2 infinis de Bordeaux, Gradignan, France Main author email address: thomas.carriere@u-bordeaux.fr

The landscape of attainable radio-isotopes with medical cyclotrons is limited due to the low energy of accelerated particles. In France, only the ARRONAX cyclotron in Nantes is able to produce several isotopes with energetic protons but also alpha particles, for a broad range of medical applications. A new way of producing those radio-isotopes has been studied, that is, using secondary alpha particles sources as a way to generate those relevant isotopes. Proton-Boron nuclear reactions have been actively studied these last few years as a possible way of producing secondary alpha particles sources with laser-driven proton acceleration of hydrogenated targets.[1] The versability of such laser systems is the preferred way to complement conventionally used medical cyclotrons.

The two main mechanisms of proton acceleration studied for this nuclear scheme are the Target Normal Sheath Acceleration (TNSA) and the Hole-Boring (HB) process. In the first case, protons are accelerated at the rear side of the target via the electrostatic field induced by laser driven electrons escaping from the target. The exponential shape of the proton energy spectrum induces a great number of nuclear reactions throughout a Boron secondary target despite a decrease of the cross-section above the main resonance at 675 keV.

For the Hole-Boring process, protons are accelerated at the front side thanks to the electric field induced by the electrons pushed by the radiation pressure of these high laser intensities. Accelerated protons interact directly with boron atoms contained within the same target [2]. Different types of targets have been studied both numerically and experimentally for Hole-Boring based alpha production.

Particle-in-Cell (PIC) and Monte-Carlo (FLUKA) simulations have been conducted to better understand experimental campaigns done on the VEGA-III laser at CLPU, Salamanca, Spain in november 2022 and march 2023. This laser is characterized by a short pulse duration, 30fs and a high-repetition rate of 1Hz. The two proton acceleration schemes have been studied numerically to better understand the experimental data and to deepen the analysis. PIC simulations for TNSA protons could directly be compared with experimental diagnostics and gave confidence for Hole-Boring protons results. Monte-Carlo simulations for both schemes were then directly compared to experimental data and confirmed the results. We developped a new method to directly implement p-B nuclear reactions in Smilei and we will compare with results from the simulation chain. This new method can be generalised for any simulation done for pB experiments at PW-scale facilities such as LFEX, ELI, CLPU...

Préférence: oral

References

[1] Margarone Daniele, Alessio Morace, Julien Bonvalet et al. «Generation of α -Particle Beams With a Multi-KJ, Peta-Watt Class Laser System». Frontiers in Physics 8 (9 sept. 2020): 343. https://doi.org/10.3389/fphy.2020.00343.

[2] Margarone, Daniele, Julien Bonvalet, Lorenzo Giuffrida, et al. « In-Target Proton–Boron Nuclear Fusion Using a PW-Class Laser ». Applied Sciences 12, no 3 (28 janvier 2022): 1444. https://doi.org/10.3390/app12031444.

Implosion and illumination designs for laser driven fusion energy

D. BARLOW, M. LAFON, D. VIALA, S. LE PAPE, S. LAFFITE CEA DIF, Bruyères-le-Châtel, 91297 Arpajon LULI, Ecole Polytechnique, 91128 Palaiseau duncan.barlow@polytechnique.edu

To achieve laser driven nuclear fusion, a pellet of hydrogen isotopes is imploded in reaction to an expanding plasma, ablated by the laser. The implosion is subject to hydrodynamic instabilities, while laser-plasma instabilities (LPI) occur in the expanding plasma. These instabilities are two of the greatest challenges faced when designing suitable implosions for laser fusion experiments. Each instability can be evaluated numerically but requires expensive computations that can become prohibitive on the timescales required by the implosion. A new methodology employs temporally discretized evaluations and simple physics based approximations to enable fast and accurate illumination design of experiments at existing laser facilities [1].

Major breakthroughs in laser fusion experiments have led to significant public and private funding around the world [2]. Within France, the Taranis project led by Genf is aiming to create a laser fusion reactor to produce electrical energy. In order to achieve the necessary implosion stability, a reactor would require hundreds or thousands of laser beams, each with carefully selected parameters. The enormous parameter space and the expense of numerical evaluation is a significant challenge for design of future facilities.

This talk presents a new methodology for creating and evaluating the drive configuration of beams for future laser facilities. A state-of-the-art ray-tracing tool [3] is employed alongside automated optimization to create novel illumination geometries while considering the impact of the LPI cross-beam energy transfer, beam spot shapes, bandwidth and wavelength. This technology is a critical step towards fusion energy, furthermore it creates opportunity for designing a greater variety of experiments at current facilities, and evaluating LPI thought too computationally expensive for prior methods.

Préférence: oral

- [1] Barlow, D. et al. "Optimization Methodology of Polar Direct-Drive Illumination for the National Ignition Facility" Physical review letters 133, (2024) 175101.
- [2] Abu-Shawareb, H., et al. "Lawson criterion for ignition exceeded in an inertial fusion experiment." Physical review letters 129.7 (2022): 075001.
- [3] Colaïtis, A, et al. "Adaptive inverse ray-tracing for accurate and efficient modeling of cross beam energy transfer in hydrodynamics simulations." Physics of Plasmas 26.7 (2019).

Jeudi 5 juin

Principes de la fusion par confinement magnétique et projet ITER

Y. Camenen Laboratoire PIIM UMR7345, CNRS, Aix-Marseille Univ., Marseille yann.camenen@univ-amu.fr

Avec la démonstration de l'ignition pour la fusion laser au NIFS, les nouveaux records de production d'énergie de fusion sur le tokamak européen JET, l'avancée de la construction d'ITER, l'annonce de programme nationaux ambitieux au Royaume-Uni, aux Etats-Unis, au Japon, en Chine et en Allemagne ainsi que l'essor des startups promettant la production d'électricité de fusion dès 2040, l'actualité fusion a été extrêmement riche ces dernières années.

Le but de cet exposé est d'introduire les concepts de base et les ordres de grandeur permettant à chacun de développer sa propre analyse de l'actualité sur la fusion.

Les principes de la fusion par confinement magnétique ainsi que les défis physiques et technologiques associés au développement d'une centrale à fusion basée sur le concept du tokamak seront introduits progressivement tout en faisant le lien avec les récents résultats marquants et le projet ITER.

ID24-HPLF: Time-resolved X-ray Absorption Spectroscopy coupled to laser-driven dynamic compression at the ESRF

J.-A. HERNANDEZ¹, N. SEVELIN-RADIGUET¹, R. TORCHIO¹, S. BALUGANI¹, E. COLONNA¹, O. MATHON¹ ¹European Synchrotron Radiation Facility, Grenoble jean-alexis.hernandez@esrf.fr

X-ray Absorption Spectroscopy (XAS) allows to probe the local electronic and structural environment around specific atoms by exciting their core electrons with keV-range X-ray radiation. This method is increasingly applied in dynamic compression experiments [e.g., 1, 2, 3] and complements X-ray diffraction measurements. XAS's element selectivity makes it ideal for determining oxidation states and local ionic environments in both ordered and disordered systems. Its sensitivity to ionic disorder serves as a bulk temperature probe in simple solids where thermal disorder is predominant.

In this presentation, I will provide an overview of the High-Power Laser Facility (HPLF), a laser-driven dynamic compression platform coupled to the energy-dispersive XAS beamline ID24-ED at the European Synchrotron Radiation Facility (ESRF-EBS) [4]. This setup enables time-resolved (<100 ps duration) high-resolution X-ray Absorption Near Edge Spectroscopy (XANES) and Extended X-ray Absorption Fine Structure (EXAFS) measurements for elements with absorption edges between 5 and 28 keV. The HPLF drive laser operates at a 1053 nm wavelength, delivering 55 J in 4 to 15 ns pulses, capable of producing ablation pressures up to 140 GPa in black. The facility is equipped with two line-imaging VISAR systems, one line-imaging streak optical pyrometry system, and online analysis tools, allowing for shot-to-shot characterization of hydrodynamic conditions at the current operation shot rate of 1 shot per 5-10 minutes (limited by target alignment and shot sequence, the laser being able to shoot every 10 s).

Préférence: oral invité

- [1] Sio et al., Nature Communications (2023)
- [2] Turneaure et al., PRB (2022)
- [3] Balugani et al., PRL (2024)
- [4] Hernandez et al., High-Pressure Research (2024)

Effet de la conduction thermique électronique et de l'absorption par bremsstrahlung inverse sur la conversion X

O. Poujade^{1,2}, M. Peret¹ ¹CEA, DAM, DIF, F-91297 Arpajon, France ²Université Paris-Saclay, CEA-DAM, LMCE, F-91297 Arpajon, France olivier.poujade at cea.fr

Après un rappel des modèles d'absorption et de conduction thermique électronique qui ont été intégrés dans le code d'hydrodynamique-radiative (TROLL), nous montrerons l'intérêt d'utiliser deux constantes ajustables, C_{abs} et C_{dif} (réglage des niveaux d'absorption et de conduction), dans la restitution de plusieurs expériences où sont diagnostiquées la réflectivité et la conversion X.

Les meilleurs valeurs de ces deux constantes ($C_{abs} \sim 0.5 - 0.6$ et $C_{diff} < 1$), qui permettent de restituer ces diagnostics par le code TROLL, sont compatibles avec les valeurs obtenues par la dynamique moléculaire.

Nous montrerons l'origine théorique de cet abaissement de l'absorption et de la conduction par rapport aux modèles usuels et les conséquences sur le problème du "drive deficit" (mis en évidence sur le NIF) en particulier.

Préférence: oral

Génération de choc laser sur un simulant d'explosif

H. Lorenté^{1,2}, <u>A. Mouskeftaras</u>², A. Sollier³, B. Lukic⁴, A. Rack⁴, L. Jumpertz¹ ¹French-German Research Institute of Saint-Louis (ISL), 5 rue du Général Cassagnou, 68301 Saint-Louis, France ²Aix-Marseille University, CNRS, LP3 UMR 7341, Campus de Luminy, Case 917, CEDEX 09, 13288 Marseille, France ³CEA, DAM, DIF, 91297 Arpajon, France ⁴ESRF-The European Synchrotron, 71 Avenue des Martyrs, 38000 Grenoble, France alexandros.mouskeftaras@cnrs.fr

Les détonateurs opto-pyrotechniques à explosifs secondaires, essentiels pour le spatial et la défense, sont fiables, résistants aux agressions électromagnétiques et déclenchables à distance. Toutefois, certaines applications exigent un temps de réponse plus rapide. Nous explorons une approche alternative consistant à générer un plasma directement sur l'explosif pour créer une onde de choc et initier rapidement la détonation, évitant ainsi la phase de combustion.

Une étude préliminaire menée à l'ESRF a utilisé l'imagerie par rayons X résolue en temps pour caractériser l'onde de choc générée par un laser intense dans un simulant d'explosif (voir Figure 1). Des échantillons de sucrose comprimé, avec ou sans dopants optiques, ont été testés sous une impulsion laser nanoseconde de 350 mJ focalisée sur une zone de 1 mm, atteignant une intensité de 8.4 GW/cm². L'onde de choc n'ayant pas pu être directement observée, ses caractéristiques ont été déduites à partir de modèles de mélange et des équations de Rankine-Hugoniot. Les calculs indiquent une vitesse de choc dépassant 3000 m/s et une pression maximale estimée à 4.5 GPa, ce qui est bien supérieur à la vitesse du son dans le matériau.



Figure 1. Montage expérimental et photographie de l'échantillon utilisé

Préférence: oral

Patrick Michel (Nice)

Mission spatiale HERA

Dernières avancées en fusion par confinement inertiel sur le NIF et le LMJ

M. LAFON¹, R. RIQUIER¹, V. TASSIN¹, S. DEPIRREUX¹, S. LAFFITE¹, S. LIBERATORE¹, P-E. MASSON-LABORDE¹, R. BOTREL², Q. CAUVET¹, R. COLLIN¹, L. MASSE¹, P. DUPRE³, L. LE DEROFF³, V. TRAUCHESSEC¹ et J. TRELA¹

¹CEA DAM-DIF, 91297 Arpajon, France ²CEA-VALDUC, Is-sur-Tille 21120, France ³CEA-CESTA, Le Barp F-33114, France marion.lafon@cea.fr

La fusion par confinement inertiel (FCI) est un domaine de recherche stratégique pour le développement de la fusion nucléaire comme source d'énergie propre et durable. Au cours des dernières années, des progrès significatifs ont été réalisés sur plusieurs fronts, notamment sur les installations de fusion de référence, le National Ignition Facility (NIF) ayant démontré le régime d'ignition pour la première fois fin 2022 aux Etats-Unis, mais également sur le Laser Mégajoule (LMJ) en France.

Cette présentation propose une revue des avancées récentes dans ces différents secteurs. D'abord, au NIF, où des résultats prometteurs ont été obtenus en matière de gain net d'énergie, avec des expériences d'ignition qui marquent des jalons importants dans la recherche sur la fusion inertielle en repoussant toujours un peu plus les performances atteintes. De même, sur le LMJ, des progrès notables ont été réalisés dans la compréhension des dynamiques de compression des plasmas et dans l'optimisation des scénarios de fusion. Ces résultats ouvrent la voie à des améliorations cruciales pour les prochaines étapes expérimentales. Les difficultés et les enjeux majeurs pour la réalisation de ce type d'expériences seront illustrés par les résultats expérimentaux obtenus dans ce domaine.

Parallèlement, un nombre croissant de start-ups émergent dans l'écosystème de la fusion, apportant de nouvelles approches et technologies innovantes. Ces entreprises explorent des concepts variés, allant des lasers à haute puissance à de nouveaux dispositifs de compression, dans l'objectif d'accélérer la transition vers la commercialisation de la fusion nucléaire. Lors de cette présentation, nous mettrons en lumière les principaux défis et les solutions proposées par ces différents acteurs.

Préférence: oral

Mise en évidence de diffusion Raman stimulée latérale dans des expériences de fusion par confinement inertiel en attaque indirecte sur l'installation laser OMEGA

K. Vilayphone^{1,2,*}, V. Tassin¹, P. Loiseau^{1,2}, P.-E. Masson-Laborde^{1,2}, M.-C. Monteil¹, W. Seka³, R. Bahr³, J. Katz³, T. Filkins³, L. Bergé⁴ et S. Depierreux¹ ¹CEA, DAM, DIF, F-91927 Arpajon, France

²CEA, LMCE, Université Paris-Saclay, 91680 Bruyères-le-Châtel, France ³Laboratory for Laser Energetics, University of Rochester, Rochester, New York 14623-1299, USA ⁴Centre Lasers Intenses et Applications, Université de Bordeaux–CNRS–CEA, 33405, Talence Cedex, France

*kevin.vilayphone@cea.fr

Dans les expériences de Fusion par Confinement Inertiel (FCI) laser en attaque indirecte, plusieurs dizaines de faisceaux laser sont tirés à l'intérieur d'une cavité remplie de gaz et renfermant au centre une capsule de deutérium-tritium. Les premières expériences de ce type menées au National Ignition Facility (NIF) à des énergies de l'ordre du mégajoule ont mis en évidence d'importantes pertes d'énergie laser mesurées sur les faisceaux incidents à 30° et qui ont été attribuées à de la diffusion Raman stimulée [1]. La diffusion Raman stimulée est un mécanisme où le couplage résonnant entre l'onde laser incidente et une onde plasma électronique génère une onde électromagnétique diffusée qui peut être détectée expérimentalement. Sur les installations laser, les pertes liées à la diffusion Raman sont généralement mesurées dans la direction de la rétrodiffusion, pour laquelle l'onde électromagnétique diffusée est émise et se propage en sens inverse du laser incident. Nous montrerons dans cet exposé qu'au sein du plasma inhomogène créé par l'expansion de la capsule, de la lumière Raman peut aussi être significativement amplifiée dans une direction latérale (hors axe de rétrodiffusion) et être réfractée au cours de sa propagation dans la cavité, avant d'en sortir avec un angle permettant sa détection par des diagnostics expérimentaux. De plus, lorsqu'elle est émise le long d'iso-densités dans le plasma inhomogène entourant la capsule, la diffusion Raman latérale peut donner lieu à des pertes d'énergie laser significatives, supérieures aux pertes par rétrodiffusion. Nous montrerons également que ces conclusions issues de résultats expérimentaux obtenus sur l'installation OMEGA à l'échelle kilojoule pourraient être aussi valides à l'échelle mégajoule, notamment dans des expériences en attaque indirecte au NIF ou au Laser Megajoule. Enfin, bien que la diffusion Raman latérale soit une problématique majeure de la FCI en attaque directe [2,3], les résultats présentés dans cet exposé constituent la première mise en évidence expérimentale de ce mécanisme en attaque indirecte.

References

[1] N. Meezan et al., Physics of Plasmas 17, 056304 (2010).

- [2] M. Rosenberg et al., Physics of Plasmas 27, 042705 (2020).
- [3] S. Hironaka et al., Physics of Plasmas 30, 022708 (2023).

Préférence: oral

Modeling optically smoothed laser fields with thick rays

E.ROBINET^{1,2}, G.SARY^{1,2}, D.PENNINCKX^{1,2}, E.D'HUMIERES^{2,3} ¹CEA, DAM, DIF, F-91297 Arpajon, France ²Université Paris-Saclay, CEA, LMCE, F-91680 Bruyères-le-Châtel, France ³CELIA, UMR 5107, Université de Bordeaux-CNRS-CEA, 33405 Talence, France emeric.robinet@cea.fr

In the context of Inertial Confinement Fusion (ICF), optical smoothing is implemented on the laser beams to produce wide laser spots with a relatively homogenous intensity profile. As the beams propagate in the plasma, they trigger parametric instabilities. Accurately describing these instabilities requires a model that accounts for the statistics of the hot spot intensity in the beam. While it is straightforward to do so with models based on a description of the field via envelopes (temporal, or spatio-temporal ones in paraxial codes), such a method remains computationally expensive.

We propose to model the laser field with thick rays. The laser field is described as a sum of rays, which we propagate individually in vacuum or in a plasma, and then project coherently on a grid (with a resolution compatible with the wavelength) to recover the full laser field. Unlike ray tracing methods commonly used in rad-hydro-codes, we sum the field carried by the rays instead of their intensity to retain the phase information.

For now, we focus on the propagation of the laser but our mid-term goal remains to supplement this method with the response of the plasma (modeled as a fluid on the grid) to model effects such as self-focusing and three-wave couplings between rays and the plasma (notably Stimulated Brillouin Scattering).

We first explain why we use thick rays [1]; in our method, we wish to describe the laser field both on the ray trajectories and between them. Thick rays are built as solutions of the EM wave propagation equation in the vicinity of a central trajectory (a thin ray) given by geometrical optics. By using an approach similar to the paraxial envelope approximation scheme, equations modeling the width, curvature and amplitude along the ray, are obtained [2]. We briefly explain the numerical method used to propagate these quantities in vacuum or in a plasma.

We then explicit the modeling of the incident laser beam with a collection of rays [3]. Each ray is emitted orthogonally to the local wave front, with constant spacing between them. We determine the initial ray parameters that best represent the incident laser as a sum of the fields of the rays.

Finally, we compare the field modeled with thick rays with that obtained from an envelope code for different laser fields, including a constant plane wave, a Gaussian field and a smoothed laser field. We also study parameters influencing the accuracy of the incident field reproduction.

Preference: oral presentation

References

Popov, Ray theory and Gaussian beam method for geophysicists, Salvador-Bahia, EDUFBA, (2002)
 Colaïtis and al., Physical Review E 89, 033101, (2014)

[3] Worku and al., Journal of the Optical Society of America 35, 1091-, (2018)

Joséphine Monzac (LOA)

Accélération d'électrons par sillage

From X-ray phase contrast to coherent diffraction radiography: Solving inverse problems in laser-driven experiments

Ludovic Chopineau CEA

Major advances in condensed matter and high-energy density physics have been achieved by highly-resolved X-ray absorption contrast radiography. However, the data quality and their quantitative interpretation often remain limited since this measurement does not restitute properly all the physical mechanisms involved in these experiments under extreme conditions, especially for inhomogeneous and irregular systems. X-ray phase contrast and coherent diffraction radiography have recently demonstrated their ability to encode even more information into the image, but require a paradigm shift in the data processing. Here, we introduce a wave-based numerical approach that rigorously covers all these radiography regimes, and present a reformulation of various classes of iterative algorithms that can be used to determine crucial interaction properties in the context of laser-driven experiments.

Challenges and perspectives of efficient gamma-ray production in nearcritical targets with PW-level high-intensity lasers

M. GALBIATI¹, G. NICOTERA², M. POUYEZ³, J.-R. MARQUES², C. RICONDA³, L. ROMAGNANI², M. GRECH², L. LANCIA²

¹Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses (LULI), Ecole Polytechnique, CNRS, CEA, Sorbonne Université, Institut Polytechnique de Paris, F-91128, Palaiseau, France

²Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses (LULI), CNRS, CEA, Sorbonne Université, Ecole Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris, F-91128 Palaiseau, France

³Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses (LULI), Sorbonne Université, CNRS, CEA, Ecole Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris, F-91128, Palaiseau, France

marta.galbiati@polytechnique.edu

Laser facilities operating at multi-petawatt power and approaching peak intensities of 10^{22} - 10^{23} W/cm² are open to user access worldwide [1]. According to theoretical studies and particle-incell simulations, remarkable results are expected in these facilities where short focal can deliver pulses with relativistic field strength, $a_0 \ge 1$, on near-critical or overdense targets creating dense, relativistic, and potentially quantum plasmas. The expected results foresee the enabling of efficient super-ponderomotive acceleration of electrons [2], high-energy emission of gammas with brightness above 10^{21} photons/(s mrad² mm² 0.1%BW) in hundreds of MeV through the process of Non-linear Inverse Compton Scattering (NICS) [3,4], and therefore the opening of the exploration of strong-field quantum electrodynamics. However, users of those facilities need to face several non-idealities that make it challenging to achieve the predicted results. The difficulties range from the control of crucial laser parameters such as the temporal and spatial contrast of the pulse [5], to the design and handling of suitable targets [6] and diagnostics [7].

The present contribution addresses these topics by combining theoretical and numerical studies with the experimental results achieved during a 2024 campaign at Apollon 1PW [8]. Specifically, we address the characterization of the Apollon prepulse effect on near-critical targets, the modelling and detection of gamma-ray emission in this context considering both NICS and bremsstrahlung contribution, and the design of a routine for the data analysis of scintillators signals acquired during the campaign. Leveraging these results, we propose solutions at the target and setup level to the aforementioned challenges with the support of proof-of-concept hydrodynamic and particle-in-cell simulations. Our contribution finally details the application of these solutions to the design of a planned experiment at Apollon 3PW in the next year.

Préférence: oral

References

[1] Danson *et al.*, High Power Laser Sci. Eng. 7, e54 (2019)

- [2] Arefiev et al., J. Plasma Phys. **81**, 475810404 (2015)
- [3] Galbiati et al., Front. Phys. **11**, 1117543 (2023)
- [4] Formenti et al., Phys. Rev. E **109**, 035206 (2024)
- [5] Chen et al., High Power Laser Sci. Eng. **12**, e62 (2024)
- [6] Prencipe et al., High Power Laser Sci. Eng. 5, e17 (2017)
- [7] Rusby et al., Rev. Sci. Instrum. **95**, 123512 (2024)
- [8] Burdonov et al., Matter Radiat. Extrem. **6**, 064402 (2021)

Accélération par sillage laser auto-modulé de faisceaux intenses d'électrons relativistes de charges supérieures au μC sur l'installation LMJ-PETAL

Félicie Albert¹, Witold Cayzac², Xavier Davoine², Nathalie Blanchot³, Benoît Mahieu², Guillaume Boutoux², Isabelle Lantuéjoul², Benjamin Vauzour², Bertrand Etchessahar³, Rémi De Mollerat Du Jeu³, Romain Diaz³, Dimitri Batani⁴, <u>Lucas Ribotte^{2*}</u>.

¹LLNL, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, USA.
 ²CEA, Direction des Applications Militaires d'Île-de-France, Arpajon, France.
 ³CEA, Centre d'études scientifiques et techniques d'Aquitaine, Le Barp, France.
 ⁴CELIA, Centre Lasers Intenses et Applications, Talence, France.

*e-mail : lucas.ribotte@cea,fr

Ce travail présente les résultats d'une campagne d'accélération laser-plasma sous-critique s'étant déroulée en 2023 sur l'installation laser LMJ-PETAL. L'objectif de cette campagne était de produire et de caractériser expérimentalement des faisceaux d'électrons relativistes dans le régime d'accélération par sillage laser auto-modulé (SMLWFA). Le laser PETAL (700 fs, 360 J) a été focalisé sur le bord d'un jet d'hélium supersonique généré avec deux buses distinctes (4 mm et 10 mm de diamètre, pour des pressions avoisinant les 50 bars) présentant des densités électroniques initiales de l'ordre de 10¹⁸-10¹⁹ cm⁻³ pour un total de 5 tirs laser. Le spectromètre magnétique à particules chargées SESAME a permis de mesurer des spectres électroniques présentant des distributions à deux températures et des énergies dépassant les 150 MeV. La distribution spatiale et la charge totale des faisceaux ont également fait l'objet de notre attention grâce à une cassette radiographique disposée à proximité du centre de la chambre d'expérience (TCC) comportant un empilement d'Imaging Plates (IPs) ainsi que des pastilles d'activation nucléaire. Les charges électroniques contenues dans les faisceaux produits sont de l'ordre de 100 nC, exception faite d'un tir ayant généré une charge record dépassant 1 µC. Les résultats obtenus sont en bon accord avec des simulations particle-in-cell (PIC) 3D complètes de l'interaction laser-plasma réalisées avec le code CALDER. Ces résultats prometteurs laissent entrevoir des applications de tels faisceaux électroniques pour la production de sources secondaires de particules, la radiographie d'environnements à haute densité d'énergie ou la fusion par confinement inertiel.

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

- [1] W. Cayzac *et al.*, Experimental capabilities of the lmj-petal facility, High Energy Density Physics , 101125 (2024).
- [2] F. Albert *et al.*, Laser wakefield accelerator based light sources: potential applications and requirements, Plasma Physics and Controlled Fusion 56, 084015 (2014).
- [3] J. Shaw *et al.*, Microcoulomb $(0.7 \pm 0.4/0.2 \,\mu\text{C})$ laser plasma accelerator on OMEGA EP, Scientific Reports 11, 7498 (2021).
- [4] J. Ferri *et al.*, Electron acceleration and generation of high-brilliance x-ray radiation in kilojoule, subpicosecond laser-plasma interactions, Physical Review Accelerators and Beams 19, 101301 (2016).

Vendredi 6 juin

Gaël Buldgen (STAR INSTITUTE Liège)

Diving inside the Sun: A brief journey in helioseismology

Nonlinear Modeling of Photochemically-Induced Gaseous Optical elements

A. Oudin¹, D. Ghosh¹, E. Kur¹, L. Lancia², C. Riconda², K. Ou³, V. M. Perez-

Ramirez³, S. Cao³, D. Singh³, C. Redshaw³, H. Rajesh³, P. Dedeler³, M. R. Edwards³ and P. Michel¹

Editards and I. Milener

¹ Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA 94551, USA

² LULI, Sorbonne Université, CNRS, Ecole Polytechnique, CEA, F-75252 Paris, France

³ Stanford University, Stanford, CA 94305, USA

oudin1@llnl.gov

A proof-of-principle experiment [1] recently demonstrated dielectric mirrors made out of neutral gas, operating at fluences above 1.5 kJ/cm2 at 10 Hz repetition rate with diffraction efficiencies above 95%. By increasing the damage threshold by two or three order of magnitude compared to solid elements, such gaseous optics have a transformative potential for high-power laser applications such as Inertial Fusion Energy (IFE). Their operation relies on the modulated energy deposition of a low-energy "imprint" beam (such as a pair of overlapping beams) via absorption by a dopant element in the gas (e.g., ozone, for UV imprint beams). The resulting gas heating can initiate an acoustic/entropy wave which modulates the gas density and hence its refractive index, turning the gas into a grating or other diffractive optics elements. Here, we present results from a comprehensive modeling suite that includes: i) the chemistry of UV absorption by ozone and gas heating from the subsequent chemical reactions; ii) the nonlinear hydrodynamic response of the gas from a 2D hydrodynamic code [2] resolving Euler equations; iii) a 3D Fresnel diffraction code to calculate the diffraction of an external, high-power laser off the resulting index modulation. For small perturbations, the simulations show an excellent agreement with linear theory [3]. For stronger perturbations, nonlinear effects arise due to the depletion of ozone and nonlinear wave excitation. We will present comparisons with recent experiments at Stanford University and discuss future directions and applications of such gas-optics.

Work performed under the auspices of the U.S. Department of Energy by Lawrence Livermore National Laboratory under Contract DE-AC52-07NA27344, and funded by the LDRD Program at LLNL under Project Tracking Code No. 24-ERD-001.

oral (invited)

References

[1] Y. Michine and H. Yoneda, Commun. Phys. 3, 24 (2020).

[2] A. Oudin et al., Phys. of Plasmas (submitted)

[3] P.Michel et al., Phys. Rev. Applied (2024).

Towards opacity measurements at the LMJ facility: proof-of-principle experiments with the atomic physics platform

<u>M. Bonneau</u>¹, Q. Alexandre¹, C. Bowen¹, M. Brochier³, T. Chirac¹, C. Courtois¹, S. Debesset³, V. Denis³, R. du Jeu³, P. Dupré³, C. Esnault¹, S. Ferré¹, T. Fonseca¹, I. Geoffray², D. Gontier¹, L. Jacquet¹, S. Khieu², L. Le-Deroff³, C. Meyer¹, J.-C. Pain¹, V. Prévot¹, P. Prunet¹, S. Rassou¹, C. Reverdin¹, G. Soullie¹, M. Sozet¹, B. Vauzour¹ and B. Villette¹

1 CEA, DAM, DIF, F-91297 Arpajon, France 2 CEA, CVA, F-21120 Is-sur-tille, France 3 CEA-CESTA, F-33116, Le Barp, France Marie.Bonneau@cea.fr

The new High Resolution X-ray Spectrometer (HRXS) of the Laser Mega Joule facility (LMJ) was commissioned at the end of 2023. Combined with the broadband X-ray spectrometers DMX and mini-DMX and with X-ray imaging diagnostics [1], it constitutes a platform for atomic physics experiments at LMJ. In particular, we are interested in opacity measurements, for which the control of the sample hydrodynamics and the quality of the transmission measurement are cornerstones [2]. We performed proof-of-principle experiments for the transmission measurement of a copper plasma, generated in a laser-heated baffle Hohlraum. The Hohlraum and different backlighters were first tested separately. These preliminary experiments allowed assessing the quality of the sample preparation and choosing the best suited backlighter for the transmission measurement: a gold plasma generated from a foil. In the next step, we tested the complete setup. The center channels of HRXS provide time resolution, and spatial resolution along one axis. The time resolution suppresses the background signal, while we use the spatial resolution to select the signal transmitted by the Cu plasma on the one hand and the signal that propagated through a witness area on the other hand.

Préférence: oral

References

[1] W. Cayzac et al., High Energy Density Phys. 52, 101125 (2024).

[2] Heeter R. et al, Milestone 7720: National Opacity Program - Tri-Lab Assessment of Measurements and Models. No LLNL-TR-858890, Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), Livermore, CA (United States) (2023) Marin Fontaine¹, Clotilde Busschaert¹, Yaniss Benkadoum², Isabeau A. Bertrix^{2,3}, Michel Koenig^{2,4}, Frédéric Lefèvre², Jean-Raphaël Marquès², Diego Oportus², Akihiko Ikeda^{5,6}, Yasuhiro H. Matsuda⁵, Émeric Falize¹ et Bruno Albertazzi²

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

² LULI, CNRS, École Polytechnique, CEA, Sorbonne Universités, Institut Polytechnique de Paris, F-91128 Palaiseau cedex, France

³ Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, Institut Pierre Simon Laplace, CEA-CNRS-UVSQ, Gif-sur-Yvette, France

⁴ Graduate School of Engineering, Osaka University, Suita, Osaka 565-0871, Japan

⁵ Institute for Solid State Physics, University of Tokyo, Kashiwa, Chiba 277-8581, Japan

⁶ Department of Engineering Science, University of Electro-Communications, Chofu, Tokyo 182-8585, Japan

Contact : marin.fontaine@cea.fr

La fracturation d'un nuage moléculaire géant (GMC), résultant des effets de la turbulence, du champ magnétique, du rayonnement et de la gravité aboutit à la formation d'amas denses (McKee & Ostriker 2007). Lorsque ces amas contenus dans le GMC sont stables, l'impact d'un jet protostellaire, par exemple un jet de Herbig-Haro (Bally 2016), peut fournir l'impulsion nécessaire pour catalyser l'effondrement. Ce phénomène de déclenchement externe de formation d'étoiles à fait l'objet d'une expérience réalisée sur l'installation laser LULI2000. Un jet supersonique a été généré par le laser nanoseconde et projeté sur une sphère en plastique ou en mousse, reproduisant ainsi l'interaction d'un jet de Herbig-Haro avec un amas. Des simulations numériques 3D effectuées avec le code d'hydrodynamique radiative TROLL (Lefebvre et al. 2018) ont fourni des données détaillées permettant d'analyser la compression de la sphère et de caractériser le jet. La similitude entre les jets protostellaires et expérimentaux s'est appuyée sur des lois d'échelle entre les deux systèmes. La simulation de diagnostics expérimentaux, notamment de radiographies X avec le code DIANE (Caillaud et al. 2014), ont montré un bon accord avec les données expérimentales. Les résultats de l'expérience, soutenus par les simulations, ont démontré que l'impact d'un jet protostellaire sur un amas dense pouvait réduire la masse de Bonnor-Ebert d'environ 9 %, abaissant le critère de stabilité et ainsi favorisant l'effondrement (Fontaine et al. 2025).

Préférence : Présentation orale

References

Bally, J. 2016, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 54, 491
Caillaud, M., et al. 2014, in SNA+MC 2013, EDP Sciences, 06004
Fontaine, M. et al. 2025, Accepted by the Astrophysical Journal
Lefebvre, E. et al. 2018, Nuclear Fusion, 59, 032010
McKee, C. F., & Ostriker, E. C. 2007, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 45, 565

Overview of modern PIC simulations for laser-plasma interaction

F. Pérez

LULI - CNRS, CEA, Sorbonne Université, Ecole Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris F-91128 Palaiseau cedex, France frederic.perez@polytechnique.edu

The Particle-in-Cell (PIC) method is a widely used computational technique in plasma physics, and in particular for laser-plasma interaction. This presentation will provide an overview of PIC simulations, including the applications, basic principles, additional physics, advanced algorithms, and computational challenges. The current landscape in terms of super computing capabilities and available codes will also be addressed.

oral

Étude de la dégradation du rendement neutronique en régime compressif au Laser MegaJoule

R. Riquier⁽¹⁾, V. Tassin⁽¹⁾, R. Botrel⁽²⁾, S. Depierreux⁽¹⁾, P. Dupre⁽³⁾, J. Gallaire⁽²⁾, S. Laffite⁽¹⁾, M. Lafon⁽¹⁾, L. Le Deroff⁽³⁾, P.-E. Masson-Laborde⁽¹⁾
(1) CEA, DAM, DIF, Arpajon, France
(2) CEA, DAM, VALDUC, Is-sur-Tille, France
(3) CEA, DAM, CESTA, Le Barp, France

Depuis 2022, le Laser MegaJoule (LMJ) a atteint un nombre suffisant de faisceaux laser pour permettre une plateforme de fusion par confinement inertiel (FCI) en irradiation symétrique : jusqu'à 270 kJ à 3ω peuvent être envoyés sur cible, en utilisant quatre anneaux d'irradiation, composés de cinq quads chacun.

Nous présenterons une campagne récente en attaque indirecte, pendant laquelle le régime compressif a été exploré. Dans cette expérience, des capsules dopées en silicium et remplies en D2 ont été implosées, en utilisant des impulsions 2-chocs, en cavités rugby et cylindre. La mise en service continue de nouveaux diagnostics plasma a permit la mesure de la rétrodiffusion laser, l'ambiance radiative, la fermeture du TEL, la symétrie du point chaud et les performances neutroniques.

Malgré l'augmentation du rapport de convergence de la capsule ($\sim 15x$), le « Yield over Simulation » (YoS) 2D n'a pas dépassé 10 %. Des simulations 3D intégrées, ainsi que des simulations 2D haute résolution incluant la tente de maintient ont été menées pour étudier la dégradations des performances.

Préférence: oral

Simulating relativistic beam-plasma instabilities with the quasistatic PIC code QuaSSis

Q. Labro^{1, 2}, X. Davoine^{1, 2}, L. Gremillet^{1,2}, L. Bergé^{1, 2, 3} ¹CEA, DAM, DIF, 91297 Arpajon, France ²Université Paris-Saclay, CEA, LMCE, 91680 Bruyères-le-Châtel, France

³Université de Bordeaux, CNRS, CELIA, 33405 Talence Cedex, France

Quasistatic particle-in-cell (QSPIC) codes [1] are increasingly being used to study laser or plasma wakefield accelerators. QSPIC codes decouple the slow evolution of a particle or laser beam from the fast response of the plasma electrons, an approach that reduces the computational cost by several orders of magnitude compared with conventional PIC codes. In this presentation, we demonstrate the potential of the QSPIC method to investigate relativistic beam-plasma instabilities [3].

QuaSSis, a QSPIC code recently developed in our group, is first employed to simulate the oblique two-stream instability (OTSI) arising during the propagation of a μ m-scale, 10 GeV electron beam through a collisionless hydrogen plasma. Its predictions are validated against the standard PIC code CALDER [2]. We then describe a new numerical scheme adapted to periodic transverse boundary conditions, which is surprisingly nontrivial to implement in the QSPIC framework. This feature enables QuaSSis simulations of transversely infinite beams, the results of which can be compared with an analytical spatiotemporal model for the OTSI [4]. Finally, we discuss how the initial noise, intrinsic to the PIC method and crucial for seeding instabilities, can be controlled in QSPIC simulations to ensure reliable predictions of instability growth rates and saturation levels.

- [1] P. Mora and T. Antonsen, Jr., Phys. Plasmas 4, 217 (1997).
- [2] E. Lefebvre et al., Nucl. Fusion 43, 629 (2003).
- [3] A. Bret, L. Gremillet, and M. E. Dieckmann, Phys. Plasmas 17, 120501 (2010).
- [4] P. San Miguel Claveria et al., Phys. Rev. Res. 4, 023085 (2022).

Vers une modélisation réaliste du chauffage et de l'ionisation d'une cible solide irradiée par un laser ultra-intense

<u>T. Huet</u>^{1,2}, X. Davoine^{1,2}, C. Blancard^{1,2}, L. Gremillet^{1,2}, D. Tordeux¹ ¹ CEA, DAM, DIF, F-91297 Arpajon, France ² Université Paris-Saclay, CEA, LMCE, 91680 Bruyères-le-Châtel, France thomas.huet@cea.fr

Les lasers à ultra-haute intensité (UHI) interagissant avec des cibles solides sont largement utilisés pour diverses applications, telles que l'accélération d'ions, le chauffage isochore d'un matériau, ou la production de sources X ultra-brèves par Bremsstrahlung ou émission K_{α} . Une impulsion laser UHI accélère des électrons de hautes énergies à la surface de la cible, dont le transport ultérieur dans le cœur de la cible induit des processus d'ionisation et de chauffage ultra-rapides. La modélisation précise de ces phénomènes à l'aide de codes *particlein-cell* (PIC) est très coûteuse numériquement, ce qui nécessite souvent de recourir à des cibles pré-ionisées ou d'en réduire la densité. Lors de cet exposé, nous présenterons des simulations PIC réalistes de ce problème, réalisées avec le code CALDER [1], dans le cas d'une impulsion UHI de durée 30 fs et intensité 2.2×10^{18} W.cm⁻² irradiant une mince (~ 2 µm) feuille d'aluminium.

Nous avons d'abord cherché à élucider les principaux mécanismes à l'origine du chauffage des électrons « froids » du cœur de la cible, jusqu'à des températures de plusieurs dizaines d'eV dans nos conditions. Deux mécanismes peuvent survenir : un chauffage direct dû aux collisions entre les électrons froids et les électrons « chauds » accélérés par le laser ; un chauffage indirect dû à la dissipation résistive (effet Joule), causée par les ions, du courant de retour porté par les électrons froids, qui neutralise le courant des électrons chauds. Ce dernier chauffage est évidemment très sensible au traitement des collisions élastiques électron-ion. Nous montrons que traiter les ions comme des charges ponctuelles de charge $Z^* \leq Z$ et écrantées par les électrons libres sur la longueur de Debye n'est pas suffisant. En effet, prendre en compte la charge totale (Z) du noyau partiellement écrantée sur la longueur de Thomas-Fermi par les électrons liés [2] conduit à une augmentation notable du taux de collision ion-électron, et donc à un chauffage plus important. En outre, nous étudions l'influence de l'ionisation collisionnelle couplée à l'abaissement du potentiel d'ionisation (IPD) [3,4]. Nous constatons un effet refroidiss ant de l'ionisation, qui est d'autant plus important lorsque l'ionisation est amplifiée par la prise en compte de l'IPD. Des taux d'ionisation proches de $Z^*=7$ sont observés dans notre cas.

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

Références

- [1] E. Lefebvre *et al.*, *Electron and photon production from relativistic laser-plasma interactions*, Nucl. Fusion **43**, 629-633 (2003).
- [2] B. Martinez, Radiative and quantum electrodynamic effects in ultra-relativistic laser-matter interaction, HAL: tel-02079791 (2019).
- [3] D. Tordeux, Modélisation de la physique atomique et du transport radiatif dans un code particle-in-cell, HAL: tel-03653070 (2022).
- [4] G. Ecker and W. Kröll, Lowering of the Ionization Energy for a Plasma in Thermodynamic Equilibrium, Phys. Fluids 6, 62-69 (1963).