

POSTERS

CONTRAINTES RESIDUELLES DE COMPRESSION INDUITES PAR CHOC LASER DANS LES ACIERS A GRADIENT DE PROPRIETES

M. Guerbois^{1,2}, L. Berthe¹, V. Favier¹

¹Laboratoire PIMM CNRS-Arts et Métiers, Paris

²IRT-M2P, Metz

maxime.guerbois@ensam.eu

Parmi les traitements de surface, le grenailage par choc laser ou Laser Shot Peening (LSP), consiste à focaliser un laser impulsif (ns) de haute intensité (GW/cm²) sur la surface pour générer un plasma de haute pression (GPa) [1]. En réaction à sa détente, une onde de choc se propage dans le matériau. Après son passage, le matériau environnant la zone compressée équilibre la matière en produisant un champ résiduel de compression.

Ce traitement de surface améliore les propriétés mécaniques du matériau permettant ainsi de prolonger sa durée de vie en service jusqu'à un ordre de grandeur [2]. Par rapport au grenailage conventionnel, le LSP permet d'atteindre des profondeurs de mise en compression plus importantes (de l'ordre du mm), et de traiter avec précision une zone donnée.

Dans le cas présent, on s'intéresse au LSP sur des aciers à haute limite d'élasticité. Cette limite est de l'ordre de 1.1 GPa avant la cémentation [3].

Pour cette étude, différentes paramétries de choc laser ont été envisagées. On peut constater grâce aux profils de contraintes résiduelles que, pour le recouvrement surfacique de 1800%, le flux de 8GW/cm² permet d'introduire de la compression plus profondément que le flux de 6GW/cm². On constate également que pour les flux de 8GW/cm², en passant d'un recouvrement de 1800% à 3600%, on atteint arrive à maintenir un niveau de compression 500 MPa supérieur au niveau initial, et ce, jusqu'à 1mm sous la surface.

References:

- [1] Y. Sano, N. Mukai, K. Okazaki, and M. Obata, "Residual stress improvement in metal surface irradiation," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. B*, vol. 121, no. I 997, pp. 432–436, 1997.
- [2] S. Prabhakaran, S. Kalainathan, P. Shukla, and V. K. Vasudevan, "Residual stress, phase, microstructure and mechanical property studies of ultrafine bainitic steel through laser shock peening," *Opt. Laser Technol.*, vol. 115, no. October 2018, pp. 447–458, 2019.
- [3] M. Sticchi *et al.*, "A parametric study of laser spot size and coverage on the laser shock peening induced residual stress in thin aluminium samples," *J. Eng.*, vol. 2015, no. 13, pp. 97–105, May 2015.
- [4] D. Ghiglione, C. Leroux, and C. Tournier, "Techniques de l'Ingénieur : Cémentation. Carbonituration," 1994.

Mots clés : Grenailage laser, choc laser, contraintes résiduelles, aciers cémentés, rayons X

Préférence : Poster

Statut de l'auteur inscrit au Forum : Etudiant (Ecole doctorale SMI)

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

Réponse optique de matériaux métalliques sous excitation laser ultracourte à 800 nm

O. UTEZA, T. GENIEYS, M. SENTIS
Aix Marseille Univ, CNRS, LP3, Marseille, France
uteza@lp3.univ-mrs.fr

La robustesse des composants optiques à l'endommagement laser est un point clé du fonctionnement des installations laser ultracourtes de puissance (lasers femtosecondes de classe PW par exemple, [1]), dont l'opération ouvre l'accès à la connaissance de l'optique relativiste et à ses applications (accélération de particules, électrodynamique quantique, micro-photonique et micro-électronique relativiste). De manière complémentaire, les sources laser femtosecondes ont aussi montré leur capacité à induire des interactions à distance, localisées et en volume ou surface de la plupart des matériaux. L'extrême agilité de ces lasers est ainsi une source d'importantes avancées, qui, outre celles précitées, touchent un très grand nombre d'applications industrielles ou de santé, comme par exemple la découpe, la gravure ou la structuration locale de matériaux afin de leur conférer une fonction spécifique (optique/photonique, tribologique, etc.) [2].

Dans ce contexte, nous avons démontré que la transformation en surface d'un matériau diélectrique (ablation/endommagement) en régime ultrabref est facilitée (réduction de la fluence seuil de transformation) par rapport à des durées d'impulsions plus longues [3] et que sa réponse optique transitoire est très largement perturbée par la formation d'un plasma électron-trou de haute densité ($n_e > n_c$, où n_c correspond à la densité critique du plasma créé) [4].

En opposition aux matériaux diélectriques, nous avons aussi montré récemment que réduire la durée d'impulsion jusqu'à une durée de quelques cycles optiques ($\cong 15$ fs) n'induisait aucune fragilité particulière dans le cas de cibles métalliques [5,6]. Afin d'éclairer ce résultat, nous nous intéressons dans ce travail à mesurer la réponse optique de matériaux métalliques (aluminium, cuivre, nickel et tungstène) par des techniques de réflectivité. Afin d'être exhaustif sur une plage importante de fonctionnement, nos expériences impliquent une large excursion en fluence ($0.3 F_{th} - 30 F_{th}$, où F_{th} indique la fluence seuil d'ablation du matériau) et en durée d'impulsion (15 fs – 100 fs). Elles sont appuyées par des développements théoriques et analytiques permettant de mieux comprendre la nature des transformations subies par la densité des états électroniques du matériau sous irradiation et aussi de définir la valeur moyenne d'un paramètre essentiel de l'interaction laser - matière, la fréquence de collision effective des électrons [5,7].

References:

- [1] D.N. Papadopoulos et al., *High Power Laser Science and Engineering*, Vol. 4, e34, (2016).
- [2] L. Jiang et al., *Light: Science & Applications* 7, 17134 (2018).
- [3] B. Chimier et al., *Phys. Rev. B.* 84, 094104 (2011).
- [4] M. Lebugle et al., *J. Appl. Phys.* 116, 063105 (2014).
- [5] T. Genieys, M. Sentis, O. Utéza, *Appl. Phys. A* 126, 263 (2020).
- [6] T. Genieys, M. Sentis, O. Utéza, *Advanced Optical Technology* 9 (3), 131–143 (2020).
- [7] T. Genieys et al., soumis à *Phys. Rev. B.* (2021).

Préférence: poster

Statut de l'auteur inscrit au Forum: chercheur

Effects of Power Density on Laser Paint Stripping from AA 2024 based Substrates for Aeronautical Applications

Selen Unaldi, Laurent Berthe et Emmanuel Richaud
PIMM, ENSAM, CNRS, Paris
selen.unaldi@ensam.eu

Laser stripping is a process which typically includes different forms of ablation phenomena. The presented work investigates a mechanical stripping process using high pressure laser-induced shock waves in a water confined regime. Power density is studied as a parameter for adhesion relations with single layer epoxy targets. A flashlamp-pumped Nd:YAG laser with fixed spot size (4mm) is shot on single layer epoxy on a AA 2024-T3 (Aluminium) substrate. After laser treated samples are investigated with optical microscopy, profilometer and chemical analysis (FTIR). In parallel to the experimental work, a numerical model has been developed to explain the background of the physical mechanisms and to qualitatively evaluate the detailed stress analysis and interfacial failure simulation for a single layer of epoxy on an aluminium substrate. The predicted failure patterns agree with the surfaces of the tested specimens observed by a microscope

Préférence: poster

Statut de l'auteur inscrit au Forum: étudiant - l'Ecole doctorale SMI
(pour les étudiant, merci d'indiquez le nom de votre Ecole Doctorale ou de votre formation)

REFERENCES

- [1] R. Fabbro, J. Fournier, P. Ballard, D. Devaux, J. Virmont, Physical study of laser-produced plasma in confined geometry, *Journal of Applied Physics* 68 (2) (1990)
- [2] S. Pantelakis, T. Kermanidis, G. Haidemenopoulos, Mechanical behavior of 2024 a1 alloy specimen subjected to paint stripping by laserradiation and plasma etching, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 25 (1996) 139–146.
- [3] P. Peyre, L. Berthe, V. Vignal, I. Popa, T. Baudin, Analysis of laser shock waves and resulting surface deformations in an al–cu–li aluminumalloy, *Journal of Physics D: Applied Physics* 45 (33) (2012). doi:10.1088/0022-3727/45/33/335304.

Landau Damping in Nonlocal Electron Transport Regime

A. Chrisment^{1,2*}, P. Loiseau¹, P.-E. Masson-Laborde¹,
J. Mathiaud², Ph. Nicolai², J.-L. Feugeas², V. Tikhonchuk^{2,3}

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

² CELIA, Université de Bordeaux, CNRS, CEA, UMR 5107, F-33405 Talence, France

³ ELI-Beamlines Center, Institute of Physics, Czech Academy of Sciences, 25241 Dolni
Brezany, Czech Republic

*antoine.chrisment@u-bordeaux.fr

In the context of inertial confinement fusion, electron kinetics is involved on hydrodynamic scale in both the under dense and dense regions. However, there are persistent difficulties when connecting microscopic processes and macroscopic evolution. To that purpose, reduced kinetic models have been developed. They aim at providing a kinetic closure to hydrodynamic equations – through current densities and stress viscosity tensor – but also a sufficiently accurate electron distribution function to account for kinetic processes at a microscopic level. Some of those processes may be enhanced or weakened in nonlocal transport conditions. One of them is Landau damping of electron plasma waves. Whereas Del Sorbo *et al* [1], using a reduced kinetic model, observed an instability induced by hot electrons in the downstream zone in case of strong temperature gradient, Rozmus *et al* [2] did not confirm that by numerically solving the full Fokker-Planck kinetic equation. It appears to later authors that this instability is due to the numerical inaccuracy of the reduced kinetic model in [1]. We report on the development of a more accurate reduced kinetic model and apply it to define the onset condition of the microscopic electron plasma wave instability driven by a nonlocal electron heat flux in plasma.

References:

- [1] Del Sorbo, D., et al. "Reduced entropic model for studies of multidimensional nonlocal transport in high-energy-density plasmas." *Physics of Plasmas* 22.8 (2015): 082706.
- [2] Rozmus, W., et al. "Resonance between heat-carrying electrons and Langmuir waves in inertial confinement fusion plasmas." *Physics of Plasmas* 23.1 (2016): 012707.

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

Statut de l'auteur inscrit au Forum: chercheur / post-doc / étudiant
(Ecole doctorale Sciences Physiques et de l'Ingénieur, Université de Bordeaux)

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

Hematite phase diagram under laser shock compression

A. AMOURETTI¹, M. HARMAND¹, A. BOURY¹, F. GUYOT¹, D. KRAUS², O. MATHON³, S. PASCARELLI³, C. PEPIN^{4,5}, K. ROHATSCH², A. SCHUSTER², N. SÉVELIN-RADIGUET³, A. SOLLIER^{4,5}, R. TORCHIO³, M. ZHANG², G. FIQUET¹, A. BENUZZI-MOUNAIX⁶, T. VINCI⁶, B. ALBERTAZZI⁶, M. KOENIG⁶, D. A. CHIN⁷

¹*Institut de Minéralogie de Physique des Matériaux et de Cosmochimie, CNRS, Sorbonne Université, MNHN, Paris, FRANCE*

²*Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Dresden, GERMANY*

³*ESRF, Grenoble, FRANCE*

⁴*CEA-DAM-DIF, Arpajon, FRANCE*

⁵*Université Paris-Saclay, CEA, Laboratoire Matière en Conditions Extrêmes, 91680 Bruyères-le-Châtel, FRANCE*

⁶*LULI, École Polytechnique, CNRS, CEA, UPMC, Palaiseau, FRANCE*

⁷*Laboratory for Laser Energetics, University of Rochester, Rochester, UNITED STATES*

amouretti.alexis@upmc.fr

Until recently, iron oxides were assumed to comprise only FeO, Fe₃O₄, and Fe₂O₃. However, static compression experiments have demonstrated the existence of new iron oxide stoichiometries at high pressure and temperature such as FeO₂ [1], Fe₄O₅ [2], Fe₅O₆ [3]. These discoveries, with the wide variety of iron oxides phases existing at high pressure [4], highlight the complexity of iron-oxygen phase diagram at extreme condition. In this context, measurements of physical properties, phase transition processes and phase diagrams of Fe-O systems with laser shock compression techniques offer opportunities to extend the actual pressure and temperature ranges of such studies. Here, we will present main results from a laser shock experiment at the ID24 ESRF beamline using time-resolved X-ray absorption measurement on Fe₂O₃ samples and result from an experiment performed at LULI 2000 to measure equation of state along the Fe₂O₃ Hugoniot and above 500GPa.

This project has received funding from the European Research Council (ERC) under the European Union's Horizon 2020 research and innovation program (ERC PLANETDIVE grant agreement No 670787).

References:

- [1] Q. Hu and al., "FeO₂ and FeOOH under deep lower-mantle conditions and Earth's oxygen-hydrogen cycles" *Nature*, **534**, 241 – 244, (2016)
- [2] E. Boulard et al., "Ferrous iron under oxygen-rich conditions in the deep mantle" *Geophysical Research Letter*, **46**, 1348 – 1356, (2019)
- [3] B. Lavina et al., "Discovery of the recoverable high-pressure iron oxide Fe₄O₅" *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **108**(42), 17281–5, (2011)
- [4] E. Bykova et al., "Structural complexity of simple Fe₂O₃ at high pressures and temperatures" *Nature communication*, **7**, 10661, (2016)

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

Statut de l'auteur inscrit au Forum: étudiant, ED397

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

Density Functional Theory calculations for high-temperature carbon plasmas

Mandy Bethkenhagen¹, T. Döppner², S. H. Glenzer³, S. Hamel², D. Kraus^{4,5}, J. E. Pask², G. Röpke⁴, M. Schörner, A. Sharma⁶, P. A. Sterne², P. Suryanarayana⁶, B.B.L. Witte^{3,4}, R. Redmer⁴

¹*École Normale Supérieure de Lyon, 46 Allée d'Italie, 69364 Lyon, FRANCE*

²*Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA 94550, USA*

³*SLAC National Accelerator Laboratory, Menlo Park, CA 94025 USA*

⁴*University of Rostock, Institute of Physics, 18051 Rostock, GERMANY*

⁵*Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, 01328 Dresden, GERMANY*

⁶*Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332, USA*

Accurately modeling warm dense matter deep inside astrophysical objects is a grand challenge. The associated thermodynamic states are characterized by solid-state densities, temperatures of thousands of Kelvin, and GPa pressures. The extreme of the conditions can vary gravely depending on the mass, radius, and composition of the studied object ranging from several GPa in planetary mantles to millions of GPa at the center of stellar interiors. A method that has proven highly successful in describing this peculiar state of matter is density functional theory molecular dynamics (DFT-MD). However, while the equations of states and transport properties for giant planets like Jupiter or Neptune became increasingly accessible with DFT-MD simulations in the last two decades, extreme conditions as predicted for the interiors of brown dwarfs and low-mass stars seemed beyond reach.

In this work, we discuss how DFT-MD calculations can be pushed to millions of Kelvin using carbon as an example. At very high densities, traditional DFT-MD codes based on plane-waves can be still used and we present a new ab initio approach to calculate the ionization degree based on the sum rule for the dynamic electrical conductivity [1]. We find a significantly higher carbon ionization degree than predicted by commonly used models, yet validating the qualitative behavior predicted by average atom models. The results are directly used to model the plasma parameters of ongoing experimental campaigns at the National Ignition Facility aiming at recreating the conditions inside brown dwarfs and low-mass stars.

At low densities and high temperatures, however, traditional plane-wave codes become intractable, because the number of partially occupied states increases significantly. This problem is addressed with the novel SQDFT code, which is a large-scale implementation of the Spectral Quadrature (SQ) method for $O(N)$ Kohn-Sham DFT calculations [2,3]. The new capabilities of SQDFT are demonstrated for the Hugoniot curve for carbon up to 10 million Kelvin.

[1] M. Bethkenhagen, B.B.L. Witte, M. Schörner, G. Röpke, T. Döppner, D. Kraus, S. H. Glenzer, P. A. Sterne, R. Redmer, *Physical Review Research* **2**, 023260 (2020).

[2] P. Suryanarayana, P. P. Pratapa, A. Sharma, and J. E. Pask, *Computer Physics Communications* **224**, 288 (2018).

[3] A. Sharma, S. Hamel, M. Bethkenhagen, J. E. Pask, P. Suryanarayana, *Journal of Chemical Physics* **153**, 034112 (2020).

Un modèle de tracé de rayons pour traiter tout type de couplage d'onde

A. Debayle, C. Ruyer, P.-E. Masson-Laborde, P. Loiseau, S. Depierreux and D. Bénisti
CEA, DAM, DIF, F-91297 Arpajon, France
Université Paris-Saclay, CEA, LMCE, 91680 Bruyères-le-Châtel, France
arnaud.debayle@cea.fr

Les expériences dédiées à la fusion par confinement inertiel (FCI), à l'astrophysique de laboratoire ou à l'étude de la matière en condition extrême, nécessitent l'usage de lasers produisant des intensités de l'ordre de 10^{13-15} W/cm² durant plusieurs nanosecondes. La taille millimétrique, voire centimétrique, des plasmas ainsi que les durées d'impulsion imposent l'utilisation de codes hydrodynamiques pour décrire au mieux les différents phénomènes physiques en jeu. La propagation des lasers y est souvent réduite à un simple tracé de rayons résolvant les équations eikonale et de transport du champ. Seul le dépôt d'énergie et la réfraction sont inclus dans ces dernières, au détriment de la diffraction et de la pléthore de couplages entre les ondes électromagnétiques et électrostatiques susceptibles de se développer. Au premier chef, les diffusions Raman et Brillouin, avant, arrière, ou de côté, sont des instabilités déviant les photons dans des directions bien différentes du champ laser incident. A cela s'ajoute l'échange d'énergie par croisement deux à deux des faisceaux laser, un problème central dans les expériences de FCI sur LMJ, NIF, OMEGA et SG III. Cerise sur le gâteau, le couplage des lasers répartis sur un cône peut donner lieu à des diffusions collectives par le biais d'une onde électrostatique ou électromagnétique, commune sur l'axe du cône. Cet inventaire non exhaustif conduit à la nécessaire unification de la modélisation de chaque type de couplage.

Inspiré de la modélisation stochastique des processus collisionnels dans les codes « particle-in-cell », nous avons développé un algorithme Monte-Carlo pour décrire l'échange d'énergie entre ces différentes ondes, compatible avec le tracé de rayon. Le couplage d'onde est simulé avec une méthode de création/annihilation de rayons. Par exemple, un faisceau laser diffusant vers l'arrière sur le mode Brillouin, a une probabilité de perdre un rayon, ce dernier étant recréé dans le faisceau Brillouin associé à ce laser. La distance caractéristique d'échange entre deux ondes, dépend des intensités a priori inconnues des faisceaux. La méthode du point fixe est donc appliquée à l'ensemble des équations de transport des différents faisceaux, avec la prise en compte de tous ces couplages d'ondes [1,2], afin d'obtenir la solution stationnaire pour les intensités. Plus précisément, à condition hydrodynamique figée, le tracé de rayon de l'ensemble des faisceaux est réalisé plusieurs fois jusqu'à convergence vers les solutions recherchées.

References:

- [1] A. Debayle et al., Phys. Plasmas **26**, 092705 (2019)
- [2] A. Debayle et al., to be submitted

Préférence: poster /oral

Statut de l'auteur inscrit au Forum: chercheur

Mesure d'opacité et de densité de feuilles minces et de fils de cuivre

S. Bastiani-Ceccotti

LULI, Ecole Polytechnique, CNRS, CEA, UPMC, 91128 Palaiseau Cedex, France

C. Esnault, F. Gilleron, J.-C. Pain, R. Piron, C. Reverdin

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

T. Blenski, M. Poirier

CEA – Paris-Saclay University, Laboratory « Interactions, Dynamics and Lasers », CE Saclay, F-91191 Gif-sur-Yvette, France

Nous présentons quelques résultats préliminaires obtenus lors d'une campagne expérimentale menée fin 2020 sur l'installation LULI-2000. Son objectif était de caractériser la détente et l'absorption de cibles minces en cuivre, portées à l'état de plasmas dans des conditions homogènes de température et de densité ($T \sim 20$ eV, $\rho \sim 10^{-3}$ g/cc) et proches de l'équilibre thermodynamique local. Dans le schéma expérimental proposé, la cible est d'abord chauffée de manière symétrique par le rayonnement planckien de deux cavités en or irradiées par laser (impulsions de 500 J, 1 ns, 2ω). Le plasma chaud créé est ensuite radiographié par une source X secondaire générée en focalisant sur une feuille en or une impulsion laser de la chaîne COLOC (1 J, 10 ps, ω) ou de la chaîne bleue (20 J, 500 ps, 2ω), avec un retard variant de 1 à 5 ns.

Un spectromètre « à projection de point » [1], placé dans l'axe de radiographie, permet alors de mesurer la détente et l'absorption du plasma. Ce diagnostic utilise un cristal de TIAP courbé dans la configuration de Johann ($R=100$ mm) pour effectuer une imagerie spectrale et spatiale (axe horizontal et vertical, respectivement) du plasma sur un détecteur « Image Plate TR ». La gamme spectrale étudiée est environ 700-1500 eV, avec une résolution de l'ordre de 2 eV. Le champ spatial du détecteur est proche de 500 μm , avec une résolution spatiale approximativement de 30 μm (dimension de la tache focale du backlighter). La durée d'intégration temporelle est de 10 ps (avec la chaîne COLOC) ou de 500 ps (avec la chaîne bleue).

Nous avons d'abord tenté de caractériser des feuilles ultra-minces de cuivre (entre 15 et 60 nm) tamponnées par du carbone (80 nm de part et d'autre). La planéité et l'intégrité de ces feuilles se sont avérées difficiles à maîtriser, rendant les résultats difficilement exploitables. Nous avons ensuite effectué une série de mesures sur des fils de cuivres de 10 à 100 μm de diamètre, beaucoup plus faciles à manipuler. Les résultats obtenus sont très intéressants et prometteurs, bien que plus compliqués à interpréter en raison de la plus grande épaisseur des cibles (gradients) et de leur géométrie (expansion d'un plasma cylindrique).

Références:

[1] T.S. Perry et al., J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer **54**, 317 (1995).

Préférence: poster (résultats toujours en cours d'analyse)

Statut de l'auteur inscrit au Forum: chercheur.

Revisiting laser optical smoothing in weakly-damped plasmas: from spectral dispersion to spectral distribution

A. Fusaro^{1,*}, P. Loiseau^{1,2}, D. Penninckx³, G. Riazuelo¹, and R. Collin¹

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

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

3) CEA, CEASTA, F-33116 Le Barp, France

*adrien.fusaro@cea.fr

In the context of inertial confinement fusion (ICF), it is necessary to mitigate laser-plasma instabilities to improve the laser-energy deposition in order to achieve the conditions required for enabling nuclear fusion. Smoothing by Spectral Dispersion (SSD) has been developed on many facilities world-wide, such as the Laser Mégajoule (LMJ) facility in France, and the National Ignition Facility (NIF) in the USA. It consists usually of a spectral broadening and a frequency dispersion to break spatial and temporal coherences. However, those technics are not sufficient and may produce deleterious effects in the laser chain, leading to the need of new laser smoothing schemes such, as those using large bandwidth laser, like the StarDriver™ laser [1,2] and STUDs [3]. For example, in order to reduce the unwanted conversion of frequency modulation into intensity modulation, it has been shown [4] that it is possible to divide by two the spectral width and distribute it on sub-beams, while maintaining smoothing performance for the reduction of Stimulated Brillouin Scattering (SBS).

In this work, we revisit SSD by pursuing the spectral distribution along several colors. We reduce the total spectrum bandwidth by dividing the total spectrum in k segments distributed in k sub-beams. To study the efficiency of those different configurations, we still consider the SBS reflectivity level and look for a smoothing configuration with the same SBS reflectivity or less than the one obtained with the usual smoothing, but with a smaller spectral width for each sub-beams. We succeed in decreasing the spectral bandwidth up to a monochromatic spectrum leading to the same SBS level, provided that we use as much central frequencies than sub-beams distributed diagonally in the near field. We also show that this configuration allows obtaining a more homogeneous spectrum leading to an even better beam smoothing.

References:

- [1] D. Eimerl, E. M. Campbell, W. F. Krupke, J. Zweiback, W. L. Kruer, J. Marozas, J. Zuegel, J. Myatt, J. Kelly, D. Froula, and R. L. McCrory, “Stardriver: A flexible laser driver for inertial confinement fusion and highenergy density physics,” *J. Fusion Energy* 33, 467 (2014).
- [2] D. Eimerl, S. Skupsky, J. Myatt, and E. M. Campbell, “A stardriver-class laser achieving 1 beam uniformity in 1 ns,” *J. Fusion Energ.* 35, 459 (2016).
- [3] Y. Zhao, S. Weng, M. Chen, J. Zheng, H. Zhuo, C. Ren, Z. Sheng, and J. Zhang, “Effective suppression of parametric instabilities with decoupled broadband lasers in plasma,” *Phys. Plasmas* 24, 112102 (2017).
- [4] M. Duluc, D. Penninckx, P. Loiseau, G. Riazuelo, and E. D’huilières, “Optical smoothing with reduced fm-to-am conversion in high-power lasers using spectral distribution,” *Phys. Rev. Applied* 12, 054055 (2019).

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

Statut de l'auteur inscrit au Forum: post-doc

Collisionless shock formation and particle acceleration in conditions relevant for NIF experiments.

A. Grassi^{1,2}, G. Swadling³, H. Rinderknecht⁴, D. Ryutov³, D. Higginson³, H.S.-Park³, A. Spitkovsky⁵, F. Fiuza²

1. LULI, Sorbonne Université, CNRS, Ecole Polytechnique, CEA, Institut Polytechnique de Paris, F-75252 Paris, France. **2.** High Energy Density Science Division, SLAC National Accelerator Laboratory, Menlo Park, CA, USA. **3.** Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, USA. **4.** Laboratory for Laser Energetics, University of Rochester, Rochester, NY, USA. **5.** Princeton University, Princeton, NJ, USA.

anna.grassi@polytechnique.edu

Collisionless shocks are ubiquitous in astrophysical plasmas and are known to be important in magnetic field amplification and in the acceleration of both high-energy radiating electrons and cosmic rays. Depending on the plasma conditions, different plasma processes are believed to mediate shock formation and particle injection, however, these are not yet fully understood.

Very recently laser-driven high-energy-density (HED) experiments performed at the National Ignition Facility (NIF) [1] have observed for the first time the formation of collisionless shocks mediated by electromagnetic instabilities and nonthermal electron acceleration, opening a path for the detailed study of the physics of shock acceleration in the laboratory. I will present particle-in-cell (PIC) simulations of counter-streaming inhomogeneous plasma flows for the conditions relevant to the NIF experiments. I will show that the inhomogeneous plasma profiles lead to efficient formation of a turbulent shock mediated by the Weibel instability, on shorter time scale than predicted by previous analytical models accounting for the dynamics of homogenous flows. The predicted formation time is in good agreement with recent experimental measurements on NIF. Consistently with experimental measurements, PIC simulations show that electrons can be effectively injected/accelerated to nonthermal relativistic energies via a Fermi-like mechanism occurring within the finite, turbulent shock transition. This energisation mechanism can be relevant for young supernova remnant shocks.

References:

- [1] Fiuza, Swadling, Grassi *et al.* Electron acceleration in laboratory-produced turbulent collisionless shocks. *Nat. Phys.* **16**, 916–920 (2020).

Préférence: oral

Statut de l'auteur inscrit au Forum: MCF

Observation de la dynamique de transport d'énergie dans le cuivre dense et tiède par spectroscopie TR-XANES femtoseconde

A. Grolleau^{1,2*}, F. Dorchies², N. Jourdain^{1,2}, K. Ta Phuoc³, J. Gautier³, P. Renaudin¹,
V. Recoules¹, L. Lecherbourg^{1,3}

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

²CELIA, Univ. Bordeaux, CNRS UMR 5107, CEA, F-33400 Talence, France

³LOA, ENSTA, Ecole Polytechnique, CNRS UMR 7639, F-91761 Palaiseau, France

* email : adrian.grolleau@u-bordeaux.fr

La dynamique de transition de phase ultra-rapide solide-plasma lors de l'interaction laser-matière permet l'étude de la matière dense et tiède (WDM pour *Warm Dense Matter* en anglais). Cet état est caractérisé par des températures de 0,1 à 10 eV environ, et des densités proches de celles du solide. Il se retrouve dans l'astrophysique (noyaux planétaires), et lors de l'interaction laser-matière (FCI, ablation laser). Lorsque ce régime est induit par une interaction laser-matière de durée sub-picoseconde sur un solide froid (fig. a), les électrons peuvent être portés jusqu'à plusieurs dizaines de milliers de Kelvin tandis que le réseau cristallin reste encore à température modérée (fig. b). Le système s'équilibre ensuite en quelques picosecondes (fig. c).

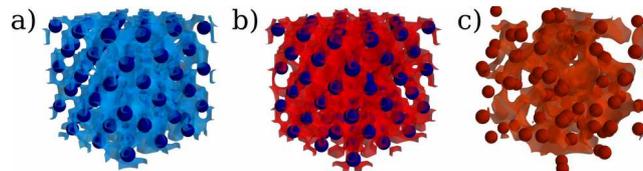


Fig 1 : Les différentes étapes de la transition solide-WDM. Les ions sont représentés par des sphères pleines et les électrons par une iso-densité. Étapes du chauffage : a) Solide froid, b) WDM hors-équilibre, c) WDM équilibre

Nous avons étudié ce régime WDM pour le cuivre lors d'expériences réalisées au LOA, en mesurant la dynamique de la température électronique avec une résolution temporelle inférieure à 100 fs. Pour cela, nous utilisons la structure des spectres d'absorption à des énergies proches des niveaux de transitions électroniques (XANES), qui est modifiée lorsque la matière est chauffée. Un diagnostic a ainsi été développé grâce à des simulations numériques *ab initio* et validé expérimentalement [1] pour déterminer la température électronique. Nous avons ensuite réalisé des expériences pompe-sonde durant lesquelles nous avons mesuré les spectres à différents instants par rapport au chauffage laser, pour suivre l'évolution de leur structure et donc de la température électronique au cours du temps. En induisant un transport de l'énergie dans la matière par conduction thermique plutôt que par les électrons balistiques (d'après les travaux de Chen *et al.* [2]), nous avons réussi à suivre la dynamique de chauffage des électrons durant la première picoseconde après le chauffage laser.

References:

[1] N. Jourdain *et al.*, Phys. Rev. B 97, 075148 (2018)

[2] Chen *et al.*, Phys. Rev. Letters 108, 165001 (2012)

Préférence : oral de préférence, poster sinon

Statut de l'auteur inscrit au Forum : doctorant : EDSPI, Université de Bordeaux

Computational study of ultra-high intensity laser pulse interacting with near-critical density plasmas

I.M. VLADISAVLEVICI^{1,2}, E. D'HUMIERES², D. VIZMAN¹

¹*Faculty of Physics, West University of Timisoara, Bd. V. Parvan, 300023 Timisoara, Romania*

²*Univ. Bordeaux – CNRS – CEA, CELIA, UMR 5107, 33405 Talence, France*

iuliana.vladisavlevici94@e-uvvt.ro

At the interaction between an ultra-high intensity laser pulse ($I \geq 10^{18} \text{W/cm}^2$) with a plasma, the plasma constituents will absorb a significant part of the laser energy and will be accelerated up to relativistic velocities for electrons. The most predominant mechanisms of energy transfer from the laser pulse to the plasma constituents are collisionless in this regime, being done by collective effects in plasma. The laser energy absorption depends on the laser or target parameters. For an obliquely incident laser pulse and sub-relativistic intensities, the most predominant mechanism is the resonant absorption, which can convert up to 60% of the laser energy into electron energy [1]. For the same laser conditions, if the target is overdense, then the dominant absorption mechanism is Brunel absorption [2]. For relativistic intensities and overdense targets, the energy transfer can be driven by the magnetic part of the Lorentz force associated to the laser light, a mechanism known as $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ heating [3], which shows about 10-20% conversion efficiency. During the interaction process, as the electrons are heated and accelerated, the target characteristics are dynamic. The target transparency or opacity depends on the interaction process itself: a slightly overdense target can absorb or reflect the laser energy according to the laser amplitude [4].

Our main goal is to describe and model the energy transfer from laser to particles, in the transparent and opaque regimes of laser-plasma interaction in the ultra-high intensity regime. Through 2D PIC simulations with SMILEI (Simulating Matter Irradiated by Light at Extreme Intensities) [5], we studied the case of an ultra-high intensity laser pulse interacting with a near critical density target. Varying the target density and thickness, we studied the optimal parameters for the maximum conversion efficiency of the laser energy to particles. We propose a model for a near-critical density plasma between $0.5n_c$ and $20n_c$ (where $n_c \approx 1.1 \cdot 10^{21} \text{cm}^{-3}$ is the critical density) driven by a laser pulse of intensity $I = 10^{22} \text{W/cm}^2$. The laser absorption mechanisms determine the characteristics of the accelerated particles. Theoretical modelling of the predominant laser-plasma interaction mechanisms can lead to the optimization of the particle energies and conversion efficiency [6]. The transition from the opaque to the transparent regime can lead to an enhancement of the ion acceleration process [7]. Our studies led to an optimization of the maximum proton energy in the ultra-high intensity regime, which is in good agreement with [8].

References:

- [1] K. G. Estabrook, E. J. Valeo, and W. L. Kruer, *The Physics of Fluids*, 18(9):1151, 1975
- [2] F. Brunel, *Physical Review Letters*, 59(1):52, 1987
- [3] W. L. Kruer and K. Estabrook, *The Physics of Fluids*, 28(1):430, 1985

- [4] E. Lefebvre and G. Bonnaud, Physical Review Letters, 74(11):2002, 1995
- [5] J. Derouillat et al., Comput. Phys. Commun. 222, 351-373 (2018)
- [6] J. Fuchs et al., Nature Physics, 2:48–54, 2006
- [7] R. Mishra, F. Fiuza and S. Glenzer, New Journal of Physics, 20(043047), 2018
- [8] A. V. Brantov, Phys. Rev. ST Accel. Beams 18, 021301 (2015)

Préférence: oral

Statut de l'auteur inscrit au Forum: étudiant Ecole Doctorale SPI – Université de Bordeaux

Laser-Driven Collisionless Shock Acceleration of ions from optically shaped gas jets

J. Bonvalet¹, P. Loiseau³, M. Tarisien⁴, T. Ceccotti⁵, E. d'Humières¹, J. Domange⁴, M. Grech², F. Hannachi⁴, L. Lancia², O. Larroche³, Ph. Nicolai¹, P. Puyuelo-Valdès⁴, L. Romagnani², J.J. Santos¹, V. Tikhonchuk¹, J.-R. Marques²

¹ Univ. Bordeaux-CNRS-CEA, CELIA, UMR5107, Talence, France

² LULI, Sorbone Université, UPMC, Ecole Polytechnique-CNRS-CEA, Paris, France

³ CEA, DAM, DIF, 91297 Arpajon Cedex, France

⁴ Université de Bordeaux, CNRS-IN2P3, CENBG F-33175 Gradignan, France

⁵ CEA-DSM/DRECAM/SPAM, Gif sur Yvette Cedex, France

julien .bonvalet@u-bordeaux.fr

Laser-driven ion acceleration is an attractive way to realize compact and affordable ion sources for many exciting applications including cancer therapy, proton radiography, and inertial confinement fusion. The potential developments depend on the ability of laser facilities to deliver well monitored and reproducible ion beams at high repetition rate. In this context, the use of a gas jet target is a promising way.

When a near critical target is irradiated by a laser pulse, under certain conditions, an electrostatic shock can be launched into the target. These shocks can reflect upstream ions and yield ion beams with quasi-monoenergetic peaks of few MeV[1]. Actually, the ion energy is very limited by losses of laser energy due to non linear phenomena (self channeling and filamentation, in particular) that occur in the ramp density of gas jet.

In this study, we demonstrate the possibility to accelerate ions to higher energies (several tens of MeV) by optimizing the gas jet profile. To achieve this goal, one or two nanosecond laser beams propagating in the low density edge of the density profile are used to shape the gas profile before the main interaction with the ps-laser pulse. Thanks to a numerical chain formed by the hydrodynamic TROLL[2] and Particle-In-Cell SMILEI[3] codes, we analyse and optimize the physical processes of gas profile shaping and proton acceleration. We present the best conditions to obtain several tens of MeV shock accelerated protons and preliminary results from ongoing experiments will be presented.

References:

[1] Fiuza et al Phys. Rev. Lett. 109 215001 (2012)

[2] E. Lefebvre et al., Nucl. Fusion 59, 032010 (2019)

[3] J. Derouillat, A. Beck, F. Pérez, T. Vinci, M. Chiramello, A. Grassi, M. Flé, G. Bouchard, I. Plotnikov, N.Aunai, J. Dargent, C. Riconda, M. Grech, SMILEI, Comput. Phys. Commun. 222, 351-373 (2018)

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

Statut de l'auteur inscrit au Forum: étudiant doctorant (3^e année) Ecole doctorale SPI (Bordeaux – spécialité Astrophysique, Plasma et Nucléaire)

Connaissons-nous vraiment les opacités radiatives ?

J.-C. PAIN^{1,2}, F. GILLERON¹

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

²Laboratoire Matière en Conditions Extrêmes, Université Paris-Saclay,

F-91680 Bruyères-le-Châtel, France

jean-christophe.pain@cea.fr

La connaissance de l'opacité des plasmas chauds est nécessaire pour comprendre le transport de rayonnement dans ces milieux. Cela concerne la physique de la matière à haute densité d'énergie (en astrophysique stellaire [1] ou pour la fusion par confinement inertiel et magnétique), ou encore l'industrie des semi-conducteurs [2]. Dans l'industrie, la connaissance précise de l'opacité de l'étain est importante pour la lithographie dans le domaine ultraviolet extrême pour le développement de nouveaux composants électroniques. En astrophysique, les étoiles variables céphéides sont utilisées comme « bougies » ; leur opacité est importante pour comprendre les relations entre leur périodicité, leur luminosité et leur distance aux autres objets astrophysiques. L'étude du Soleil permet de comprendre les autres étoiles. Pourtant, la structure et l'évolution de ce dernier sont mal comprises. Ces dernières années, un débat sur l'abondance des éléments de numéro atomique $Z \geq 3$ à l'intérieur du Soleil a animé la communauté. Les modèles actuels d'atmosphère solaire [3] conduisent à des abondances plus faibles pour C, N et O par rapport aux modèles utilisés il y a une décennie. Bien que les modèles d'évolution solaire aient progressé, un écart existe toujours entre les prédictions s'appuyant sur les nouvelles abondances et les mesures d'héliosismologie et de flux de neutrinos [4]. Le calcul des opacités constitue un domaine de recherche actif. La plupart des expériences de spectroscopie d'absorption effectuées depuis les années 1990 concerne des plasmas à des températures de quelques dizaines d'eV au maximum. Ces mesures permettent de faire progresser la modélisation [5], et en général l'accord théorie expérience est plutôt satisfaisant. Par contre, à plus haute température, c'est une toute autre histoire [6]... Nous proposons un état des lieux de la connaissance des opacités radiatives, en insistant sur l'apport des expériences et les aspects de la modélisation susceptibles d'être améliorés.

Références:

- [1] A. E. Lynas-Gray et al., Publications of the Astronomical Society of the Pacific **515**, 301 (2018).
- [2] J. Colgan et al., High Energy Density Phys., **23**, 133-137, (2017).
- [3] M. Asplund et al., Annu. Rev. Astron. Astrophys. **47**, 481, (2009).
- [4] S. Turck-Chieze, and S. Couvidat., Rep. Prog. Phys. **74**, 086901, (2011).
- [5] M. Poirier et al., High Energy Density Phys. **33**, 100706 (2019).
- [6] J. E. Bailey et al., Nature **517**, 56-59 (2015).

Préférence: oral ou poster, pas de préférence.

Statut de l'auteur inscrit au Forum: chercheur.

Étude de la génération de perturbations gravitationnelles induites par la lumière de haute intensité

P. LAGEYRE, X. RIBEYRE, E. D'HUMIÈRES

Univ. Bordeaux-CNRS-CEA, Centre Lasers Intenses et Applications, UMR 5107, 33405

Talence, France

paul.lageyre@u-bordeaux.fr

Les ondes gravitationnelles ont été prédites par Einstein 3 ans après qu'il a publié sa théorie de la Relativité Générale [1]. Un siècle plus tard, les interféromètres LIGO [2] et VIRGO ont enfin pu détecter les ondes gravitationnelles provenant de la précession de deux trous noirs. L'existence de ces ondes étant maintenant prouvée, elles doivent être étudiées afin de mieux comprendre la nature de la gravitation, et comment elle affecte la physique.

Cependant, ces observations dépendent des occurrences d'intenses phénomènes astrophysiques. Il serait donc intéressant de pouvoir générer et détecter des ondes gravitationnelles en laboratoire, afin d'avoir une plus grande liberté dans le choix des situations observées. Malheureusement, l'accélération de matière en laboratoire ne semble pas donner de déformation suffisante de l'espace-temps pour pouvoir être détectée.

En partant de l'idée initialement introduite par Tolman en 1931 [4], nous nous penchons sur la génération d'ondes gravitationnelles par seule lumière intense. Cette source alternative pour la génération d'onde gravitationnelles présente certains avantages, dont le fait de se déplacer à la même vitesse que l'onde gravitationnelle, permettant une génération cohérente impossible à obtenir avec de la matière. Les lasers de haute puissance pourraient donc se révéler être des dispositifs de choix dans une expérience de génération, puis de détection d'une déformation gravitationnelle. Cette approche permettrait d'alléger de nombreuses contraintes sur l'observation de phénomènes astrophysiques intenses et améliorer la compréhension actuelle de la relativité générale. Nous proposons de présenter les premiers résultats sur la déformation gravitationnelle engendrée par un cylindre de lumière.

References:

- [1] A. Einstein, *Sitz. Preuss. Akad. Wiss. Berlin* (1918)
- [2] B.P Abbott et al., *Phys. Rev. Lett.* **6** (2016)
- [3] X. Ribeyre, V.T. Tikhonchuk, *WSPC* (2010) E.G. Gelfer et al., *Physics of Plasma* **23** (2016)
- [4] R. Tolman, P. Ehrenfest, B. Podolsky, *Phys. Rev.* **37** (1931)

Préférence: oral

Statut de l'auteur inscrit au Forum: Étudiant (École Doctorale de Bordeaux : Sciences Physiques et de l'Ingénieur)

FORUM ILP 2021

Thème: *Accélération par laser*

Mécanismes de contrôle de la dynamique d'injection et d'accélération des électrons dans une cible plasma sur mesure

Lewis Dickson¹, C.I.D. Underwood², C.D. Murphy², F. Filippi³, N.C. Lopes⁴, Sandrine Dobosz-Dufrénoy⁵, R.J. Shalloo⁶, M.J.V Streeter⁶, Z. Najmudin⁶, J. Björklund Svensson⁷, D. Guénot⁷, K. Svendsen⁷, G. Cantono⁷, A. Persson⁷, O. Lundh⁷, Gilles Maynard¹, Brigitte Cros¹

1 LPGP, CNRS, Université Paris Saclay, Orsay, France

2 York Plasma Institute, Department of Physics, University of York, UK

3 ENEA Casaccia, S. Maria di Galeria, Rome, Italy

4 GoLP/Instituto de Plasmas e Fusao Nuclear, Instituto Superior Tecnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal

5 LIDYL, IRAMIS, CEA, Orme des Merisiers, France

6 The John Adams Institute for Accelerator Science, Imperial College London, UK

7 Department of Physics, Lund University, Sweden

L'accélération laser-plasma permet d'obtenir des gradients accélérateurs de 3 à 4 ordres de grandeur plus élevés que ceux des cavités radiofréquence, et des sources d'électrons compactes avec des durées d'impulsion intrinsèquement courtes et des courants crêtes élevés [1]. La séparation des régimes d'injection et d'accélération des électrons dans les accélérateurs par sillage laser devrait permettre d'améliorer le contrôle, la stabilité et la qualité des faisceaux d'électrons résultants [2]. Ce travail démontre l'optimisation d'un injecteur plasma utilisant la cellule de gaz ELISA [3] dans un régime d'intensité laser intermédiaire ($a_0=2.15$), en utilisant l'injection par ionisation dans un profil de densité de plasma adapté. Des améliorations de la qualité et de l'énergie du faisceau sont obtenues par l'extension de la rampe de descente de densité en accord avec les simulations [4]. Le déplacement du plan focal permet d'optimiser les propriétés des faisceaux d'électrons en termes de charge totale et de pointé. L'effet sur les électrons accélérés de la distribution de l'énergie laser avant le foyer, contrôlée par optique adaptative, a également été pris en compte. Les résultats obtenus montrent que des faisceaux de haute qualité sont produits par le contrôle des paramètres laser et plasma de l'injecteur. Les résultats expérimentaux sont en accord avec des simulations à l'aide du code FBPIC [5] pour une intensité laser, une distribution de phase et une enveloppe temporelle réalistes, permettant des prédictions précises de paramètres difficiles à modéliser, tels que la charge totale et les aspects spatiaux des faisceaux, ouvrant la voie à une modélisation plus précise des résultats expérimentaux par des simulations.

[1] Esarey, E.; Schroeder, C. & Leemans, W., Physics of laser-driven plasma-based electron accelerators, Reviews of modern physics, APS (2008), DOI: 10.1103/RevModPhys.81.1229

[2] P. A. Walker, R. Aßmann, E. Chiodroni, U. Dorda, M. Ferrario, B. Marchetti, A. Specka, R. Walczak, M. Weikum, et al., Facility considerations for a european plasma accelerator infrastructure (eupraxia), in 10th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'19), Melbourne, Australia, 19-24 May 2019 (JACOW Publishing, Geneva, Switzerland, 2019) pp. 3635–3637.

[3] T. L. Audet, P. Lee, G. Maynard, S. Dobosz Dufrénoy, A. Maitrallain, M. Bougeard, P. Monot, B. Cros, Gas cell density characterization for laser wakefield acceleration, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A (2018), <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.01.053>.

[4] P. Lee, G. Maynard, T. Audet, B. Cros, R. Lehe, and J.-L. Vay, Optimization of laser-plasma injector via beam loading effects using ionization-induced injection, *Physical Review Accelerators and Beams* 21, 052802 (2018).

[5] R. Lehe, M. Kirchen, I. A. Andriyash, B. B. Godfrey, and J.-L. Vay, A spectral, quasi-cylindrical and dispersion free particle-in-cell algorithm, *Computer Physics Communications* 203, 66 (2016).



This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 Research and Innovation programme under Grant Agreement No 730871

L'hydrodynamique de LERNA

M. Marciante
CEA-DAM, DIF F-91297 Arpajon, France

Les simulations hydrodynamiques permettent l'étude de phénomènes complexes à l'échelle macroscopique. Cependant, les modèles dont ils sont issus impliquent des hypothèses fortes sur l'état du système microscopique sous-jacent. La condition de faible déviation à l'équilibre thermodynamique notamment [1], induisant les modèles de transport dans le régime linéaire (diffusion, viscosité, etc...), peut s'avérer trop restrictive pour la modélisation de phénomènes pour lesquels les temps de relaxation des états microscopiques deviennent comparables, voire supérieurs, aux temps caractéristiques de l'échelle hydrodynamique [2].

Dans l'optique de prendre en compte de tels phénomènes, parmi lesquels la collision / inter-pénétration de plasmas, ainsi que le phénomène de ségrégation des espèces [3], le code LERNA (Lagrange-remap Entropic Regularized N-fluid Asymptotic-preserving) a été développé depuis un modèle hydrodynamique multi-fluide. Ce code s'appuie sur un schéma de type volumes finis pour les équations d'Euler dans un contexte d'un mélange de fluides miscibles obtenu depuis des travaux antérieurs [4]. Le code couple N systèmes d'équations d'Euler grâce aux termes de relaxation en vitesse et température, tout en préservant les propriétés asymptotiques du modèle physique lorsque les termes de couplage deviennent raides.

References:

- [1] S. Chapman, T. G. Cowling, and D. Burnett, *The Mathematical Theory of Non-uniform Gases: An Account Of The Kinetic Theory Of Viscosity, Thermal Conduction And Diffusion In Gases* (Cambridge University Press,1970)
- [2] H. G. Rinderknecht, P. A. Amendt, S. C. Wilks and G. Collins, *Kinetic physics in ICF: present understanding and future directions*, Plasma Phys. Control. Fusion **60**, 064001 (2018)
- [3] D. Haberberger, A. Shvydky, et al., *Plasma Density Measurements of the Inner Shell Release*, PRL **123**, 235001 (2019)
- [4] F. Duboc, C. Enaux, S. Jaouen, H. Jourden and M. Wolff, *High-order dimensionally split Lagrange-remap schemes for compressible hydrodynamics*, C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. I **348**, 105 (2010)

Premier modèle de dynamique des champs et particules appliqué à l'étude des cibles laser hélicoïdales

M Bardon¹, J G Moreau¹, A Hirsch¹, L Romagnani², C Rousseaux³, L Gremillet^{3,4},
R Nuter⁵, E D'Humières⁵ et V T Tikhonchuk^{5,6}

1 CEA-CESTA, Le Barp F-33114, France

2 LULI, CNRS-Ecole Polytechnique-CEA-Université Paris VI, Palaiseau F-91128, France

3 CEA-DIF, Arpaçon F-91297, France

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

5 CELIA, University of Bordeaux-CNRS-CEA, Talence F-33405, France

6 ELI-Beamlines, Institute of Physics CAS, Dolní Břežany 25241, Czech Republic

matthieu.bardon@protonmail.com

Pour des applications telles que le chauffage protonique isochoire et la production de radio-isotopes ou de neutrons, le faisceau de protons issu du mécanisme de Target Normal Sheath Acceleration (TNSA) [1] présente deux inconvénients majeurs : un angle de divergence relativement important ($\sim 40^\circ$), et une distribution énergétique qui suit une loi de décroissance exponentielle. Pour pallier à cela, différents moyens ont été expérimentés, et nous proposons, dans cette présentation, d'étudier l'un d'entre eux : les cibles hélicoïdales [2, 3].

Le dispositif d'étude est composé d'une hélice conductrice attachée à la face arrière d'une feuille d'Or. Le faisceau laser de haute intensité ($\geq 10^{18}$ W/cm²) est focalisé en face avant, et génère des électrons chauds ainsi qu'un faisceau de protons, en face arrière, issu du processus TNSA. L'éjection de charges a pour effet de produire un intense courant de décharge [4] qui circule le long de l'hélice. Cette propagation génère une impulsion électromagnétique (IEM) qui focalise, post-accélère et « bunch » le faisceau de protons. Le principe de ce schéma de post-accélération a été démontré sur plusieurs expériences laser [2, 3].

Cependant, jusqu'à présent, il n'a pas été possible de générer un spectre ad hoc en vue d'une utilisation pour les applications citées précédemment. Aujourd'hui, le rendement de ce type de schéma n'excède pas 10%. Si l'on souhaite faire progresser cette technique pour tendre vers des distributions énergétiques de protons « idéales », il est nécessaire d'établir un modèle complet, efficace et rapide, des différents mécanismes mis en jeu, afin de pouvoir procéder à une optimisation de la géométrie de ce dispositif. Au cours de cette présentation, nous exposerons les derniers développements d'un modèle, basé sur la théorie des tubes à ondes progressives, permettant de calculer la propagation des champs électromagnétiques à l'intérieur de l'hélice. Nous montrerons comment ces champs appliqués à un pousseur de particules permettent de restituer les spectres de protons observés expérimentalement. Nous présenterons comment ce modèle nous aide à la compréhension des différents phénomènes ainsi qu'à la conception de futurs dispositifs optimisés.

[1] Snavely R A et al, 2000, Phys. Rev. Lett. **85** 2945

[2] Kar S et al, 2016, Nature Commun. **7** 10792

[3] Bardon M et al, 2020, Plasma Phys. Control. Fusion **62** 125019

[4] Bardon M et al, 2020, Phys. Rev. Research **2** 033502

Préférence: oral

Statut de l'auteur inscrit au Forum: Docteur, chercheur au CEA/DAM/CESTA.

Designs d'expériences laser en cavité à basse densité de gaz pour l'ignition sur le Laser Méga Joule

M. Lafon, M. Marciante, S. Laffite et R. Riquier
CEA, DAM, DIF, F-91297 Arpajon, France
marion.lafon@cea.fr

Les travaux d'implosions en Fusion par Confinement Inertiel (FCI) sur le National Ignition Facility (NIF) se sont récemment focalisés sur les paramètres-clés d'optimisation de capsules en plastique (CH) et carbone haute-densité (HDC). Le laser Méga Joule (LMJ) utilisera 40 quads laser dans sa configuration finale. Les contraintes techniques inhérentes à l'installation LMJ imposent des puissances et énergies laser sensiblement plus faibles que sur le NIF ainsi que des lames de phase plus petites. De par ces spécificités, une configuration de design dédiée doit être développée sur le LMJ en vue de l'allumage. Pour cela, des simulations TROLL 2D ont été réalisées afin de guider pour la première fois des designs de cibles en ablateur CH et HDC utilisant une impulsion laser de courte durée et une cavité à basse densité de gaz de remplissage dans la limite des capacités laser du LMJ. Un compromis doit ainsi être trouvé entre la symétrie d'implosion, la propagation des faisceaux à l'intérieur de la cavité et les performances attendues pour ces designs, ce qui demande d'explorer de nombreux paramètres et notamment la forme de la cavité, les caractéristiques de la capsule, la mise en forme de l'impulsion laser, la densité de gaz de remplissage ainsi les pointages laser et la dynamique temporelle de la balance laser. Ces paramètres-clés seront comparés avec ceux obtenus lors de récentes campagnes expérimentales sur le NIF.

Préférence: poster

Statut de l'auteur inscrit au Forum: chercheur

FORUM ILP 2021

Etude de l'influence du profil spatio-temporel de l'impulsion laser sur l'accélération Laser-Plasma d'électrons relativistes

Ioaquin MOULANIER, Lewis DICKSON, Brigitte CROS et Gilles MAYNARD
Laboratoire de Physique des Gaz et des Plasmas, Université Paris-Saclay, CNRS, F-91405 Orsay
Cedex, France

L'Accélération Laser Plasma (ALP)[1] a un large potentiel d'applications en tant que source compacte de faisceaux d'électrons relativistes de très forte intensité. Elle est ainsi étudiée sur de nombreuses installations laser de puissance, de quelques TW à plusieurs PW, notamment sur le plateau de Saclay [1-2]. L'optimisation des performances de ces sources doit pouvoir s'appuyer sur une compréhension fine des corrélations entre les propriétés du faisceau laser et celles du faisceau d'électrons. C'est avec cet objectif que nous étudions ces corrélations en utilisant des données expérimentales de diagnostics réalisés sur le laser 16 TW du Lund Laser Center (LLC) [3] et sur le laser 500 TW d'Apollon en salle longue focale [2]. Le profil spatial du champ laser a été déterminé à partir d'images de fluence autour du plan focal et le profil temporel à partir de diagnostic FROG effectué au LLC. Ces données ont été intégrées dans des simulations numériques quasi-3D de type PIC en utilisant la méthode pseudo-spectrale du code FBPIC [4]. Nous présenterons lors du forum une synthèse des résultats obtenus sur les deux installations pour différentes configurations de cibles. Nous avons en particulier analysé deux types d'injection (avec ou sans injection par ionisation) pour plusieurs valeurs de pression de cibles, d'énergie du laser, de position du plan focal et de profils laser. Les comparaisons des résultats obtenus par simulation numérique utilisant soit un profil laser expérimental soit l'approximation de profils gaussiens montrent qualitativement des similitudes, mais des différences importantes apparaissent au niveau quantitatif. La prise en compte d'un profil spatio-temporel expérimental réaliste pour le laser améliore sensiblement l'accord théorie/expérience sur les caractéristiques du faisceau d'électrons obtenues lors d'expériences d'ALP réalisées au LLC [5].

Nous remercions les équipes du Lund Laser Center et d'Apollon de nous avoir fourni les données de diagnostics laser utilisées dans ce travail.

Références :

- [1] site du GdR Appel www.gdr-appel.fr
- [2] <https://portail.polytechnique.edu/luli/en/cilex>
- [3] <http://www.llc.lu.se/>
- [4] R. Lehe et al., Comp. Phys. Commun. 203, 66 (2016)
- [5] L. Dickson et al, article en préparation.

Préférence : oral

Statut de l'auteur inscrit au Forum : étudiant M2 Grands Instruments - Plasmas Lasers Accélérateurs-Tokamaks

Simulations de dynamique moléculaire pour quantifier l'absorption par bremsstrahlung-inverse de plasmas faiblement couplés.

R. Devriendt¹, S. Baton², O. Poujade^{1,3}

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

2 LULI, Polytechnique, Palaiseau, France

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

olivier.poujade@cea.fr

L'absorption par bremsstrahlung-inverse est le mécanisme dominant d'absorption d'un rayonnement laser par un plasma pour des impulsions laser nanosecondes et des intensités sur cible n'excédant pas 10^{15} W/cm², que l'on rencontre dans le domaine de la fusion par confinement inertiel (FCI). Sa modélisation théorique aboutit à un coefficient d'absorption proportionnel à la fréquence de collision électron-ion, elle-même proportionnelle à un logarithme Coulombien (LC) qui est une manifestation des effets collectifs dans le plasma.

La fréquence de collision électron-ion en l'absence de laser (pour la conduction thermique ou la relaxation Te/Ti) peut être très différente en présence de laser (pour le calcul du bremsstrahlung-inverse) mais on s'attend à ce que les modèles, dans la limite des faibles intensités, donnent les mêmes valeurs. Le logarithme Coulombien est difficile à modéliser théoriquement (avec ou sans laser) ce qui explique la diversité des expressions que l'on trouve dans la littérature [1, 2]. Or, ce choix a des conséquences quantitatives importantes sur les résultats des simulations de plateformes FCI (ou HDE en général) avec des codes d'hydrodynamique-radiative.

La dynamique moléculaire (DM) peut aider à discriminer ces modèles. En l'absence de laser, Brown-Preston-Singleton [3] ont établi à partir des premiers principes, une expression théorique du LC qui est en très bon accord avec des simulations de DM [4]. Nos simulations de DM, en l'absence de laser, reproduisent très bien ces résultats. De plus, nous avons réalisé des simulations de DM en présence de champ électrique variable (pour reproduire l'effet du laser) sur des plasmas faiblement couplés, avec des degrés d'ionisation allant de Z=1 à Z=50, pour des intensités allant de 10^{13} W/cm² à 10^{16} W/cm². Nous décrirons ces simulations de DM et la façon dont il est possible d'en extraire les fréquences de collision électron-ion et les LC. Nous comparerons ces valeurs « expérimentales » (expériences numériques) avec celles des modèles théoriques de la littérature.

References:

[1] S. Skupsky, Phys. Rev. A **36**, 5701 (1987)

[2] A. Y. Polishchuk et J. Meyer-Ter-Vehn, Phys. Rev. E **49**, 663 (1994)

[3] L. S. Brown, D. L. Preston et R. L. Singleton, Phys. Rep. **410**, 237 (2005)

[4] G. Dimonte et J. Daligault, Phys. Rev. Lett. **101**, 135001 (2008)

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

Statut de l'auteur inscrit au Forum: chercheur

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

Fluctuations électrostatiques non-thermiques consécutives à la diffusion Raman stimulée à l'échelle picoseconde

C. ROUSSEAU¹, S. D. BATON², K. GLIZE³, L. LANCIA²
D. BENISTI¹, L. GREMILLET¹

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

²LULI CNRS-CEA-Ecole Polytechnique-Sorbonne Université, F-91128 Palaiseau cedex, France

³Rutherford Appleton Laboratory, Appleton, UK

E-mail: christophe.rousseaux@cea.fr

Au cours d'expériences réalisées sur ELFIE (LULI), la rétrodiffusion Raman stimulée par des lasers picoseconde a été étudiée à l'aide de diagnostics Thomson résolus en temps et en espace, bien adaptés à l'échelle de croissance sub-ps du Raman. En particulier, à l'aide de deux impulsions laser ps séparées spatialement et temporellement, il a été démontré que le seuil et le niveau de saturation du Raman d'une impulsion d'intensité faible peuvent être affectés par une autre impulsion laser, plus forte et focalisée jusqu'à quelques dizaines de microns de la première. Ce couplage a été attribué aux fluctuations électrostatiques à grandes amplitudes générées par les électrons rapides produits lors de l'amortissement des ondes plasma électroniques nonlinéaires excitées par le Raman de l'impulsion forte [1] [2].

Les mesures par diffusion Thomson effectuées au cours d'une expérience récente en monofaisceau cherchent à caractériser ces fluctuations non-thermiques. Des ondes acoustiques ioniques à grandes amplitudes et distinctes de celles générées par la diffusion Brillouin ou bien par d'autres instabilités paramétriques secondaires sont détectées. Leur observation est corrélée à l'apparition du Raman aux temps courts. Leur durée de vie augmente avec l'intensité laser et diminue quand la densité électronique du plasma croît. Par ailleurs, à l'aide d'un système d'imagerie double résolvant le spectre des ondes plasma électroniques le long de la direction du faisceau laser, nous montrons que ces ondes électroniques se développent transversalement à cette direction sur plusieurs dizaines de microns, c'est-à-dire sur une distance plus de quatre fois supérieure au diamètre de la tache focale. Les scénarios possibles et les implications de ces résultats seront discutés [3].

[1] C. Rousseaux, K. Glize, S.D. Baton, L. Lancia, D. Bénisti, L. Gremillet, *Phys. Rev. Lett.* **117**, 015002 (2016).

[2] K. Glize, C. Rousseaux, D. Bénisti, V. Dervieux, L. Gremillet, S.D. Baton, and L. Lancia, *Phys. Plasmas* **24**, 032708 (2017).

[3] Rousseaux, K. Glize, S.D. Baton, L. Lancia, D. Bénisti, L. Gremillet, *49th Annual Anomalous Absorption Conference*, Telluride, CO, June 9-14, 2019 (USA).

Préférence: oral

Statut de l'auteur inscrit au Forum: chercheur au CEA/DAM/DIF

Croissance spatiale de la diffusion Brillouin avant lors de la propagation d'un faisceau de type LMJ

C. Ruyer, A. Debayle, M. Casanova, P.-E. Masson-Laborde, P. Loiseau,
CEA, DAM, DIF, F-91297 Arpajon, France
Université Paris-Saclay, CEA, LMCE, 91680 Bruyères-le-Châtel, France
charles.ruyer@cea.fr

La modélisation de l'interaction laser-plasma mise en jeux lors de la simulation des expériences conduites sur des installations de type NIF, LMJ ou SG-III se concentre généralement sur les différentes rétrodiffusions, le transfert d'énergie par croisement de faisceau ou le dépôt/transport d'énergie. Nous proposons d'étudier ici la diffusion vers l'avant du laser sur les fluctuations acoustiques induites par la force pondéromotrice [1]. L'onde diffusée résultante présente une ouverture angulaire parfois significativement plus grande que l'onde pompe, en mesure d'affecter le chauffage du plasma. Nous nous concentrerons sur la modélisation des différents types de lissage optique utilisés sur les lasers énergétiques afin d'obtenir un meilleur contrôle de la tache focale. Nous montrerons que l'utilisation de lames de phases aléatoires (RPP) déstabilise grandement le plasma vis-à-vis de la diffusion Brillouin avant, bien que celles-ci stabilisent la filamentation du laser [2]. De plus, nous montrerons que le lissage par dispersion spectrale, qui tend à diminuer la cohérence temporelle du faisceau, n'a pas ou peu d'effet sur cette instabilité. Le lissage par double polarisation, quant à lui, stabilise la propagation du laser [3]. Enfin nous illustrerons et appliquerons nos résultats à une expérience d'implosion conduite sur le NIF.

References:

- [1] M. Grech, Thèse « Modifications des propriétés de cohérence des faisceaux laser dans les plasmas de fusion par confinement inertiel » (2007)
- [2] C. Ruyer et al., soumis à Phys. Plasmas
- [3] C. Ruyer et al., in prep

Préférence: poster

Statut de l'auteur inscrit au Forum: chercheur

Sub-ps laser damage resistance of optical coatings for reflective components.

M. STEHLIK, F. WAGNER, L. GALLAIS

Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Marseille, Institut Fresnel, Marseille, France

stehlik@fresnel.fr

Since the early years of laser research, laser damage resistance of optical components has been extensively studied. [1] The research dealing with laser-induced damage threshold (LIDT) remains still very active thanks to the complexity of the involved physical mechanisms and numerous breakthroughs in the field of lasers and their applications. The laser damage studies are important for proper handling of optical components in laser systems [2] and for the research on damage initiation, material processing [3] comprising ablation and laser machining. [4] The emerging scientific fields including nuclear physics [5] or gravitational waves [6] require optical elements that tune the polarization, wavelength, or pulse duration of emitted ultrashort pulses. Key elements that can control the light properties are diffraction gratings. For high power use, a design based on the combination of a planar waveguide and sub-wavelength grating, called grating waveguide structures (GWS), is very promising. [7, 8] Within the MSCA GREAT project [9], an established network of scientific institutions designs, fabricates, characterizes and implements the gratings into laser systems. Our role is to develop and implement robust laser damage metrology to investigate the power handling capabilities of GWS.

To qualify the optical components for use in specific conditions, the influence of pulse duration or energy bandgap on LIDT have been studied. [10] Laser damage studies in nanosecond regime show also the dependence of LIDT on laser beam size due to the presence of defects. [11] However, in sub-picosecond regime the damage threshold is more deterministic (well determinable) [12] and suggests that the damage initiation is given by fundamental intrinsic material properties (energy bandgap, refractive index) rather than by stochastically distributed defects. Thus, the laser damage threshold is expected to be independent on laser beam size which was confirmed in the early studies on this topic. [13] However, there have been published sub-picosecond studies on different materials evidencing dependence of beam size on LIDT. [14, 15] In this work, pure dielectric materials (HfO_2 , Nb_2O_5) were tested by sub-picosecond single shot method to exclude the complexity of cumulative effects and interference phenomenon in a multilayer stack. As a part of the study, a detailed metrology on damage threshold measurement is elaborated.

References:

- [1] M. Soileau, "Laser-Induced Damage Phenomena in Optics: A Historical Overview," in *Laser-Induced Damage in Optical Materials*, D. Ristau, ed., pp. 3-8 (CRC Press, 2014).
- [2] W. Koechner, "Damage of Optical Elements," in *Solid-State Laser Engineering*, vol. 1, pp. 680-701 (Springer New York, NY, 2006).
- [3] D. Bäuerle, "Introduction," in *Laser Processing and Chemistry*, pp. 3-12, (Springer Berlin Heidelberg, 2011).

- [4] R. R. Gattass and E. Mazur, "Femtosecond laser micromachining in transparent materials," *Nature Photonics* 2(4), 219-225 (2008).
- [5] S. Gales et al. "New frontiers in nuclear physics with high-power lasers and brilliant monochromatic gamma beams," *Physics Scripta*, vol. 91(9), p. 093004 (2016).
- [6] A. Bunkowski et al. "Diffractive Optics for Gravitational Wave Detectors," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 32, pp. 333-338 (2006).
- [7] L. Gallais et al. "Investigation of laser damage of grating waveguide structures submitted to sub-picosecond pulses," *Applied Physics B*, vol. 126(4), p. 69 (2020).
- [8] F. Canova et al., "High-efficiency, broad band, high-damage threshold high-index gratings for femtosecond pulse compression," *Opt. Express*, Nov 2007, vol. 15(23), pp. 1532-15334.
- [9] Grating Reflectors Enabled laser Applications and Training (GREAT) Innovative Training Network: <http://itn-great.eu/>
- [10] M. Mero et al., "Scaling laws of femtosecond laser pulse induced breakdown in oxide films" *Physical review B*, vol. 71(11), p. 115109 (2005).
- [11] L. G. DeShazer et al., "Role of coating defects in laser-induced damage to dielectric thin films," *Applied Physics Letters* 23(11), 607-609 (1973)
- [12] L. Emmert and W. Rudolph, "Femtosecond Laser-Induced Damage in Dielectric Materials" in *Laser-Induced Damage in Optical Materials*, D. Ristau, ed., pp. 127-152, CRC Press (2014).
- [13] B.C. Stuart, "Optical ablation by high-power short-pulse lasers," *J. Opt. Soc. Am. B* 13(2), 459-468 (1996).
- [14] N. Sanner et al. "Influence of the beam-focus size on femtosecond laser-induced damage threshold in fused silica," in *Commercial and Biomedical Applications of Ultrafast Lasers VII*, vol. 6881, p. 68810W (San Jose, CA, 2008).
- [15] O. Uteza et al. "Laser-induced damage threshold of sapphire in nanosecond, picosecond and femtosecond regimes," *Applied Surface Science* 254, 799-803 (2007).

Acknowledgements:

This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under the Marie Skłodowska-Curie grant agreement No. 813159.

Préférence: poster

Statut de l'auteur inscrit au Forum: étudiant

Ecole Doctorale: Ecole Doctorale ED 352

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

Simulation expérimentale de l'interaction entre un sursaut X de type I et le disque d'accrétion d'une étoile à neutrons

^{1,2}V.Tranchant, ¹L.Van Box Som, ¹N.Charpentier, ²A.Ciardi, ¹E.Falize
¹CEA-DAM-DIF, F-91297 Arpajon Cedex, France
²LERMA, Sorbonne Université, Paris 06, F-75005, Paris, France
victor.tranchant@cea.fr

La fusion instable de matériel accrété à la surface d'une étoile à neutrons conduit au relâchement bref (quelques secondes) et intense (10^{38} erg.s⁻¹ en moyenne) d'un flux X appelé sursaut X de type I [1]. Il est à présent communément admis que ce flux X interagit avec le disque d'accrétion optiquement épais de l'étoile à neutrons, impliquant des modifications de la structure du disque [2], et donc de son spectre observationnel [3]. Lors du sursaut, on suppose qu'une onde radiative supersonique [4] se forme initialement et parcourt le milieu. La structure interne du disque étant inaccessible à l'observateur, et il est alors nécessaire de recourir à la simulation numérique afin de modéliser la propagation de telles ondes. Des simulations numériques RAMSES-RT [5] de ce phénomène physique seront ainsi présentées.

Les difficultés d'observation rendant la comparaison avec les simulations impossible, il est primordial de pouvoir trouver un moyen de valider ces résultats numériques. Les expériences d'astrophysique de laboratoire utilisent les lasers de puissance. En créant ainsi un intense flux X en laboratoire, il est possible de créer une expérience représentative de la situation astrophysique. Dans un premier temps, les lois d'échelle associées aux ondes radiatives seront appliquées à nos systèmes, permettant de lier mathématiquement l'échelle astrophysique (centaines de km) à l'échelle du laboratoire (quelques mm). Nous verrons que les contraintes associées à ces transformations, que sont la conservation des nombres sans dimension et celle de la physique des matériaux, rend impossible leur application pratique. Alors, dans un second temps, une méthode novatrice basée sur l'étude des symétries de Lie du système et nommée équivalence [6] nous permettra de briser les contraintes établies par la similitude, et ainsi de proposer une toute nouvelle approche pour l'astrophysique de laboratoire. Nous présenterons enfin le nouveau système de laboratoire permettant d'être équivalent au système astrophysique.

References:

- [1] Galloway, D. K., & Keek, L. 2017, arXiv:1712.06227
- [2] Ballantyne, D. R. 2004, MNRAS, 351, 57
- [3] Degenaar N., Ballantyne D. R., Belloni T. et al 2018 SSRv **214** 15
- [4] Marshak, R. E., Phys. Fluids **1**, 24 (1958)
- [5] Rosdahl J. & Teyssier R. 2015, MNRAS, 449, 4380
- [6] Lisle, I. 1992, PhD thesis, University of British Columbia

Préférence: poster

Statut de l'auteur inscrit au Forum: Etudiant à l'ED127

Etude de matériaux polymères comme confineur solide
dans l'application choc laser LSP

Corentin Le Bras (Ensam)

POSTER