

FORUM ILP

26-31 Mars 2023

Village Club du Soleil
Orcières Merlette 1850
Hautes-Alpes



BOOK OF ABSTRACTS

	lun. 27/3	mar. 28/3	mer. 29/3	jeu. 30/3	ven. 31/3
09:00	Ouverture, 08:30 - 08:50	Tutoriel Lafon 08:30 - 09:10	Invité Caillaud, 08:30 - 09:00	Tutoriel Vinci 08:30 - 09:10	Tutoriel Couprie 08:30 - 09:10
	Tutoriel Ciardi 08:50 - 09:30	Tutoriel Hennequin 09:10 - 09:49	Invité Condamine, 09:00 - 09:30	Invité Massimo, 09:10 - 09:40	Invité A. Leblanc, 09:10 - 09:40
10:00	Invité Marques, 09:30 - 10:00	Invité Masse, 09:50 - 10:20	Invité Torchio, 09:30 - 10:00	Oral Barlow, 09:40 - 10:00	Oral Brun, 09:40 - 10:00
	Pause Café, 10:00 - 10:30	Pause Café, 10:20 - 10:50	Pause Café, 10:00 - 10:30	Oral Riquier, 10:00 - 10:20	Pause café, 10:00 - 10:30
11:00	Tutoriel Lecherbourg 10:30 - 11:10	Invité Nicolaï, 10:50 - 11:20	Tutoriel Brygoo 10:30 - 11:10	Pause Café, 10:20 - 10:50	Oral Bardon, 10:30 - 10:50
	Invité Grolleau, 11:10 - 11:40	Oral Viala, 11:20 - 11:40	Invité Bethkenhagen, 11:10 - 11:40	Tutoriel Massacrier 10:50 - 11:30	Oral Hirsch, 10:50 - 11:10
12:00	Oral Stathopoulos, 11:40 - 12:00	Oral Poujade, 11:40 - 12:00	Oral Jaupart, 11:40 - 12:00	Invité Jullien, 11:30 - 12:00	Oral Huber, 11:10 - 11:30
	Oral Ferré, 12:00 - 12:20		Oral Morard, 12:00 - 12:20	Oral Peyrusse, 12:00 - 12:20	Clôture, 11:30 - 11:50
13:00	Repas et pause 12:30 - 16:30	Repas et pause 12:30 - 16:30	Repas et pause 12:30 - 16:30	Repas et pause 12:30 - 16:30	Repas 12:30 - 14:00
14:00		Discussions 14:00 - 16:30	Discussions 14:00 - 16:30	Discussions 14:00 - 16:30	Départ vers les gares, 14:00 - 14:00
15:00					
16:00					
17:00	Pause Café, 16:30 - 17:00	Pause Café, 16:30 - 17:00	Pause Café, 16:30 - 17:00	Pause Café, 16:30 - 17:00	
	Tutoriel Masson-Laborde 17:00 - 17:40	Session Poster 17:00 - 19:00	Invité Brambrink, 17:00 - 17:30	Tutoriel Albertazzi 17:00 - 17:40	
18:00	Invité Hermann, 17:40 - 18:10		Invité Meuren, 17:30 - 18:00	Oral Caizergues, 17:40 - 18:00	
	Oral Fusaro, 18:10 - 18:30		Oral Mollica, 18:00 - 18:20	Oral Veauvy, 18:00 - 18:20	
	Oral Liotard, 18:30 - 18:50		Oral Niasse, 18:20 - 18:40		
19:00					
20:00					
21:00			Buffon 21:00 - 22:00		

FORUM ILP

26-31 Mars 2023

Village Club du Soleil
Orcières Merlette 1850
Hautes-Alpes



TUTORIELS

Magnetized laser produced plasma: A new vision on energetic phenomena of the Universe

B. Albertazzi

Laboratoire LULI – CNRS, Ecole Polytechnique, CEA

Ces dernières années ont été marquées par un intérêt croissant à reproduire des phénomènes astrophysiques en laboratoire, inaccessibles par des méthodes conventionnelles (observations astronomiques, simulations numériques) [1]. Les lasers de très haute puissance permettent, en particulier, de recréer des plasmas similaires aux plasmas astrophysiques moyennant des lois d'échelles qui permettent de vérifier que deux systèmes physiques d'échelles différentes peuvent se comparer [2]. Cependant, de nombreux systèmes astrophysiques sont immergés dans un champ magnétique (de l'ordre de 0,1 nT dans le milieu interstellaire, ~ 1 T dans les taches solaires et supérieur à 10 000 T autour des étoiles à neutrons par exemple). Il est donc nécessaire de pouvoir ajouter un champ magnétique en expérience également. Ainsi depuis quelques années maintenant, il est possible de magnétiser des plasmas produits par laser [3] afin d'étudier la microphysique sous-jacente permettant de comprendre et prédire l'évolution de tels systèmes.

Après une introduction rapide sur les effets que le champ magnétique peut avoir sur les plasmas, je présenterai différentes expériences intégrant un plasma produit par laser et un champ magnétique externe pour étudier des systèmes astrophysiques spécifiques (i) collimation de jet protostellaire issus d'étoiles jeunes [4], (ii) dynamique et structure d'un choc retour dans le contexte de variables cataclysmiques de types POLAR [5], (iii) instabilité de type Rayleigh Taylor en présence de champ magnétique afin d'étudier la nébuleuse du crabe [6] et (iv) la propagation d'un remanent de Supernovae en présence de champ B [7]. Enfin j'évoquerai rapidement la plateforme de champ B que l'on développe sur le XFEL de SACLA.

REFERENCES

-
- [1] B. Remington, R. P. Drake, D. D. Ryutov, Rev. Mod. Phys. 78, 755 (2006)
 - [2] D. D. Ryutov et al., Astrophys. J. 518, 821 (1999) ; D. D. Ryutov et al., ApJ Suppl. 127, 465 (2000) ; D. D. Ryutov, Physics of Plasmas 25, 100501 (2018)
 - [3] B. Albertazzi et al., Rev. Sci. Instrum. 84, 043505 (2013)
 - [4] B. Albertazzi et al., Science 346, 325 (2014)
 - [5] B. Albertazzi et al. HPLSE 6, e43 (2018) ; P. Mabey et al., Sci. Rep. 9, 8157 (2019)
 - [6] M. Manuel et al., Matter and Radiation at Extremes 6, 026904 (2021)
 - [7] P. Mabey et al., Astrophys. J. 896, 167 (2020)

Exploration expérimentale de la matière dense et chaude

Stéphanie Brygoo *et al.*

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

Le domaine de la matière dense et tiède (Warm Dense Matter ou WDM), situé dans le plan densité-température autour de quelques eV et en dessous de la densité du solide apparaît comme une zone critique où les théories dites standards, de la physique de la matière condensée et de la physique statistique des plasmas ne sont plus valides. Typiquement on rencontre ce régime thermodynamique en laboratoire lors d'expériences qui démarrent avec un matériau solide et finissent en plasma (plasma de FCI par exemple) ainsi qu'en astrophysique à l'intérieur des planètes géantes et des étoiles denses et froides. Apporter des données expérimentales quasi inexistantes dans cette région est indispensable pour contraindre les théories. Différentes techniques expérimentales basées sur l'utilisation de laser de puissance existent comme les chocs laser simples, doubles chocs, chocs sur cibles précomprimées, compression isentropique, multichocs,... Chaque approche sera présentée ainsi que les avancées mises en avant par chacune.

Challenges and Opportunities in Laboratory Astrophysics with High-Power Lasers

Andrea Ciardi

Sorbonne Université, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, LERMA,
Paris, France

The extreme states of matter generated by high-power lasers are an ideal playground to study astrophysical phenomena in the laboratory. Over the last decade these experiments have been probing the physics of collisionless shocks and the acceleration of particles, the interplay between radiation and matter in accretion shocks, the collimation of stellar jets, the equation of state for planetary interiors, as well fundamental phenomena, such as magnetic reconnection or plasma micro-instabilities. In this tutorial talk, I will present the motivation and basic ideas behind laboratory astrophysics on high-power lasers, discuss the current limitations, and the challenges and opportunities that lie ahead.

Free Electron Laser overview

M. E. Couprie¹.

¹ Synchrotron SOLEIL

Free Electron Lasers (FEL) are high power tunable laser sources covering from far infrared to X rays. The process relies on an elegant and simple gain medium, with relativistic electrons in the periodic permanent magnetic field created by an undulator. The interaction between the emitted radiation and the wiggling electrons leads to bunching enabling to set in phase the electrons. After reporting the FEL origins, the FEL process is described. The FEL development from the oscillators to the present panorama of X ray FELs is then presented. Recent prospects offered by laser plasma accelerators driven FELs are open.

La fusion par confinement inertiel de l'implosion à l'ignition

Marion Lafon, S. Laffite, et L. Masse

CEA DAM-DIF, 91297 ArpaJon, France

La Fusion par confinement inertiel (FCI) consiste à imploser une capsule remplie de matériau fusible et la mettre en vitesse afin que l'inertie de la coquille comprime le fusible jusqu'à atteindre des conditions de température et de densité permettant aux réactions de fusion d'entretenir la combustion du matériau. Ces conditions peuvent être atteintes en implosant la coquille par un rayonnement très intense, soit en irradiant directement la capsule par des lasers de haute puissance (schéma d'attaque directe), soit en transférant indirectement l'énergie à la capsule par rayonnement X via une cavité de conversion laser (schéma d'attaque indirecte).

Lors de cet exposé, les concepts généraux de la FCI (implosion, compression, chauffage, allumage, gain) et le principe de confinement seront détaillés. Les principales problématiques de la physique des plasmas qui lui sont associées seront présentées (hydrodynamique des plasmas créés par laser, interaction laser-plasma, instabilités hydrodynamiques, etc). Les difficultés et les enjeux majeurs pour la réalisation de ce type d'expériences seront illustrés par les résultats expérimentaux obtenus dans ce domaine.

Le régime d'ignition est un grand challenge scientifique qui consiste à porter une partie du fusible jusqu'aux conditions nécessaires à l'obtention d'un bilan d'énergie positif au cœur de la capsule. Ce régime a très récemment été atteint sur l'installation laser NIF (National Ignition Facility) en Californie après plus de douze ans d'expérimentation FCI. Nous présenterons ici les récents résultats expérimentaux du NIF mettant en lumière les grandes avancées ayant permis d'obtenir l'ignition. Enfin, nous présenterons les campagnes expérimentales actuellement en cours sur le LMJ (Laser Mega Joule) et nous discuterons des différents enjeux et difficultés de l'expérimentation FCI sur cette installation.

X-ray Absorption Spectroscopy: a tool to study ultrafast transitions from solid to plasma

L. Lecherbourg^{1,2}

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

² Univ. Paris-Saclay, CEA, LMCE, 91680 Bruyères-le-Châtel, France

X-rays allow us to probe dense matter at the atomic scale. To probe the electronic states, one can use X-ray Absorption Spectroscopy techniques. It gives information at the microscopic level, which is used to calculate macroscopic coefficients, such as the electronic heat capacity, the electronic conductivities, the electron-ion coupling parameter, the opacity/emissivity, etc. The knowledge of these coefficients are of paramount importance to simulate the evolution of larger systems, such as Inertial Confinement Fusion experiments, astrophysical objects, and also to optimize laser industrial processes.

Ultrafast High Intensity lasers are used to produce different dense plasma conditions, from the Warm Dense Matter regime to stellar-like plasmas. These plasmas are highly transient, and last a tenth of a picosecond. Spectroscopy techniques need to be developed to improve the time resolution.

In this presentation, I will present XAS technics to interpret X-ray spectra [1,2]; different X-ray sources from picosecond [3] to femtosecond time resolutions [4]; and a few studies in the dense plasma regime, at high and moderate temperatures [5,6,7].

References

- [1] Jourdain N *et al.*, Physical Review B **101**, 2020.
- [2] Poujade O *et al.*, Phys. Plasmas **28**, 2021.
- [3] Dorchies F *et al.*, Physical Review E **98**, 2018.
- [4] Mahieu B *et al.*, Nature Communications **9**, 2018.
- [5] Grolleau A *et al.*, Physical Review Letters **127**, 2021.
- [6] Jourdain N *et al.*, Physical Review Letters **126**, 2021.
- [7] Jourdain N *et al.*, Physical Review B **97**, 2018.

Physique atomique des plasmas

Gérard Massacrier

CRAL-Observatoire de Lyon

La physique atomique est une des briques fondamentales pour la description et la compréhension des plasmas. Structure atomique, transitions radiatives, taux de collision, forment le socle sur lequel sont basés leurs diagnostics par spectroscopie (intensité et profil des raies traditionnellement, mais aussi plus récemment, par exemple, diffusion Thompson...). Un calcul correct de la structure atomique est aussi essentiel à la thermodynamique et aux grandeurs qui en découlent ( nergie, pression...), elles-mêmes ingrédients de base des modélisations hydrodynamiques. Enfin, diverses propriétés de transport (opacité, conductivité électrique...) découlent directement de calculs atomiques. Ce tutoriel essaiera de donner une vue générale et accessible de cette thématique, avec ses points durs et les manières de les contourner. Les récents progrès expérimentaux dans le domaine des plasmas denses, et les questionnements qu'ils engendrent sur la validité des approches standards, seront aussi discutés.

Instabilités laser-plasma dans les plasmas de fusion par confinement inertiel

P.-E. Masson-Laborde^{1,2}

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

² Université Paris-Saclay, CEA, Laboratoire Matière en Conditions Extrêmes, 91680 Bruyères-le-Châtel, France

Dans toutes expériences de physique des hautes densités d'énergies avec des lasers, et dès lors qu'un faisceau laser va se propager dans un plasma, la problématique du couplage laser-plasma va se poser. Dans les expériences de Fusion par Confinement Inertiel (FCI), que ce soit dans le schéma d'attaque directe ou indirecte, ce couplage va conduire à des mécanismes délétères: les instabilités paramétriques qui résultent du couplage entre le laser et les ondes du plasma. Parmi celles-ci se trouvent en particulier les instabilités de diffusion arrière Brillouin et Raman responsables à la fois d'une perte d'énergie mais pouvant aussi représenter un risque pour l'installation laser. Le croisement de faisceaux qui se fait par une onde plasma médiatrice, ainsi que les mécanismes de diffusion vers l'avant nuisent à la bonne propagation des faisceaux et à un dépôt d'énergie maîtrisé.

Nous présenterons dans cet exposé un état de l'art des différents mécanismes physiques en jeu lors de ce couplage laser-plasma, en présentant les différentes instabilités possibles et rencontrées en FCI, et en discutant leurs croissances et saturations. Autour d'expériences menées sur des grandes installations comme le laser Omega à Rochester, le NIF (National Ignition Facility) en Californie et sur le Laser MegaJoule (LMJ) à Bordeaux, nous discuterons les difficultés inhérentes à leurs modélisations dans les codes utilisés pour le dimensionnement des expériences d'implosion ainsi que les principaux résultats expérimentaux obtenus par la communauté ayant permis d'améliorer notre compréhension de ces mécanismes. Enfin nous discuterons des possibilités actuelles de réduction de ces effets dans le cadre d'un conditionnement soit du laser par les mécanismes de lissage optique, soit de la cible par un choix adéquat du plasma et donc des matériaux utilisés.

Simulation codes for laser plasma interaction

Tommaso Vinci¹

¹ LULI - Ecole Polytechnique

This will be an introductory/review talk over various type of simulation codes.

After a short introduction of the phenomenon and the high energy density domain, I will present the different approaches and applicable domains of different numerical schemes.

Three big domains will be investigated:

- Microphysics: Molecular Dynamics, Quantum Molecular Dynamics, atomic physics.
- Kinetic: mostly Particle in Cell
- Fluid hydrodynamic

To explain better, I will present the following 2 types of codes in under 100 lines of python:

- kinetic particle in cell code to illustrate a simple two-stream instability simulation
- hydrodynamic code with laser deposition for a perfect gas

Along with the code description I will present the various approximations done by these codes highlighting the strength and weakness of each approach. Along with this I will highlight the current status of the codes used in the community to help guide students and researchers.

FORUM ILP

26-31 Mars 2023

Village Club du Soleil
Orcières Merlette 1850
Hautes-Alpes



INVITÉS

Exploring the deep interior of giant planets with atomistic simulations

M. Bethkenhagen¹, F. Coppari², S. Hamel², M. Millot², C. Pickard^{3,4}, A. Reinhardt, B. Cheng¹

¹ Institute of Science and Technology Austria, Am Campus 1, 3400 Klosterneuburg, Austria

² Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA 94551, USA

³ Department of Materials Science, Metallurgy, University of Cambridge, Cambridge, UK

⁴ Advanced Institute for Materials Research, Tohoku University, Sendai, Japan

About two thirds of known exoplanets are classified as super-Earths and mini-Neptunes due to their similar size compared to their Solar System cousins. To date, it remains unclear if similar-sized exoplanets share a complementary composition of their interiors. Insights from atomic scale simulations are therefore key in moving forward. This presentation provides an overview of the recent advances made in the study of ice-rich giant planets such as Uranus and Neptune by investigating high-pressure phases of water and carbon hydrates. Accurate equation of state data, phase diagrams, and transport properties such as electrical conductivity are obtained by combining density functional theory, machine learning potentials and insights from high-pressure experiments, which can provide useful insights for planetary modeling.

References

- [1] B. Cheng, M. Bethkenhagen, C. J. Pickard, S. Hamel, *Nature Physics* **17**, 1228 (2021).
- [2] A. Reinhardt, M. Bethkenhagen, F. Coppari, M. Millot, S. Hamel, B. Cheng, *Nature Communications* **13**, 4707 (2022).
- [3] B. Cheng, S. Hamel, M. Bethkenhagen, *Nature Communications* (in print), arXiv:2207.02927.

The HED instrument at the European XFEL: Unique capabilities to study material properties of laser-compressed matter

E. Brambrink¹, K. Appel¹, C. Baehtz², S.Di Dio Cafiso², T. Feldmann¹, S. Göde¹, M. Hassan², H. Höppner², R. Husband³, Z. Konopkova¹, M. Makita¹, E. Martens¹, Masruri², M. Nakatsutsumi¹, A. Pelka², T. Preston¹, A. Schmidt¹, J.-P. Schwinkendorf², C. Strohm³, K. Sukharnikov¹, M. Tang³, M. Toncian², T. Toncian², U. Zastra¹

¹ European XFEL Holzkoppel 4, 22869 Schenefeld, Germany

² Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Bautzner Landstraße 400, 01328 Dresden, Germany

³ DESY, Notkestraße 85, 22607 Hamburg, Germany

The HED instrument at the European XFEL offers unique capabilities to study extreme states of matter, delivering X-ray bursts with up to 2 mJ of pulse energy, fs pulse duration and photon energies up to 25 keV. This allows in-situ studies of highly transient states using various x-ray diagnostics such as diffraction, scattering and imaging. The two recently installed laser drivers are a 400 TW/25 fs short pulse laser RELAX and a 100J/ns laser DIPOLE-100X, both capable running at 10 Hz enabling high repetition rate experiments for experiments requiring signal integration due to low scattering cross sections. The combination of these laser drivers with the intense x-ray source allows studying matter at extreme pressures, transformation at high deformation rates, high field physics and warm dense matter.

Targets and plasma diagnostics experimental systems at the Laser MegaJoule (LMJ)

Tony Caillaud

CEA, CESTA, F-33116 Le Barp, France

Le Laser MégaJoule (LMJ) dispose à présent de 10 chaînes laser i.e. 80 faisceaux (300 kJ à 351 nm) qui peuvent être focalisés sur cible. La capacité opérationnelle du LMJ va encore augmenter graduellement durant les prochaines années pour atteindre 1.4 MJ avec 176 faisceaux. Dans un même temps, la dimension et la complexité des expériences réalisées s'accroissent tout comme les édifices cibles mis en œuvre. Également, de nouveaux moyens sont déployés ou en cours de déploiement pour permettre d'augmenter les capacités du sous-système d'expérience autour de la chambre d'expérience (systèmes d'insertions, porte-cible cryogénique, jet de gaz, etc.). A présent, un grand nombre de diagnostics plasmas (près de 20) sont installés sur le LMJ afin d'étudier l'interaction laser plasma dans de nombreux domaines tels que des imageurs X, des spectromètres X, des diagnostics de bilan d'énergie, de vélocimétrie, des diagnostics particuliers et des diagnostics nucléaires. Ces nouveaux systèmes de mesure permettent d'améliorer grandement la détermination des paramètres de l'interaction et ainsi de contraindre les simulations. Associé au laser PETAL, cet ensemble permet de disposer d'un outil exceptionnel régulièrement mis à disposition de la communauté scientifique nationale et internationale. Nous présenterons l'état d'avancement des développements menés par le CEA sur l'installation LMJ-PETAL dans le cadre du projet simulation et les performances associées.

High-energy density laser matter interaction at ELI Beamlines

F.P. Condamine¹

¹ Extreme Light Infrastructure ERIC, ELI Beamlines Facility, Za Radnici 835, 252 41 Dolni Brezany, Czech Republic

ELI Beamlines (part of the ELI European Research Infrastructure Consortium), located near Prague, is a new high-energy and high-intensity laser facility that will become available for users from mid-2023. The hall dedicated to plasma physics research has access to different beams covering all aspects of state-of-the-art research in this field of science.

The L4-ATON laser, will reach the 10 PW level (1.5 kJ, 150 fs), while its non-compressed version (L4n) already delivers >500 J pulses (1 to 10 ns pulse duration) at the unprecedented rate of 1 shot every 3 minutes. The L3-HAPLS laser, already commissioned to the 0.5 PW level (12 J, 27 fs, 3.3 Hz) will be upgraded to the 1 PW level by mid-2024.

Used as single beam or in combination between each other, these 2 lasers will allow a much faster and efficient data collection for users in plasma physics. This will be particularly the case for ns-kJ HEDP research which rely most of the time on very low repetition facilities (1 shot every hour or more).

In this talk, we show an overview of the equipment that will be available for the first user experiments as well as the laser parameters.

Étude de la matière dense et tiède hors-équilibre à l'échelle femtoseconde avec une source X bétatron

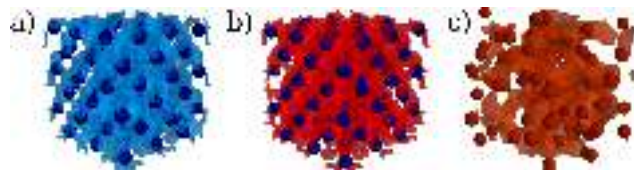
A. Grolleau¹, F. Dorchies², S. Briand^{1,2}, K. Ta Phuoc³, J. Gautier³,
P. Renaudin¹, V. Recoules¹, L. Lecherbourg^{1,3}

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

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

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

L'étude de la transition de phase ultra-rapide solide-plasma lors de l'interaction laser-matière (FCI, ablation laser) implique le passage par le domaine de la matière dense et tiède (WDM pour *Warm Dense Matter*). Cet état est caractérisé par des températures d'environ 0,1 à 10 eV, et des densités proches du solide. Il se retrouve également en astrophysique (noyaux planétaires). Lorsque ce régime est induit par une impulsion laser sub-picoseconde sur un solide froid (a), les électrons de valence peuvent être portés jusqu'à plusieurs eV tandis que le réseau cristallin reste à une température modérée (b), typiquement inférieure à la température de fusion. Le système électrons-réseau s'équilibre ensuite en quelques picosecondes (c).



Nous avons étudié ce régime WDM hors-équilibre dans le cas du cuivre, grâce à la source X bétatron du LOA [1]. Pour cela, nous utilisons la structure des spectres d'absorption des rayons X près des seuils (XANES, *X-ray Absorption Near Edge Structure*), qui est modifiée en fonction des conditions thermodynamiques et de la structure atomique. Un diagnostic a ainsi été développé grâce à des simulations numériques ab initio et validé expérimentalement pour le cuivre, pour déterminer sa température électronique [2]. Nous avons alors réalisé une expérience pompe-sonde au cours de laquelle nous avons mesuré le spectre XANES d'un échantillon de cuivre à différents instants par rapport au chauffage laser. Cela nous a permis de suivre l'évolution de la température électronique de l'échantillon, et donc la dynamique de chauffage des électrons, durant la première picoseconde avec une résolution inférieure à 100 fs grâce à la source X bétatron [3]. Nous avons ainsi observé qu'au delà d'un flux absorbé limite établi par Chen *et al.* [4], le transport de l'énergie électronique au sein du cuivre n'était plus caractéristique des électrons balistiques, mais plutôt de la diffusion thermique plus lente.

References

- [1] B. Mahieu *et al.*, Nature Comm., vol. 9, no. 1 (2018).
- [2] N. Jourdain *et al.*, Phys. Rev. B 97, 075148 (2018)
- [3] A. Grolleau *et al.*, Phys. Rev. Letters 127, 275901 (2021)
- [4] Chen *et al.*, Phys. Rev. Letters 108, 165001 (2012)

Le plasma laser : une source de rayonnement singulière

Jörg Hermann¹, Christoph Gerhard², Milos Burger³, Valentin Craciun⁴,
Olivier Peyrusse¹, Frédéric Pelascini⁵

¹ Aix-Marseille University, CNRS, LP3, 13288 Marseille, France

² University of Applied Sciences and Arts, Faculty of Engineering and Health, 37085
Göttingen, Germany

³ University of Michigan, Gérard Mourou Center for Ultrafast Optical Science, Ann Arbor,
MI 48109, USA

⁴ National Institute for Laser, Plasma and Radiation Physics, 77125 Magurele, Romania

⁵ Cetim Grand Est, 67400 Illkirch-Graffenstaden, France

Dans l'histoire des technologies de plasma, les plasmas induits par laser apparaissent plus tard que leurs équivalents générés par décharges électriques. Au début, la génération des plasmas par laser en régime d'intensité modérée a été motivée principalement par l'étude des phénomènes d'interaction laser-matière et par l'application à des mesures analytiques. L'intérêt du plasma laser comme source de rayonnement pour la spectroscopie a été freiné par la faible reproductibilité des expériences due à la mauvaise stabilité des sources laser disponibles. De plus, la petite taille et la dynamique d'expansion rapide rendaient les observations spectroscopiques difficiles. Les progrès technologiques ont dramatiquement amélioré la situation. Des lasers déclenchés ont permis de générer des plasmas hautement reproductibles et des détecteurs rapides ont rendu les mesures spectroscopiques résolues en temps possibles. La faible taille du plasma devient alors un avantage, car elle limite l'effet d'auto-absorption. Plus récemment, il a été montré que le plasma produit par ablation laser peut présenter une source de radiation singulière qui combine deux propriétés que ne l'on trouve habituellement pas ensemble : le plasma est en équilibre thermodynamique local et spatialement uniforme [1]. La combinaison des deux propriétés définit une source de rayonnement idéale car elle permet une modélisation simple et précise du spectre d'émission. Cela ouvre des perspectives dans les domaines de la spectroscopie de plasma et des mesures analytiques, car le diagnostic précis du plasma est possible sans la nécessité d'observations spectroscopiques résolues spatialement. L'objectif de cette présentation est d'illustrer les propriétés de ce plasma, et de discuter le diagnostic précis via la modélisation du spectre d'émission. En outre, les perspectives en termes d'applications seront établies pour la mesure de données spectroscopiques et pour l'analyse des matériaux [2].

References

- [1] J. Hermann, D. Grojo, E. Axente, C. Gerhard, M. Burger, V. Craciun, Ideal radiation source for plasma spectroscopy generated by laser ablation, *Phys. Rev. E* 96, 053210 (2017)
- [2] J. Hermann, C. Gerhard, M. Burger, V. Craciun, F. Pelascini, Progress in calibration-free laser-induced breakdown spectroscopy, *Spectrochim. Acta Part B: Atom. Spectrosc.* 200, 106595 (2023)

Les expériences de spectroscopie X, des diagnostics pour l'astrophysique

Manuel Jullien

CEA/DAM

Depuis le lancement des missions Chandra et XMM-Newton, l'étude des plasmas chauds astrophysiques s'appuie sur une analyse détaillée de leur spectre, en émission ou en absorption. Le domaine X, très riche en raies issues de matériaux allant du carbone (en couche K) au nickel (en couche M), est ainsi particulièrement intéressant comme outil de diagnostic (1). Cependant, si la restitution de ces structures par un modèle spectroscopique renseigne sur les conditions du plasma, il s'agit d'une analyse complexe, reposant sur de nombreuses hypothèses qui n'ont pas été vérifiées ni validées par des mesures en laboratoire. De plus, en raison du foisonnement de transitions atomiques, il est parfois difficile de distinguer leur signature sur ce domaine spectral. La force du diagnostic spectroscopique est ainsi limitée par la résolution instrumentale. Avec une résolution de 2,5 eV entre 0,2 et 7 keV, le détecteur embarqué sur la mission Athena devrait permettre de distinguer autrement plus de contributions individuelles et apporter de précieuses informations sur l'état du plasma.

Les expériences d'astrophysique de laboratoire présentent donc un double intérêt pour la spectroscopie X : elles permettent de tester les approximations sous-jacentes aux modèles ainsi que de disposer de données atomiques, telles que les opacités, aussi précises que l'exigent ces nouveaux besoins. Je présenterais une analyse des spectres mesurés au cours de deux campagnes expérimentales particulièrement bien instrumentées (2, 3), qui ont eu lieu sur la machine Z de la Sandia. La première remet en question le calcul des opacités du fer au-delà d'une certaine gamme de température et de densité, tandis que la seconde a permis de réfuter une hypothèse invoquée pour interpréter les spectres d'émission des disques d'accrétion autour de certains trous noirs.

References

- (1) P.Beiersdorfer. Laboratory Astrophysics. *Ann.Rev.Astrophys*, 41 :343-90, 2003.
- (2) J.Bailey et al. A higher-than-predicted measurement of iron opacity at solar interior temperatures. *Nature*, 517 :56-59, 2015.
- (3) G.Loisel et al. Benchmark experiment for photoionized plasma emission from accretion-powered X-ray sources. *Phys.Rev.Lett.*,119 :075001, 2017.

Booster les capacités des accélérateurs laser-plasma

A. Leblanc¹, C. Thaury¹, T. Clark², H. Vincenti²

¹ LOA - Laboratoire d'Optique Appliquée, ENSTA/IPP/CNRS

² LIDyL – Laboratoire Interaction Dynamique et Lasers, CEA Saclay

Dans le domaine de l'accélération d'électrons par sillage laser (ou LWFA), trois grands challenges ont pu être résolus ces dernières années. À savoir, à puissance laser donnée, pouvoir maximiser (i) l'énergie finale atteinte par les électrons, (ii) la charge totale du paquet d'électrons, ou encore (iii) l'aspect mono-énergétique de la répartition en énergies du paquet d'électrons (i.e. minimiser la dispersion en énergies).

Cependant, il reste à ce jour très complexe d'associer plusieurs des solutions développées afin d'obtenir des paquets d'électrons qui maximisent à la fois au moins deux des caractéristiques (i), (ii), ou (iii). Au cours de ces trois dernières années, nous avons développé au LOA deux nouvelles solutions qui permettent d'obtenir des paquets d'électrons avec une faible dispersion en énergie (iii) ainsi que soit une maximisation de l'énergie finale (i) soit une maximisation de la charge injectée (ii).

Les deux solutions seront présentées. La première consiste en un guidage tout optique de l'impulsion laser sur une distance plus longue que la longueur de Rayleigh du laser afin d'augmenter la longueur de l'accélérateur. La seconde consiste à utiliser un miroir plasma comme injecteur d'une haute charge d'électrons directement dans le champ accélérateur. Ces deux techniques récentes ont été démontrées expérimentalement sur l'installation 100TW de la Salle Jaune du LOA en 2021 et 2022.

L'interaction Laser-Matière pour l'étude des sursauts solaires

J.-R. Marquès¹, F. Amiranoff¹, C. Briand², S. Depierreux³, M. Grech¹, C. Krafft⁴, L. Lancia¹, P. Loiseau³, F. Pérez¹, C. Riconda^{1, 5}, P. Savoini⁴, A. Sgattoni¹, T. Vinci¹

¹ LULI, CNRS, CEA, Sorbonne Université, École Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris

² LESIA, Observatoire de Paris-PSL, CNRS, Sorbonne Université, Université de Paris

³ CEA-DAM, DIF

⁴ LPP, CNRS, Sorbonne Université, Observatoire de Paris, École polytechnique, Institut Polytechnique de Paris

⁵ Sorbonne Université, LULI, CNRS, CEA, École Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris

Nous avons récemment initié un nouveau projet d'astrophysique de laboratoire par interaction laser-matière : l'étude de certaines émissions captées dans le domaine radio (MHz) provenant des éruptions solaires, et plus précisément des faisceaux d'électrons qu'elles éjectent dans le vent solaire. En effet, des signaux à la fréquence plasma ω_p et au double de cette fréquence sont régulièrement observés par les télescopes au sol et dans l'espace, et via des mesures in situ (sondes spatiales). Depuis les années 50, plusieurs théories ont été proposées pour expliquer et décrire en détail ce type d'émission électromagnétiques (EM). Le scénario généralement admis consiste en trois étapes : (1) la conversion de l'énergie des particules du faisceau en ondes plasma via l'instabilité "bump-on-tail", (2) la rétro-diffusion de certaines ondes plasma sur des ondes sonores via l'instabilité de décomposition de Langmuir, et (3) le couplage entre les ondes plasma, produisant les ondes EM. Néanmoins, plusieurs processus peuvent intervenir dans l'étape 2), et le transfert d'énergie entre faisceaux d'électrons et ondes EM reste à quantifier. Des simulations PIC 2D et Vlasov 3D ont donné des éléments sur la directivité, la polarisation et le taux de conversion entre ondes de Langmuir et ondes EM. Pour contraindre ces modèles à l'aide de données maîtrisées, une série de campagnes expérimentales ont été effectuées sur le laser LULI2000. Grâce à des lois d'échelle, les rôles du faisceau de particules et de l'instabilité bump-on-tail dans l'excitation de l'onde de Langmuir primaire sont joués par le laser et l'instabilité Raman. Le même scénario de décomposition et couplages d'ondes se déclenche ensuite, conduisant aux émissions EM à ω_p et $2\omega_p$. Nous présenterons les premières mesures et caractérisations de ces ondes, ainsi que des comparaisons avec des modèles numériques hydrodynamiques et particulaires.

Surf sur la vague de la fusion

L. Masse

CEA DAM-DIF, 91297 Arpajon, France

L'année qui vient de s'écouler aura été particulièrement riche pour la communauté de la fusion thermonucléaire contrôlée. Après un premier record du NIF aux portes de l'ignition, les tokamaks JET et EAST ont eux aussi battu des records. L'année 2022 s'est terminée par l'annonce du franchissement de l'ignition par le NIF. Dans le sillage de ces résultats, une vague d'information s'est propagée autour de la fusion et de ses futures applications. En particulier, un certain nombre de compagnies privées, ou startup, ont fait parler d'elles par les sommes qu'elles ont pu lever pour vendre la fusion à la prise de courant à l'échelle d'une dizaine d'années.

Dans cet exposé nous reviendrons sur les résultats récents du NIF, leurs significations et leurs implications pour la communauté scientifique. Nous aborderons la 'startup-isation' de la recherche sur la fusion en essayant de brosser un tableau le plus complet possible des différents protagonistes et de leurs objectifs à plus ou moins long terme.

Résultats récents de Smilei pour l'accélération plasma d'électrons

F. Massimo¹, A. Beck², G. Bouchard², C. Prouveur³, J. Derouillat⁴, M. Grech⁵, M. Lobet⁶, F. Pérez⁵, T. Vinci⁵

¹ Laboratoire de Physique des Gaz et des Plasmas - Université Paris-Saclay - CNRS

² Laboratoire Leprince-Ringuet - École polytechnique - CNRS-IN2P3

³ Maison de la Simulation, CNRS, CEA

⁴ Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, CEA

⁵ Laboratoire d'Utilisation des Lasers Intenses, École polytechnique, CNRS

⁶ Maison de la Simulation, CEA

Développé par des théoriciens et expérimentateurs experts d'interaction laser-plasma et par des experts de calcul haute performance, le code PIC Smilei est utilisé par une communauté d'utilisateurs qui a connu une croissance très rapide. Le code est désormais utilisé comme plateforme pour des études de physique, pour développer de techniques de calcul parallèle avancées et pour l'enseignement de la physique des plasmas dans plusieurs écoles et Masters. Dans cet exposé, les développements et les résultats les plus récents pour la modélisation de l'accélération plasma d'électrons, obtenus avec Smilei au sein de plusieurs laboratoires, seront décrits.

Strong-Field QED experiments: from E-320 to Apollon

Sebastian Meuren

SLAC National Accelerator Laboratory, Menlo Park, CA 94025

Apollon is one of few facilities world-wide that will provide access to 10 PW-class laser pulses. In combination with multi-GeV electron beams, obtainable via laser wakefield acceleration, the strong-field QED (SFQED) regime could be explored. Already interactions between 4GeV electrons and laser intensities $3 \times 10^{22} \text{ W/cm}^2$ would exceed the QED critical field in the electron rest frame by a factor of $\chi \approx 5$ (laser energy in central spot: $[50]J$, spot size: $[2]\mu\text{m}$, pulse duration $[25]fs$). Even more important, the classical intensity parameter exceeds $a_0 \gtrsim 100$, implying that the transverse momentum $p_{\perp} \approx a_0 mc$ will dominate the dynamic once the particle's energy is reduced by two orders of magnitude via radiation reaction (i.e., until $\chi \lesssim 0.1$). Accordingly, a qualitatively new regime will be entered that renders these experiments complementary to the Experiment 320 (E-320) at SLAC's FACET-II facility that is currently undergoing commissioning (first electron-laser collisions were observed in August 2022). E-320 will have access to $a_0 \approx 5 - 10$ laser pulses and thus reach $\chi \sim 1$ by colliding at $\approx 30^\circ$ with the FACET-II $[10 - 13]GeV$ electron beam. This talk will summarize the status of E-320 and discuss the challenges of similar experiments at Apollon using laser-wakefield accelerated electron beams (pointing fluctuations, temporal jitter, energy spectrum, etc.) and how they could be addressed.

References

- [1] M. Grech et al., MP3 White Paper 2021, *Investigating strong-field QED processes in laser-electron beam collisions at Apollon* (2021)
- [2] S. Meuren, *E-320 FY22 Progress and Plans for FY23* (2022)
- [3] B. Naranjo et al., JACoW IPAC 2021, *Pair Spectrometer for FACET-II* (2021)

State of the art of numerical tools for simulating the proton-boron reactions and the α -particle production

Ph. Nicolai¹, J. Bonvalet¹, C. Caizergues¹, D. Batani¹, E. d'Humières¹, D. Margarone^{2,3}, A. Morace⁴, Y. Abe⁵, V. Kantarelou², L. Giuffrida², M. Tosca⁶, A. Picciotto⁵, G. Petringa, G.A.P. Cirrone⁷, Y. Fukuda⁸, Y. Kuramitsu⁹, H. Habara⁹, Y. Arikawa⁴, S. Fujioka⁴, D. Raffestin¹

¹ University of Bordeaux, Centre of Intense Lasers and Applications (CELIA), Talence, France

² Institute of Physics of the CAS, v.v.i (FZU), ELI-Beamlines, Prague, Czech Republic

³ Centre for Plasma Physics, Queen's University of Belfast, United Kingdom

⁴ Institute of Laser Engineering (ILE), Osaka University, Osaka, Japan

⁵ Fondazione Bruno Kessler (FBK), Trento, Italy

⁶ University of Naples Federico II, Physics Department, Italy

⁷ Southern National Laboratory (LNS), INFN, Catania, Italy

⁸ Kansai Photon Science Institute, Kyoto, Japan

⁹ Graduate School of Engineering, Osaka University, Osaka, Japan

The use of laser beams to trigger proton-boron fusion reactions requires a chain of numerical codes for interpreting and describing all involved physical processes. The main mechanism consists in producing energetic laser-driven protons inducing the generation of α -particles in a secondary boron target, or directly in a hydrogenated boron-rich target. The use of multiple codes is required because, in experiments with high intensity laser systems, the main laser pulse is often preceded by a low intensity pedestal, produced by amplified spontaneous emission. This pedestal may induce target expansion, pre-plasma formation, and so may modify the interaction of the main laser pulse with the target. Simulations of pedestal effects can be performed with 2D hydrodynamics codes (CHIC [J.Breill, S. Galera, and P.-H. Maire, *Computers Fluids* 46, 161 (2011)]). Nevertheless, above a given laser intensity, typically a few $10^{16}W/cm^2$, other processes occur and another type of codes must be used such as Particle in Cell codes (SMILEI [Derouillat, *Comput. Phys. Comm.* 222, 351 (2018)]) which compute laser matter interaction for Ultra High Intensities and proton production, in terms of energy, angle and position. Finally, Monte-Carlo codes, such as FLUKA [F. Sommerer, *Phys. Med. Biol.* 51, 4385 (2006)], are needed to accurately model the nuclear reactions and transport of ions (α -particles), photons and neutrons. The numerical chain has been tested through a recent experiment performed with a high intensity, high energy laser system [J. Bonvalet, *Phys. Rev. E*, 103, 053202 (2021), D. Margarone, *Applied Sciences* 12, 1444 (2022)]. The simulations clarify the mechanisms of nuclear reactions, of α -particle production and transport through the boron targets, in the pitcher-catcher or in the direct illumination geometries. Nevertheless, the chain needs still to be improved and its limits together with the required progresses will be discussed.

New opportunities for laser-induced Dynamic Compression at the High Power Laser Facility at the ESRF

Raffaella Torchio, Jean Alexis Hernandez, Nicolas Sevelin Radiguet, Sofia Balugani, Olivier Mathon

European Synchrotron Radiation Facility (ESRF), Grenoble, France

The High Power Laser Facility (HPLF) at the ESRF couples a ns 50J laser ($\lambda = 1053$ nm) to time-resolved X-ray Absorption Spectroscopy (XAS) and a velocity interferometer system (VISAR). It allows for the investigation of the local ionic order and electronic structure of laser-shocked matter in compressed solid phases as well as in more complex phases such as Warm Dense Matter. The ability to measure both EXAFS (Extended X-ray Absorption Fine Structure) and high resolution XANES (X-ray Absorption Near Edge Spectroscopy) in single x-ray pulse acquisitions (100ps) makes this instrument unique worldwide. The facility has opened to users since December 2021 and performed 7 experimental campaigns. In this talk we will present: the facility overview and status, first results from commissioning and users experiments beamtimes and short- and long-term future developments.

References

N. Sevelin Radiguet et al. Towards a dynamic compression facility at the ESRF Journal of Synchrotron Radiation 2021

FORUM ILP

26-31 Mars 2023

Village Club du Soleil
Orcières Merlette 1850
Hautes-Alpes



CONTRIBUTIONS

Développement d'un modèle efficace pour optimiser l'accélération et la focalisation des protons dans une cible laser hélicoïdale

M. Bardon^{1,2}, A. Hirsch^{1,2}, J. G. Moreau¹, C. Lacoste^{1,2,4}, E. D'Humières² et V. T. Tikhonchuk^{2,3}

¹ CEA-CESTA, Le Barp F-33114, France

² CELIA, University of Bordeaux-CNRS-CEA, Talence F-33405, France

³ ELI-Beamlines, Institute of Physics CAS, Dolní Brežany 25241, Czech Republic

⁴ INSRS-EMT, Varennes (Québec), Canada

Les cibles hélicoïdales [1] permettent de concentrer et de post-accélérer un faisceau de protons issu du processus TNSA [2]. Ce schéma utilise le courant de décharge [3], généré par l'éjection de charges issues de l'interaction laser-plasma, pour le faire circuler dans une hélice conductrice. La propagation de ce courant produit une impulsion électromagnétique (IEM) à l'intérieur de l'hélice qui concentre, post-accélère et regroupe en paquets une partie du faisceau de protons. Ce type de dispositif a été validé sur plusieurs expériences [1, 4]. Cette technique présente un fort intérêt pour de nombreuses applications allant du chauffage isochore de matériaux denses à la production d'isotopes ou de neutrons [5].

Cependant, les dernières publications sur cette thématique ne montrent pas de nouvel accroissement de performances. En particulier, l'emploi d'hélices plus longues (≥ 15 mm), ne permet pas d'augmenter la post-accélération ou le bunching, comme on pouvait l'espérer. Ceci est dû au fait que l'hélice est un milieu dispersif. Sa capacitance et son inductance varient en fonction de la fréquence. L'intensité du courant est modulée au cours de sa propagation le long de l'hélice, et les protons sont soumis alternativement à des champs accélérateur et décélérateur, et focalisant et défocalisant. Pour optimiser la géométrie de cette hélice, nous avons donc développé un modèle efficace qui permet de modéliser la dynamique des protons et des champs à l'intérieur de l'hélice : c'est le code DoPPLIGHT [6]. Ce code permet de calculer le spectre en énergie des protons en sortie de l'hélice, et cela en 2mn sur un laptop. Je présenterai ce code, ainsi que les premières optimisations d'hélices réalisées avec différents algorithmes.

References

- [1] S. Kar et al, Nature Com. 7, 10792 (2016)
- [2] R. A. Snavely et al, Phys. Rev. Lett. 85 2945 (2000)
- [3] F. Consoli et al, High Power Laser Science and Engineering 8, e22 (2020)
- [4] M. Bardon et al, Plasma Phys. Control. Fusion 62, 125019 (2020)
- [5] Roth et al., Phys. Rev. Lett. 110, 044802 (2013)
- [6] M. Bardon et al, publication en cours (2023)

Optimisation of Polar Direct Drive Illumination for Mega-Joule Laser Facilities

D. Barlow, A. Colaitis, J. Mathiaud, and, J.-L. Feugeas

CELIA, Université de Bordeaux, and CNRS.

Laser inertial confinement fusion (ICF) now enters the burning plasma regime, the next step is higher energy yield which requires coupling more energy to the target. Laser direct drive achieves improved coupling as there is no hohlraum acting as an intermediary. However, the mega-joule laser facilities (National Ignition Facility and Laser Megajoule) are configured with beams entering at the poles for indirect drive, and so require beam re-pointing to recover a direct-drive compatible illumination. A polar direct drive scheme has already been tested on the NIF, however the irradiation configuration may not be optimal. The National Ignition Facility features: 8 cones of quads with independent wavelength tuning; 48 quads entering from different ports with independent pointing, power balance and defocusing; and the quads may be split to 192 beams with individual pointing offsets. There is a large parameter space which likely features different optimal setups for solid target illumination, conventional hotpot ignition, and shock ignition. I will present the use of bayesian optimisation, genetic algorithms, gradient descent and neural networks/transfer learning to produce improved laser parameters for polar direct drive.

Gamma photon and electron-positron production on the PETAL laser facility

F. Brun¹, X. Davoine², P. E. Masson-Laborde², N. Iwata³, Y. Sentoku³, D. Raffestin¹, E. d'Humières¹ and X. Ribeyre¹

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

² CEA DAM DIF F-91297 Arpagon, France

³ Institute of Laser Engineering, Osaka University, 2-6 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

We have performed theoretical and numerical studies of an experiment performed with the high intensity laser PETAL. The experiments were done for the commissioning of the PETAL laser with a laser energy of about 400 J, an intensity of 8.1019 W.cm⁻² and a pulse duration (FWHM) of 600 fs on solid targets [1]. We were interested in the production of high energy photons generated during this commissioning. The experimental shots were conducted on a tungsten target with a thickness of 2 mm. The high energy photons diagnostic used for the experiment was a hard X-ray spectrometer with a stack of filters and Image Plates. The high energy photons were produced mainly from the bremsstrahlung process for relativistic electrons accelerated inside a plasma generated on the front side of the target [2]. To model this experiment we have used a simulation chain including hydrodynamic, Particle In Cell and Monte Carlo simulations. We can simulate the pre-plasma generated at the front of the target by the PETAL laser prepulse, the acceleration of the electrons inside the plasma and the generation of MeV range photons from these electrons. We also have simulated the response of the detector impacted by the high energetic photon beam with a Monte Carlo simulation. All this work allowed us to compare the photon spectra given by the simulation with the experimental measurements, getting good agreement and in consequence validate our simulation chain. Our study did not stop on the photon spectra analysis, we investigated positron production. Indeed, if high energy photons are generated inside the solid target some positron/electron pairs may be produced from the Bethe-Heitler process [3]. We therefore quantified the positron production achievable with the PETAL laser facility. To conclude our study we investigated the possibility to create electron and positron pairs by the linear Breit-Wheeler process using PETAL [4].

References

- [1] D. Raffestin et al., *Matter Radiat. Extremes* 6, 056901 (2021)
- [2] D. Raffestin et al., *Laser and Particles Beams* Vol. 2021, Articles ID 3355928 (2021)
- [3] H. Chen et al., *High energy Density Physics* 7, 225-229 (2011)
- [4] X. Ribeyre et al., *Physical Review E* 93, 013201 (2016)

Evaluation of proton-Boron nuclear reactions from particle-in-cell simulations

C. Caizergues¹, P. Nicolai¹, D. Raffestin¹, E. d'Humières¹, F. Pérez², M. Grech²

¹ CELIA (Centre Lasers Intenses et Applications), Univ. Bordeaux-CNRS-CEA, UMR 5107, Talence 33405, France

² Laboratoire d'Utilisation des Lasers Intenses, Ecole polytechnique, CNRS, France

Proton-Boron reaction is often presented as an aneutronic path to achieve a fusion reactor and is also considered in designing source of particles for medical and fundamental perspectives. From Particle-In-Cell (PIC) simulations, we evaluate the number of events and the alpha source characteristics from a post-processing treatment as well as from directly modeling nuclear fusion in the Smilei PIC code. We review the case of a ps relativistic laser interacting with a solid target when a pre-plasma is present at the front of the target and discuss trends expected from plasma and target respective characteristics.

K α X-ray source driven by a multi-terrawatt femtosecond laser at 100 Hz for spectroscopy and imaging application

A. Ferré¹, R. Clady¹, M. Gambari¹, A. Stolidi², L. Videau^{3,4}, , O. Peyrusse¹,
M. Sentis¹ and O. Utéza¹

¹ Aix-Marseille Université, CNRS, LP3 UMR 7341, 13288, Marseille, France

² Université Paris-Saclay, CEA, List F- 91120, Palaiseau, France

³ CEA, DAM, DIF, 91297 Arpaçon, France

⁴ Laboratoire Matière Conditions Extrêmes, CEA, Université Paris-Saclay, 91680
Bruyères-le-Châtel, France

The interest towards developing intense and compact ultrashort x-ray sources is motivated both by scientific applications like time-resolved X-ray diffraction or X-ray absorption spectroscopy[1] and societal applications such as phase contrast imaging for biology and medicine[2]. At LP3 laboratory, such objectives are today achievable thanks to development of hard Kalpha X-ray pulsed laser plasma source generated by interaction of an ultrahigh intensity femtosecond laser delivering by ASUR laser facility with a solid target. We first determined the absolute yield of the K X-ray source (at 17.48 keV) and the X-ray spot size for a wide range of laser intensity ($I = 10^{17} - 2.8 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$) and for four values of the temporal contrast ratio ($CR = 3.3 \times 10^{10}$) (figure 1 a) and b)). In particular, we measured the highest molybdenum K α photon production reported to date at 100 Hz[3,4] with a K α photon flux of $1 \times 10^{11} \text{ ph/(sr.s)}$ with an X-ray source size less than 90 μm at the driving laser intensity of 10^{19} W/cm^2 . Based on the exploitation of unique performances (figure 1 a) and b)), recent developments will be presented, namely stations of time resolved X-ray diffraction with first measured rocking curves of gold samples and phase contrast X-ray imaging instrument[5] (figure c)). For the first time, we will present quantitative measurements of refractive index extracted with advanced phase contrast imaging technique, named Multilateral Shearing Interferometry in collaboration with CEA List.

References

- [1] T. Elsaesser et al, The Journal of Chemical Physics, 140, 020901 (2014)
- [2] R. Toth et al., Review of Scientific Instruments 76, 083701 (2005).
- [3] Y. Azamoum et al., Scientific Report 8, 4119 (2018).
- [4] M. Gambari et al., Scientific Report 11, 23318 (2021).
- [5] M. Gambari et al., Scientific Report 10, 6766 (2020).

Exploration of the laser spectrum parameters for improving laser beam smoothing

A. Fusaro, R. Collin, G. Riazuelo, P. Loiseau, D. Penninckx

CEA, DAM, DIF, F-91297 Arpajon, France
Université Paris-Saclay, CEA, LMCE, 91680 Bruyères-le-Châtel, France

In the context of inertial confinement fusion (ICF), large energetic laser facilities require optical smoothing techniques to mitigate laser-plasma instabilities (LPI). For this purpose, many focal spots have to be added incoherently. Two focal spots may be added with orthogonal states of polarization, the so-called polarization smoothing [1]. But, since we cannot have more than two orthogonal states of polarization, enhancing the smoothing requires to change the focal spot with time. This is the purpose of optical smoothing by spectral dispersion (SSD) [2]. It consists in broadening the initial laser field by using a periodic phase modulation and then to decorrelate the induced additional frequencies with a dispersive grating. Four major parameters may be considered to characterize the beam smoothing: the total bandwidth, the inter-frequency shift, the spectrum shape and the dispersive grating power. It is well known that a short laser coherence time mitigates LPI. However, the generation of a high energetic laser with a short coherence time, or equivalently a large bandwidth, is still a major issue because of i) frequency conversion bandwidth and ii) unwanted pulse distortions due to FM-to-AM conversion. Moreover, using a periodic phase modulation generates an inhomogeneous weighted spectrum, when a flat spectrum is more appropriate to suppress LPI. Considering the Laser Mégajoule optical system framework, we propose to shape the laser spectrum in different ways in order to improve the laser system efficiency, with reasonable technical modifications. We study different smoothing techniques: multiple phase modulations, dispersive grating and synchronization of the phase modulation between beams. We assess their efficiency by looking at a better mitigation of the stimulated Brillouin scattering that, due to its dangerousness in hohlraums developed for ICF applications in the indirect drive scheme, serves as a witness instability.

References

- [1] Joshua E. Rothenberg, "Polarization beam smoothing for inertial confinement fusion", *Journal of Applied Physics* 87, 2000.
- [2] S. Skupsky and al., "Improved laser-beam uniformity using the angular dispersion of frequency-modulated light", *Journal of Applied Physics* 66, 1989.
- [3] S. Hocquet and al. "Nonsinusoidal phase modulations for high-power laser performance control: stimulated Brillouin scattering and fm-to-am conversion," *Appl. Opt.* 49, 2010.

Nouveau design d'un accélérateur de protons hélicoïdal permettant une augmentation du bunching et de l'énergie

A. Hirsch^{1,2}, J. G. Moreau¹, C. Lacoste^{1,2,6}, M. Ferri¹, F. Lefèvre³, I. Lantuéjoul⁴, B. Etchessahar¹, J. Fuchs³, E. D'Humières², V. T. Tikhonchuk^{2,5} et M. Bardon^{1,2}

¹ CEA-CESTA, Le Barp F-33114, France

² CELIA, University of Bordeaux-CNRS-CEA, Talence F-33405, France

³ LULI, CNRS-Ecole Polytechnique-CEA-Université Paris VI, Palaiseau F-91128, France

⁴ CEA-DIF, Arpajon F-91297, France

⁵ ELI-Beamlines, Institute of Physics CAS, Dolní Brežany 25241, Czech Republic

⁶ INSRS-EMT, Varennes (Québec), Canada

Les cibles hélicoïdales [1] permettent de concentrer et de post-accélérer un faisceau de protons issu du processus TNSA [2]. Ce schéma utilise le courant de décharge [3], généré par l'éjection de charges issues de l'interaction laser-plasma, pour le faire circuler dans une hélice conductrice. La propagation de ce courant produit une impulsion électromagnétique (IEM) à l'intérieur de l'hélice qui concentre, post-accélère et regroupe en paquets une partie du faisceau de protons. Ce type de dispositif a été validé, pour des hélices à diamètre et pas constants, sur plusieurs expériences [1, 4]. Cette technique présente un fort intérêt pour de nombreuses applications allant du chauffage isochore de matériaux denses à la production d'isotopes ou de neutrons [5]. Le principal inconvénient des cibles hélicoïdales est la nature dispersive de celle-ci. Ceci entraîne donc un enchaînement de zones accélératrices et décélératrices ainsi que focalisantes et défocalisantes, ce qui limite les performances de ce schéma. Je présenterai donc une nouvelle géométrie de cibles hélicoïdales entourées d'une gaine afin de réduire la dispersion du courant de décharge au cœur de celles-ci. Les études par simulations Particle-in-Cell de grande échelle via le code SOPHIE [6] développé au CEA-CESTA montrent un effet important de la gaine sur la propagation du courant le long du solénoïde et donc sur la dynamique des protons, augmentant le bunching et l'énergie totale du faisceau. De plus, je présenterai les résultats des premiers tirs réalisés avec un laser d'impulsion femtoseconde sur l'installation APOLLON en novembre 2022, ceux-ci présentent des résultats similaires aux résultats expérimentaux obtenus en régime picoseconde sur LULI2000. Ces résultats démontrent que notre schéma d'accélération est utilisable sur plusieurs classes de laser, du régime femtoseconde au régime picoseconde.

References

- [1] S. Kar et al, Nature Com. 7, 10792 (2016)
- [2] R. A. Snavely et al, Phys. Rev. Lett. 85 2945 (2000)
- [3] F. Consoli et al, High Power Laser Science and Engineering 8, e22 (2020)
- [4] M. Bardon et al, Plasma Phys. Control. Fusion 62, 125019 (2020)
- [5] Roth et al., Phys. Rev. Lett. 110, 044802 (2013)
- [6] O. Cessenat, arXiv, 1301.4539 (2013)

Développement de solutions pour la réalisation d'une parabole de Thomson active

Arnaud HUBER¹, Emmanuel AKUTPOR¹, Kristal BONTEMPS¹, Fazia HANNACHI¹, Antoine MAITRALLAIN¹, Medhi TARISIEN¹, Didier RAFFESTIN², Philippe NICOLAI²

¹ LP2IB Laboratoire de Physique des 2 infinis Bordeaux

² CELIA Centre d'Etudes Lasers Intenses et Applications

Les grandes installations laser Pétawatt de recherche capables de tirer une fois par minute voire même au Hertz sont en cours de démarrage. Un verrou doit cependant être levé qui concerne la détection en temps réel des particules émises lors d'un tir laser sur cible. En effet des perturbations électromagnétiques intenses sont émises sous la forme d'une impulsion électromagnétique (EMP) et d'un flash de rayons X causant l'aveuglement voire la destruction des détecteurs de particules communément utilisés [1]. C'est pour cela que des détecteurs passifs (activation nucléaire [2], écrans phosphorescents [3], ...) sont encore utilisés de nos jours. Ces détecteurs à localisation sont ensuite extraits des chambres d'expérience et analysés en quelques dizaines de minutes (impossible avec des hauts taux de répétition). L'objectif est donc de trouver une alternative aux détecteurs passifs pour que les spectromètres dispersifs puissent être utilisés à haut taux de répétition. Pour cela deux pistes sont envisagées ; utiliser un scintillateur qui sera imagé par une caméra (CCD ...), ou utiliser une surface de détecteurs CMOS directement placée dans le plan focal du spectromètre dispersif. Pour cela, nous avons développé une simulation GEANT4 afin de définir la géométrie du détecteur adapté à chaque type d'expérience. Une partie optique est incluse afin d'optimiser la détection du signal de scintillation. Nous avons ainsi étudié l'impact du scintillateur sur les traces des particules ou encore examiné une solution alternative utilisant un bunch de fibres scintillantes permettant à la fois de détecter les particules dans le spectromètre et de transporter la lumière de scintillation jusqu'à une caméra placée à l'extérieur de la chambre d'interaction. Des tests expérimentaux sont en également cours sur différents types de détecteurs CMOS afin de déterminer précisément leur fonction de réponse à des particules chargées et les conditions optimales de leur utilisation en milieu laser.

References

- [1] Scintillators in high-power laser-driven experiments ; M.Tarisien, et al. ; IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol 65, issue 8, p.2216-2219 (2018)
- [2] NATALIE : a 32 detector integrated acquisition system to characterize laser produced energetic particles with nuclear techniques ; M.Tarisien, et al. ; Rev.Sci.Instr. 82, 023302 (2011)
- [3] Response functions of Imaging Plates to photons, electrons and 4He particles ; T.Bonnet, et al. ; Rev. Sci. Instrum. 84, 103510 (2013).

Étude de la démixtion du mélange H-He, dans l'ensemble de Gibbs, aux conditions des intérieurs planétaires.

Etienne Jaupart, François Soubiran

CEA DAM-DIF, 91297 Arpaçon, France

La connaissance précise du diagramme de démixtion du mélange H-He est particulièrement importante pour l'étude des géantes gazeuses [1]. Dans les conditions de température (T) et pression (P) des intérieurs planétaires, les électrons doivent être traités de manière quantique. Des études théoriques ont donc étudié le mélange à l'aide de simulations de dynamiques moléculaires dans *l'ensemble canonique* utilisant la théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT) [2,3,4,5]. Cette méthode a permis de calculer des diagrammes de démixtion, mais ces simulations peuvent souffrir d'effets de taille finie limitant le caractère prédictif des diagrammes ainsi obtenus. Récemment, une série d'expériences a suggéré une démixtion dans un régime de T, P en désaccord avec les prédictions théoriques [6]. Ce résultat appelle à reprendre l'étude théorique du mélange H-He et à minimiser les sources d'erreurs.

Nous avons donc étudié le mélange H-He dans un autre ensemble statistique que l'ensemble canonique : *l'ensemble dit de Gibbs*. Cet ensemble consiste à considérer deux boîtes pouvant échanger du volume et des particules, mais isolées, de sorte que les particules d'une boîte n'interagissent pas avec celles de l'autre. Lors d'une démixtion, les 2 phases se séparent alors dans 2 boîtes différentes, s'affranchissant ainsi des effets de surface. Nous présenterons une nouvelle étude générale de cet ensemble et de ses avantages ainsi que nos premiers résultats quant à son application au mélange H-He dans les conditions de Jupiter et Saturne. Nous fournirons un premier diagramme de démixtion ab initio pour la fonctionnelle PBE et discuterons son implication pour les modèles planétaires.

References

- [1] Debras, F., & Chabrier, G. (2019). APJ, 872(1), 100
- [2] Soubiran, F., Mazevet, S., Winisdoerffer, C., & Chabrier, G. (2013). PRB, 87(16), 165114
- [3] Lorenzen, W., Holst, B., & Redmer, R. (2009). PRL, 102(11), 115701.
- [4] Schöttler, M., & Redmer, R. (2018). PRL, 120(11), 115703.
- [5] Morales, M. A., Schwegler, E., Ceperley, D., Pierleoni, C., Hamel, S., & Caspersen, K. (2009). PNAS, 106(5), 1324-1329.
- [6] Brygoo, S., Loubeyre, ... & Collins, G. W. (2021). Nature, 593(7860), 517-521.

Influence of the solid-to-plasma transition on the laser energy deposition in targets and subsequent hydrodynamics for direct drive inertial confinement fusion

R. Liotard¹, A. Colaïtis¹, I. V. Igumenshchev², A. Pineau² S. Hu², A. Sollier³,
E. Lescoute³, B. Canaud³, G. Duchateau⁴

¹ University of Bordeaux-CNRS-CEA, CELIA, Talence, FRANCE

² LLE, Rochester, USA

³ CEA-DIF, Bruyères-le-Châtel, FRANCE

⁴ CEA-CESTA, Le Barp, FRANCE

Inertial Confinement Fusion (ICF) is a method of achieving nuclear fusion reactions by bringing a small mass of combustible material at high densities with the desired thermodynamic properties. To achieve this goal, direct drive ICF uses high power laser beams to implode a spherical target which consists of gaseous DT fuel surrounded by a thin shell of DT ice and an outermost layer of plastic ablator. The laser ionizes the plastic which is ablated and the target implodes due to the rocket effect. In radiation hydrodynamics codes, the plastic ablator is approximated as opaque to the laser radiation, i.e. an initial plasma state is assumed. The solid-to-plasma transition of the ablator is not modeled in the aforementioned codes, whereas it may have an important role in implosion symmetry, target compressibility, shock timing, and hydrodynamic instability.

This work focuses on the experimental validation of a solid-to-plasma transition model and its introduction in a 3D radiation hydrodynamics code, in order to study its influence on direct-drive implosions. It is based on a recent physical model developed in Ref. [1,2] which describes the solid-to-plasma transition of polystyrene (most ICF ablators are composed of polystyrene). This model has been validated for photoionisation in Ref. [3].

I will present results from an experiment carried at CEA-DIF on the CGLT laser, in order to validate the collisional ionization within the model. This model for photoionisation has been introduced in a numerical tool coupling the 3D laser propagation code IFRIIT [4] and 3D Eulerian hydrodynamic code ASTER [5]. I will also present simulations used to investigate impact of transition on experiments undertaken at the OMEGA laser facility. They show that transition have an effect on shock velocity for low adiabat simulations, and a reduction of low mode of hydrodynamic instabilities.

References

- [1] G. Duchateau u.a. , PRE **100**, 033201 (2019).
- [2] A. Pineau u.a., Phys. Plasmas **27**, 092703 (2020)
- [3] A. Pineau u.a., PRE **104**, 015210 (2021)
- [4] A. Colaïtis u.a., JCP **443**, 110537 (2021)
- [5] I. V. Igumenshchev u.a., Phys. Plasmas **23**, 052702 (2016)

High Power Nanosecond Laser for Dynamic Shock Compression

F. Mollica, A. Golinelli, S. Branly and P.-M. Paul

Amplitude

Dynamic Compression allows scientists to experimentally simulate the high pressure and high temperature conditions existing at the core of exoplanets, in order to elucidate the structure, composition, history and dynamics of new materials naturally unavailable on Earth.

Traditional methods dedicated to Dynamic Shock Compression include static compression, (e.g., diamond anvil cells) and explosives and light-gas guns. However these methods are either limited in achievable pressure or they produce too high temperatures. High-power lasers allow for the first time for the reliable and exact energy deposition at a high compression without inducing excessive heating. High power lasers are being established as state-of-the-art tools to push the frontiers of high-pressure research giving rise to Laser Driven Dynamic Compression approach. Specific requirements are demanded for this kind of laser: high-energy, first-class beam quality, versatile pulse shaping capability and high repetition rate.

In this context Amplitude has developed, manufactured, and delivered (European Synchrotron Radiation Facility, Los Alamos National laboratory) the Premiumlite-Glass laser for Laser Driven Dynamic Shock Compression. We will report on this laser, capable of delivering up to 200J at 0.1Hz at 1053nm. The laser uses an innovative amplifier technology based on an active mirror disk amplifier module. Disk amplifiers modules are flashlamp-pumped in order to offer a cost-effective solution. Thanks to a specific front-end, the pulsewidth can vary from a few ns to 15ns with a high resolution (125 ps) programmable pulse shape. Peak power can reach up to 25GW with triangular, t2, t3 pulse shapes.

The perspective of scaling the above-mentioned technology to kJ-class laser will also be addressed.

Study of liquid silicates using laser-driven shock compression

G. Morard^{1*}, J.-A. Hernandez², A. Ravasio³, D. Sokaras⁴, H. J. Lee⁴, E. Galtier⁴, S. Glenzer⁴, T. Vinci³, S. Pandolfi⁴, C. Prescher⁵, S. Boccato⁶, J. Chantel⁷, S. Merkel⁷, W. L. Mao^{4,8}, A. E. Gleason^{4,8}, R. Alonso-Mori⁴, and S.-H. Shim⁹

¹ISTerre, Université Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble, France;

²European Synchrotron Radiation Facility, Grenoble, France

³LULI, Ecole Polytechnique, Sorbonne Université, Palaiseau, France;

⁴SLAC National Accelerator Laboratory, Menlo Park CA, USA;

⁵University of Freiburg, Freiburg, Germany;

⁶IMPMC, Sorbonne Université, Paris, France;

⁷UMET, Université de Lille, Lille, France;

⁸Geological Sciences, Stanford University, Stanford CA 94305, USA;

⁹School of Earth and Space Exploration, Arizona State University, Tempe, 85287, USA

Building models of early planetary evolution is crucial to constrain the history of our planet, of the solar system, and for understanding the diversity of exoplanets. Early processes include global scale shock events, large scale melting, gravitational segregation of materials, and partitioning of elements into different layers. These early processes are critical as the chemical compositions of the different layers of a planet is set at this stage.

The temporal evolution of a magma ocean in its latter stage, i.e., after most of material has been accreted, is controlled by magma ocean convection, whose regime depends on the composition and temperature profiles. Establishing a density profile requires thermodynamic models for the relationship between density and composition. Thermal expansion and compressibility of liquid silicates are also important to estimate the temperature profiles of the magma ocean (with an adiabatic assumption). These examples demonstrate that physical properties of liquid silicates are key to establishing early planetary structures and to understanding the dynamics of an early magma ocean (e.g., full convection or stratified convection).

At the MEC instrument of LCLS, we have been able to probe shock-driven liquid silicates with in situ X-ray diffraction at combined high-pressures and -temperatures. The experimental setup allows synchronization of a laser drive (80 J focused with a 150 μm Phase Plate), inducing a shock wave in a 50 μm thick target ((Mg,Fe)SiO₃ glass with variable Fe content), and an X-ray pulse produced by the Free Electron Laser (17 keV energy, duration of ~ 50 fs, focus spot on target of ~ 50 μm diameter). Probing at a time just before the breakout allows homogeneous P-T conditions to be obtained in the shocked silicate, up to 350 GPa and $\sim 15,000$ K, determined by a VISAR measurement on the rear surface of the sample. The XRD patterns from 4 ePIX detectors were combined using DIOPTAS (Prescher et al, 2015) for a Q range between 17 and 90 nm^{-1} . Then, the local structure, as well as the density, were recovered using Amorphus software (Boccato et al, 2022). Complementary to this in situ study, the Hugoniot pressure-density relations for these silicate samples have been measured at LULI facility.

Current and future HEDP facilities at First Light Fusion

Nicolas Niasse

First Light Fusion, Yarnton, England
Centre for Inertial Fusion Studies, Imperial College, London, England

First Light Fusion Ltd (FLF) is a privately funded UK company exploring alternative routes to ICF, with the prime focus on sustainable power generation. FLF is planning to build the world's largest pulsed power driver for HED science as it progresses its inertial fusion programme. This high-voltage, fast current rise time machine currently codenamed "Machine 4" (M4) will access multi-Gbar regimes on millimetre-spatial-scale lengths, where fundamental science questions on lab-astrophysics, planetary science, materials, radiation, and nuclear fusion can be explored. In this presentation, we introduce the experimental and numerical HEDP capabilities developed at FLF and outline the future vision for M4.

References

<https://firstlightfusion.com/science-hub>

Etudes prospectives sur la diffraction de Kossel ultra-rapide

Olivier Peyrusse

Aix-Marseille Univ, CNRS, Laboratoire LP3, UMR7341

L'objectif ici est de discuter l'intérêt de réaliser des études de fluorescence X ultra-rapide, résolues en angle, sur un matériau solide. Il s'agit ici d'étudier la diffraction dite "de Kossel". Celle-ci résulte de la fluorescence d'atomes préalablement excités dans un milieu présentant un ordre périodique. En mode statique, cette diffraction de Kossel est bien documentée, avec diverses applications concernant l'ordre atomique d'un matériau. Nous proposons ici d'utiliser l'interaction d'une impulsion courte et ultra-intense avec une cible solide de façon à générer de courtes impulsions d'électrons chauds (≈ 100 fs). En pénétrant à l'intérieur d'un échantillon cristallin, ces électrons ionisent les électrons des couches atomiques internes, de sorte que la relaxation ultérieure des lacunes en couche K entraîne une forte émission K α qui est renforcée dans les directions de Bragg correspondant à la période du matériau (effet Kossel). Sera discuté l'intérêt d'expériences pompe-sonde où un changement structural de l'échantillon est induit préalablement par une impulsion laser à faible fluence (la pompe). L'idée ici est de suivre dans le temps la modification (et éventuellement la disparition) des structures de Kossel en variant divers paramètres comme la fluence de la pompe ou le délai entre la pompe et la sonde (l'impulsion laser intense qui induit l'émission K α).

Effet de la conduction thermique électronique et de l'absorption par bremsstrahlung inverse sur la réflectivité d'un plasma

Olivier Poujade, Max Bonnefille, Ronan Devriendt

CEA DAM-DIF, 91297 Arpajon, France

Des simulations de dynamique moléculaire (DM) [1], qui prennent en compte les effets collectifs des charges de façon naturelle, ont permis de recaler des modèles théoriques d'absorption laser par bremsstrahlung inverse (BI) dans un plasma.

Dans la continuité de ces études, nous avons aussi réalisé des simulations de DM pour recaler les modèles de conduction thermique électronique.

Ces modèles d'absorption et de conduction ont été intégrés dans un code d'hydrodynamique-radiative (HR) avec deux constantes ajustables, C_{abs} et C_{diff} , pour régler les niveaux d'absorption et de conduction.

Les comparaisons de résultats de simulations HR à des expériences de réflectivité (en géométrie plane) ont permis de montrer qu'il existe une infinité de couples $(C_{\text{abs}}, C_{\text{diff}})$ qui permettent d'obtenir une réflectivité intégrée donnée. En revanche, la forme précise de la réflectivité résolue en temps n'est reproduite que pour un unique de ces couples qui sera comparé à celui obtenu par la DM.

References

- [1] R. Devriendt et O. Poujade Phys. Plasmas 29 073301 (2022)"

Stabilisation du modèle non-local “SNB” par correction “a posteriori”

R. Riquier, C. Negrello, P. Mellor.

CEA/DAM/DIF

En étant le lien entre le dépôt laser et la conversion X, le transport électronique joue un rôle primordial dans la modélisation de la cavité. En utilisant une forme classique (Spitzer-Härm, Braginskii ou Hubbard) du flux de chaleur, l'équation d'énergie prend la forme d'une équation de diffusion. Il est alors possible de la résoudre implicitement, c'est à dire sur un pas de temps hydrodynamique. Cependant, lors d'une irradiation laser, la condition de validité de ces modèles n'est pas remplie : soit le gradient de température est trop raide (côté front d'ablation), soit le libre parcours des électrons est trop long (côté couronne). Il est donc nécessaire d'utiliser un modèle non-local. Le seul modèle non-local à s'être véritablement imposé, pour les simulations hydro-radiatives 2D, est celui de Schurtz, Nicolai et Busquet (SNB). Bien que celui-ci soit systématiquement cité et utilisé lors de comparaisons 1D, force est de constater qu'il n'existe presque pas dans la littérature d'exemple de son utilisation pour des cas 2D concrets (à l'exception de calculs 2D d'attaque directe, pour lesquels l'écoulement est quasi-1D, sur un maillage polaire, avec un profil de température monotone). Le surcoût en temps calcul du modèle ne peut être la seule explication. Celui-ci, bien que significatif, reste raisonnable. Après avoir rappelé comment un flux de chaleur “arbitraire” peut être couplé à l'équation d'énergie d'un code hydro-radiatif, nous montrerons que le schéma historique de correction “à priori” du flux local est source d'instabilités. Au contraire, une correction “à postérieure” du flux local stabilise le schéma. Nous montrerons que le modèle est maintenant utilisable et robuste dans le code Troll, en 2D, sur des écoulement complexes. Enfin, des pistes d'étude pour la stabilisation du schéma avec prise en compte de la magnétisation seront exposées.

Optimisation de l'émission THz par une impulsion optique à plusieurs harmoniques focalisée dans l'air

Alexandre Stathopoulos^{1,2}, Stefan Skupin³, Luc Bergé^{1,2}

¹ CEA, DAM, DIF 91297 ArpaJon, France

² Université Paris-Saclay, CEA, LMCE, 91680

³ Institut Lumière-Matière, UMR 5306 Université Lyon 1 - CNRS, Université de Lyon, Villeurbanne, France

Nous étudions la production d'ondes térahertz à l'aide d'une impulsion optique ultra courte (50 fs) et intense (100 TW/cm²) comportant deux harmoniques. La focalisation de l'impulsion laser conduit à la formation d'un plasma par photo-ionisation, au sein duquel des courants sont induits par la formation d'électrons libres. Ils peuvent contenir un terme basse-fréquence situé dans la bande des ondes térahertz (1 – 100 THz), dont nous souhaitons optimiser la production. Pour cela, nous disposons du modèle 0D+t "Local Current" [1], qui estime les effets principaux intervenant lors d'une expérience, ainsi que du code CUP3D, qui intègre le modèle de propagation unidirectionnelle d'une impulsion électromagnétique.

Nous nous intéressons à l'influence d'un miroir déformable (MD) sur la propagation laser et la production THz, typiquement conique dans l'espace. Il permet d'injecter une phase spatiale au laser, induisant divers effets optiques. La bibliographie [2] suggère qu'il peut agir sur la géométrie et la densité du plasma pour favoriser la génération THz. Sa modélisation par CUP3D a permis de confirmer cela. Nous avons comparé, pour différents effets optiques, les rendements produits lorsqu'une impulsion initialement focalisée ionise une cellule d'air. Dans la configuration étudiée, une aberration sphérique a permis d'augmenter la génération THz d'un facteur 4 par rapport au cas sans MD.

Pour caractériser l'émission conique THz, on emploie le modèle de You et al. [3]. Il nous a précédemment permis de retrouver la distribution angulaire THz d'une expérience menée à DTU. Une généralisation de ce modèle pour les impulsions impactées par un MD soutenue par l'exploitation de CUP3D montre que l'instrument ne modifie pas le mécanisme à l'origine de l'émission conique, mais influe sur l'angle d'émission à travers la densité plasma.

References

- [1] C. Tailliez, et al., "Terahertz pulse generation by two-color laser fields with circular polarization," *New J. Phys.* 22, 103038 (2020).
- [2] A. A. Ionin et al., "Filamentation of femtosecond laser pulses governed by variable wavefront distortions via a deformable mirror", *J. Opt. Soc. Am. B*, Vol. 30, No. 8 (2013).
- [3] Y. S. You, et al., "Off-Axis Phase-Matched Terahertz Emission from Two-Color Laser-Induced Plasma Filaments," *Phys. Rev. Lett.* 109, 183902 (2012).

Revisiting the physics of laser-driven ablation front by the means of Particle-In-Cell simulations

Corentin Veauvy, Arnaud Debayle, Charles Ruyer, Didier Benisti

CEA DAM-DIF, 91297 ArpaJon, France

Inertial confinement fusion is an alternative way of triggering thermonuclear fusion reactions by compressing and heating a Deuterium-Tritium pellet with a hundred of laser beams. Implosion results from the ablation of the target surface. During the propagation of this so-called ablation front, several effects such as Raman and Brillouin scatterings, two plasmons decay, or out-of-equilibrium heat transport may occur. These effects usually require a kinetic description. Hardly characterized in experiments, such flowing plasmas are furthermore simulated with hydrodynamics codes (TROLL [1]), well designed for studying large plasmas over long times without accounting for the aforementioned effects, nor using a kinetic description of the plasma. In this study we propose to use a Particle In Cell (PIC) code (Smilei [2]). These simulations grant us access to multiple plasma quantities and give us information about matter state and behavior inside the ablation front. We will then compare simulations' results and models with a hydrodynamic code to explore the limits of the hydrodynamic closure. We studied the case of a laser-driven ablation of a CH plasma during the first tens of picoseconds. We compared the Smilei and TROLL values of such quantities as density, temperature, absorption of the laser energy by the plasma, electronic heat flux, and pressure tensor. In each code density and temperature profiles are relatively close when using a 10% free flux limiter owing to the high value of the Knudsen number. Later hydrodynamic simulations using a SNB [3] model will be compared to the PIC ones. Finally, to improve the numerical description of both the non-local heat flux, and Stimulated Raman Scattering, a bias on the electronic distribution function (EDF) is introduced so as to have more particles at interesting velocities without modifying the EDF.

References

- [1] E. Lefebvre et al 2019 Nucl. Fusion 59 032010
- [2] J. Derouillat, A. Beck, F. Pérez, T. Vinci, M. Chiaramello, A. Grassi, M. Flé, G. Bouchard, I. Plotnikov, N.Aunai, J. Dargent, C. Riconda, M. Grech, Comput. Phys. Commun. 222 351-373 (2018)
- [3] G. P. Schurtz, Ph. Nicolai, M. Busquet, Physics of Plasmas V

Comparison of novel chamber beam geometry robustness to mispointing, imbalance and target offset.

Diego Viala

CEA/CELIA

A decade of experiments on National Ignition Facility (NIF) has proven that Inertial Confinement Fusion (ICF) is a credible approach to energy production, with new performers having exceeded the ignition regime. However, the indirect-drive approach is not suited for high-gain implosions and reliable energy production.

The direct-drive ignition approach is favored for energy production as it features simpler target designs and couples more energy to them. It has been explored by physicists across the world and supported by experiments on small-scale facilities in Europe (PALS, ORION, LMJ), Japan (GEKKO) and the US (OMEGA). There are currently no ignition scale laser facilities configured for the standard direct-drive approach, integrated direct-drive experiments have mostly been focused on understanding the physics at reduced scales, with the ultimate goal of demonstration of necessity and feasibility of construction of an international direct-drive laser facility.

In this talk, we will present studies about the irradiation and low-mode perturbations in 3D at ignition scale. While the stability of direct-drive targets to low mode was analysed in the past on the basis of 2D simulations, only 3D simulations can capture correctly the effects of beam imbalance, beam mispointing and target offset errors. We first perform optimisation studies of innovative chamber designs using a solid sphere illumination thanks to the Inverse-Ray-Tracing code Ifrit. For each chamber design, we sample free parameters – the super-gaussian order and the spot size of the laser – and select the ones minimizing the initial laser perturbations. Robustness to systematic low-mode asymmetries is then evaluated between the chamber geometries using gaussian sampling and statistics. We will also assess how the in-flight stability of the target is affected for different ignition schemes.

References

- [1] “Hydrodynamic studies of high gain shock ignition targets: effect of low- to intermediate-mode asymmetries”
- [2] “Inverse ray tracing on icosahedral tetrahedron grids for non-linear laser plasma interaction coupled to 3D radiation hydrodynamics”
- [3] ”Optimization of irradiation configuration in laser fusion utilizing self-organizing electrodynamic system”

FORUM ILP

26-31 Mars 2023

Village Club du Soleil
Orcières Merlette 1850
Hautes-Alpes



POSTERS

Façonnage Optique d'un Gaz (F.O.G.)

K. Bontemps¹, A. Maitrallain¹, M. Tarisien¹, F. Hannachi¹,
A. Huber¹, J. J. Santos²

¹ ENL au LP2IB

² CELIA

Le groupe ENL étudie la possibilité d'accélérer des ions jusqu'à plusieurs dizaines de MeV grâce à l'interaction d'un laser de haute intensité avec un jet de gaz dense. Ces cibles gazeuses offrent l'avantage de ne pas générer de débris et sont auto-régénérées. Elles pourront ainsi être utilisées auprès de la nouvelle génération de lasers de puissance opérant à haute cadence de tir.

Pour créer une onde de choc accélératrice, l'interaction du laser avec le jet de gaz doit se produire en son centre, là où la cible présente une densité surcritique ($n_c \approx 10^{21} cm^{-3}$) avec un fort gradient. Cependant le profil du jet de gaz présente aussi des zones périphériques de faible densité où l'impulsion laser va interagir et se dégrader, perdant sa cohérence et son énergie indispensables à la génération du choc accélérateur au centre du jet. L'optimisation de la géométrie des buses formant le jet de gaz permet de limiter ces zones de faibles densités mais pas de s'en affranchir complètement. On cherche alors à modifier le profil de densité du jet de gaz en y creusant un canal avec une pré-impulsion laser de plus faible intensité pour faciliter la propagation de l'impulsion accélératrice.

Un banc optique a été mis en place au laboratoire LP2IB pour étudier la formation du canal plasma dans le jet de gaz dense. Un laser YAG de 1J et de 8 ns de durée est utilisé d'une part pour modifier le profil du jet de gaz et d'autre part est doublé en fréquence pour éclairer les trois diagnostics mis en œuvre : un interféromètre Mach-Zehnder, un dispositif d'ombroscopie et une caméra streak. Des premiers résultats seront présentés sur ce poster.

Génération de particules- α par fusion proton-bore initiée par interaction laser-plasma

¹Carrière, T., ¹Singappuli, D., ²Huault, M., ³Batani, K., ¹Raffestin, D.,
¹Batani, D., ⁴Consoli, F., ¹Nicolai, P.

¹ CELIA (Centre Lasers Intenses et Applications), CNRS, CEA, Université de Bordeaux,
UMR 5107, France

² University of Salamanca, Salamanca, Spain

³ Institute of Plasma Physics and Laser Microfusion, Hery 23, 01-497, Warsaw, Poland

⁴ ENEA, Fusion and Nuclear Safety Department, C. R. Frascati Via E. Fermi 45, Frascati,
Italy

La fusion proton-bore émerge ces dernières années comme une voie possible de productions de sources secondaires de particules α . L'accélération de protons par laser à ultra-haute intensité et l'interaction avec une cible de bore est la voie d'entrée privilégiée pour effectuer ce type de réactions. [1] Ces sources sont étudiées pour la production de radio-isotopes à visée médicale afin de permettre une méthode alternative aux cyclotrons classiquement utilisés en milieu hospitalier.

Les deux principaux mécanismes d'accélération d'ions étudiés pour ce schéma nucléaire sont la TNSA (Target Normal Sheath Acceleration) et le Hole-Boring. Dans le premier cas, les protons sont accélérés en face arrière via le champ électrostatique induit par les électrons mis en mouvement par le laser. Malgré la grande dispersion du spectre en énergie de ces protons, il est possible d'induire un grand nombre de réactions nucléaires dans une deuxième cible de Bore et ce même au-delà de la résonance principale à 675 keV.

Dans le cas du Hole-Boring, les ions sont accélérés directement au sein de la cible puisqu'ils sont poussés par la pression de radiation du laser à très haute intensité. Les protons accélérés réagissent avec les atomes de Bore au sein d'une unique cible. [2]

Des simulations PIC et Monte-Carlo ont été réalisées afin de mieux comprendre les résultats d'une campagne expérimentale qui a eu lieu sur le laser VEGA-III au CLPU, Salamanque, Espagne en novembre 2022. Ce laser possède plusieurs centaines de femtosecondes de temps d'impulsion et est doté d'un haut taux de répétition : 1Hz. Ces simulations permettent une meilleure préparation d'une nouvelle campagne expérimentale qui aura lieu sur le même système laser en mars 2023.

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 septembre 2020): 343.
- [2] Margarone, Daniele, Julien Bonvalet, et al. "In-Target Proton-Boron Nuclear Fusion Using a PW-Class Laser". *Applied Sciences* 12, no 3 (28 janvier 2022): 1444.

Plasma mirror injector of high charge in laser plasma accelerator

T. Clark¹, L. Fedeli¹, H. Vincenti¹, A. Leblanc²

¹ CEA Saclay – Université Paris-Saclay

² Laboratoire d'optique appliquée - ENSTA

Laser-plasma acceleration delivers nowadays electron beams up to multi-GeV on several centimeters [1]. Thanks to different injection schemes (Ionization injection, shock injection. . .), the features of these sources have improved. However, the principal limitation of those techniques is that they cannot provide electron beams with both high charge and high quality which are necessary for different applications such as FLASH radiotherapy [2]. The principal problem is that we trap electrons from a gas with low density (10^{17} - 10^{18} cm⁻³), and thus it is complicated to extract a substantial amount of charge. Therefore, we propose a new promising laser-plasma acceleration scheme, based on a hybrid target, which could provide high quality and high charge electron beams compared to other techniques. This target is based on an optical device named plasma mirror to inject a high charge [3]. The electrons are thus extracted from a solid, which is a high-density medium. In this scheme the plasma mirror is surrounded by a low-density gas. As for more conventional laser-driven schemes, the laser generates an accelerating structure in the gas, which traps the extracted electrons and accelerates them up to high energies. This scheme is very challenging to be simulated on distance on mm-cm scale since it requires a high resolution during the interaction between the laser and the solid. Performing those simulations required some code development and finally a work describing this development and the 3D simulations performed of this hybrid target was awarded the prestigious Gordon Bell Prize in 2022 [4]. The outcome of those simulations helped us a proof-of-principle experimental campaign to validate the concept.

References

- [1] Petawatt Laser Guiding and Electron Beam Acceleration to 8 GeV in a Laser-Heated Capillary Discharge Waveguide, A. J. Gonsalves et al. PRL
- [2] Radiobiology of the FLASH effect, A.A.Friedl et al. Med Phys.49
- [3] Vacuum laser acceleration of relativistic electrons using plasma mirror injectors, M. Thévenet et al., nature communications
- [4] Pushing the Frontier in the Design of Laser-Based Electron Accelerators..., Luca Fedeli et al., SC22

Echanges d'énergie entre deux lasers de classe kJ sur le LMJ

A. Debayle¹, P. loiseau, C. Rousseaux and L. Lecherbourg

¹ CEA-DAM-DIF

L'échange d'énergie laser est une classe de couplage entre deux ondes électromagnétiques et une onde acoustique, analogue à la diffusion Brillouin stimulée. Lorsque deux lasers se croisent dans un plasma, une partie des photons d'un laser peut être diffusée dans la direction de l'autre laser dès lors que l'écart en fréquence des deux lasers dans le référentiel plasma, est proche du mode acoustique. Cet effet est significatif dans les expériences de fusion par confinement inertiel (FCI) et est même exploité pour équilibrer l'énergie entre les lasers. Pour preuve, les tirs NIF[1], proches du "breakeven", utilisent systématiquement l'écart en fréquence pour préserver la symétrie d'implosion. Une série d'expériences réalisée au LULI [2] a permis d'explorer la dynamique du transfert du croisement de faisceaux de même fréquence dans des plasmas en détente, donnant accès au régime transitoire d'échange d'énergie ainsi qu'aux échanges entre trois faisceaux. Afin de se rapprocher des conditions plasma typiques des expériences FCI, une expérience dédiée à l'échange d'énergie a eu lieu sur l'installation LMJ, en imposant ou non un écart de fréquence entre deux quadruplets. Les deux quadruplets se propagent dans une cavité cylindrique traversante remplie de gaz, et échangent leurs énergies par l'intermédiaire d'une onde acoustique. Le bilan d'énergie a été partiellement assuré par la mesure de la rétrodiffusion sur un quad, ainsi que par la caractérisation de la transmission en exploitant la conversion X, résolue en temps et en énergie, des lasers sur une plaque d'or située après la cavité. Avec un écart en fréquence imposé, l'échange d'énergie mène au quasi-appauvrissement d'un des faisceaux. Sans écart de fréquence, un déséquilibre en énergie entre les faisceaux persiste et est attribué à un flot de plasma permettant l'accord en fréquence entre les 3 ondes. Une absorption anormale est également observée et ne peut être expliquée par le Bremsstrahlung inverse.

References

- [1] Abu-Shawwareb et al., Phys. Rev. Lett., 129, 075001 (2022)
- [2] Neuville et al., Phys. Rev. Lett., 117, 145001 (2016), Neuville et al.,PPCF, 60, 044006 (2018)

Modèles d'émissions térahertz par rayonnement de transition cohérent et par rayonnement de gaine

E. Denoual¹, L. Gremillet¹, L. Bergé¹, X. Davoine¹

¹ CEA/DAM/DIF, Université Paris-Scalay, CEA, LMCE

Lorsqu'une cible solide est impactée par une impulsion laser ultraintense et ultrabrève, les champs colossaux de celle-ci mettent en mouvement les électrons du milieu qui acquièrent des énergies relativistes. Ces électrons traversent la cible de façon quasi balistique et sont projetés dans le vide en face arrière. En traversant l'interface, ces particules subissent un changement de permittivité qui les amène à rayonner de façon cohérente dans le domaine térahertz[1-4]. Les électrons sont ensuite défléchis par un champ de gaine et reviennent vers la cible[5] en quelques femtosecondes. Lors de leur réflexion, ces particules chargées et fortement décélérées rayonnent par effet synchrotron. Nous avons développé un modèle semi-analytique d'émission térahertz adapté aux cibles solides décrivant les rayonnements de transition et synchrotron générés par un faisceau d'électrons qui est caractérisé par des fonctions de distributions en énergie, espace et temps.

Réinjectés dans la cible par le champ électrostatique local, les électrons effectuent des allers-retours au sein de cette dernière et forment une gaine chargée négativement à l'interface plasma-vide dont les champs électriques mettent en mouvement les ions présents en surface. Ces ions peuvent atteindre, en quelques centaines de femtosecondes, des vitesses de l'ordre de $0.1c$, correspondant à des énergies allant de quelques MeV à quelques dizaines de MeV[6-7]. L'accélération des ions constitue une autre source d'émission, usuellement qualifiée de rayonnement de gaine[8-11]. Nous avons développé un modèle permettant le calcul de l'énergie rayonnée par accélération d'ions. Cette description combine deux modèles d'accélération ionique 1D –pour une réponse supposée soit isotherme soit adiabatique des électrons rapides –qui sont modifiés par la prise en compte de l'expansion radiale des électrons et d'effets multidimensionnels.

Nous comparons les rendements de conversion en énergie laser-THz associés à ces deux processus.

References

- [1] Ginzburg, V. L. Phys. Scr. (1982)
- [2] Schroeder, C. B., et al. Phys. Rev. E.(2004)
- [3] Zheng, J., et al. Phys. Plasmas. (2003)
- [4] Liao, G-Q., et al. Phys. Rev. Lett. (2016)
- [5] Myatt, J., et al. Phys. Plasmas. (2007)
- [6] Mora, P. Phys. Rev. Lett. (2003)
- [7] Ferri, J., et al. Phys. Plasmas. (2018)
- [8] Gopal, A., et al. Phys. Rev. Lett. (2013)
- [9] Herzer, S., et al. New J. Phys. (2018)
- [10] Woldegeorgis, A., et al. Phys. Rev. E. (2019)
- [11] Déchard, J., et al. Phys. Plasmas. (2020)

Effet de la microstructure sur la propagation d'ondes de Marshak

R. Devriendt¹, B. Peres¹

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

La propagation des ondes de Marshak est un phénomène d'intérêt pour l'astrophysique [Mihalas 1984] ainsi que pour la fusion par confinement inertiel [Atzeni 2004]. La description de ce phénomène dans les codes de calcul doit donc être la plus précise possible. C'est à cette fin que nous proposons d'étudier l'effet de la microstructure des matériaux sur la propagation d'ondes de Marshak. Des expériences ont été menées notamment sur les installations LMJ [Courtois 2021] et NIF [Moore 2014] afin d'observer la propagation d'ondes de Marshak dans des matériaux de basse densité (mousses et aérogels). La restitution de ces expériences par la simulation a montré [Guymer 2015] que, pour certains matériaux, les modèles utilisés dans les codes de calcul conduisent à sous-estimer la vitesse de propagation de l'onde de Marshak, mais qu'un ajustement sur l'énergie interne et l'opacité permet de restituer les résultats expérimentaux. Pour améliorer ces résultats, nous considérons l'effet de la microstructure des matériaux. En effet, les modèles des codes de calcul supposent que le matériau est homogène, ce qui n'est pas le cas au niveau du front de l'onde de Marshak. Le front se propage dans un milieu froid qui conserve donc sa structure initiale. Cette structure est dans la plupart des cas constituée d'un réseau de particules séparées par des pores. Il a déjà été montré [Hazak 1998, Nicolai 2012] que la microstructure peut affecter la propagation d'ondes de choc. On peut donc s'attendre à ce qu'elle affecte aussi la propagation d'ondes de Marshak. Pour étudier cet effet, nous présenterons des simulations d'hydrodynamique radiative en nous comparant au cas de la propagation dans un matériau homogène.

References

- S. Atzeni, J. Meyer-ter-Vehn, *The Physics of Inertial Fusion* (2004)
- C. Courtois, C. Robert et al., *PoP* 28, 073301 (2021)
- G. Hazak, A. L. Velikovich et al., *PoP* 5, 4357 (1998)
- T. M. Guymer, A. S. Moore et al., *PoP* 22, 043303 (2015)
- D. Mihalas, B. W. Mihalas, *Foundations of Radiation Hydrodynamics* (1984)
- A. S. Moore, T. M. Guymer et al., *J. of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 159, 19 (2015)
- Ph. Nicolai, M. Olazabal-Loumé, et al., *PoP* 19, 113105 (2012)

Modélisation théorique, numérique et expérimentale de la structure à double chocs dans les novæ

L. Dollerschell¹, L. Van Box Som^{1,2}, E. Falize¹

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

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

Le phénomène de nova se produit à la surface d'une naine blanche qui accrète de la matière provenant d'une étoile compagnon. Cette éruption est déclenchée lorsque les conditions de pression et de température à la base de la couche accrétée permettent d'initier des réactions de fusion thermonucléaires. La matière accrétée est alors éjectée à des vitesses supersoniques, tout en laissant la naine blanche intacte. Le rayonnement observé lors d'un épisode de nova est très intense et multi-longueurs d'onde reflétant la complexité de la structure émettrice. L'observation d'un rayonnement X durs soutient l'hypothèse de la présence, au sein de l'éjecta, de structures à double chocs pouvant être radiatives (Chomiuk et al., 2021 ; Metzger et al., 2016).

Dans ce travail, nous présenterons les premières simulations d'hydrodynamique radiative de la structure de double chocs, réalisées avec le code RAMSES (Teyssier, 2002). Nous comparerons ces résultats à une version améliorée du modèle théorique 1D de Metzger et al., 2014. Ce travail permettra de déterminer le caractère radiatif de la zone de double chocs. Il mettra également en évidence les processus de refroidissement ainsi que les instabilités qui peuvent se développer dans cette structure et donc de mieux comprendre la formation d'une zone dense et froide entre les deux chocs.

A l'aide de lois d'échelle adaptées (Falize, et al, 2011 ; del Valle, et al, 2022), nous montrerons comment nous pouvons reproduire cet environnement de haute énergie à l'aide d'expériences laser. Ce travail constitue le socle théorique du projet d'astrophysique de laboratoire CIRENE (Chocs Internes Radiatifs dans les Ejecta de NovaE). Ces expériences, qui seront proposées dans les prochaines années sur LULI et LMJ, permettront d'étudier la structure du double chocs dans un environnement contrôlé et observé par de nombreux diagnostics.

References

- Chomiuk, L., et al., *Annual Rev. of Astron. and Astrophys.*, 59, 391-444 (2021).
del Valle, M. V., et al, *Astron. Astrophys.*, 660, A104 (2022)
Falize, É., et al, , *Astrophys. J*, 730, 96 (2011).
Metzger, B. D, et al., *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 457, 1786-1795 (2016).
Metzger, B. D., et al.,. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 442, 713-731 (2014).
Teyssier, R. *Astron. Astrophys.*, 385, 337 (2002).

Etude de faisabilité d'un système de génération de champ magnétique pour l'installation LMJ-PETAL.

L. Québert, E. Mainguy, B. Etchessahar

CEA CESTA

L'axe 4 du projet PETAL Upgrade, financé par la région Nouvelle Aquitaine, a pour objectif d'intégrer à l'installation LMJ-PETAL un dispositif permettant de réaliser des expériences sous un champ magnétique supérieur à 30 T. Les motivations scientifiques concernent l'étude de nombreux systèmes en astrophysique, en planétologie ou en Fusion par Confinement Inertiel. La mise en œuvre de ce dispositif passe par la réalisation d'un système électrotechnique haute tension (HT), composé d'une bobine générant le champ magnétique, alimentée par un banc d'énergie (réalisé à partir de condensateurs) par l'intermédiaire d'une ligne de transmission. L'édifice (comprenant la bobine et les cibles laser) ainsi que la ligne de transmission (câbles d'alimentation et/ou strip-line) seront embarqués sur un inserteur. Deux solutions d'insertion de l'édifice cibles-bobine sont actuellement étudiées dans le projet : utiliser un inserteur spécifique ou modifier le futur Porte Cible Cryogénique du LMJ, actuellement en cours de conception. Différentes solutions d'intégration de la ligne de transmission du système électrotechnique dans l'inserteur sont en cours d'étude, ainsi que plusieurs autres problématiques d'intégration et d'ingénierie système. Les objectifs fixés pour le champ magnétique seront présentés, ainsi que les bancs de test haute tension en fonctionnement au CESTA puis le concept de bobine de type transformateur que l'on envisage d'utiliser pour l'installation LMJ-PETAL. Un point sur les résultats obtenus (expérimentaux et simulation) et le travail restant sur cette thématique pour adapter cette bobine au LMJ sera également effectué. Enfin un domaine de fonctionnement a priori accessible sera présenté.

Acceleration mechanisms in extreme photon-plasma interactions

J. Faure¹, L. Gremillet¹, M. Lemoine²

¹ CEA, Commissariat à l’Energie Atomique et aux Energies Alternatives

² IAP, Institut Astrophysique de Paris

High-energy astrophysical phenomena, such as pulsars and GRBs, can emit extreme gamma-ray fluxes, with a peak of emission around the keV-MeV range [1]. Plasma electrons acted upon by such radiative fluxes can be accelerated to relativistic energies via Compton scattering. This scenario can also be envisioned, to some extent, in extreme-intensity laser-plasma interactions in future laboratory astrophysics experiments. Using the CALDER PIC code recently enriched with a Monte Carlo module describing Compton scattering [2,3], we have simulated the interaction of an initially cold hydrogen plasma with an extreme gamma-ray flux, of relative density $n\gamma/np \sim 5.10^7$ and photon energy $\epsilon\gamma = 4mec^2$. Our simulations reveal that the plasma dynamics proceeds through several stages. The increasing number of plasma electrons accelerated via Compton scattering form a forward-moving fast electron beam, neutralized by a denser current of counterstreaming electrons. Then, as more electrons get scattered, we observe a phase-mixing between the cold return current and the electron beam into a relativistically hot, forward-drifting electron bulk. The slower dynamics of the ions gives rise to a coherent charge-separation field balancing the electron acceleration [4]. Ions themselves are accelerated by this field to near-relativistic speeds, moving the bulk of the plasma forward and dictating the average electron drifting speed [5]. Simultaneously, the electrons that have not yet Compton-scattered are accelerated backwards by the charge-separation field to energies way beyond that of the driving photons. The interpenetration of the backward-moving, high-energy dilute electron population and the lower-energy plasma bulk leads to the growth of the current filamentation instability [6], inducing magnetic structures acting as scattering centers on high-energy electrons. After elaborating on these various stages, we will illustrate their sensitivity to variations in some of the system’s parameters.

References

- [1] [1] V.A. Acciari et al., *Nature* 575, 7783 (2020)
- [2] B. Martinez et al., *J. Plasma Phys.* 87, 905870313 (2021)
- [3] D. Tordeux, PhD, Modélisation de la physique atomique et du transport radiatif dans un code particule-in-cell (2022)
- [4] L. Zampieri et al., *Astrophysical Journal*, 592:368–377 (2003)
- [5] Madau & Thompson. *Astrophys. J.* 534 (1), 239–247 (2000)
- [6] A. Bret et al., *Physics of Plasmas* 20, 042102 (2013)

Experimental techniques for measurement of ultra-high-intensity laser generated gamma rays at ELI Beamlines

G. Fauvel¹, P. Rubovic¹, F. Condamine¹, M. Manuel², A. Arefiev³, K. Tangtartharakul³, Y. He³, S. Weber¹

¹ ELI Beamlines

² General Atomics - San Diego

³ University of California, San Diego

Production of intense and energetic gamma-ray sources in dense laser-irradiated plasmas is of fundamental interest in many fields of science (two-photon pair production, medical isotope production, nuclear waste analysis, etc.). One of the techniques to generate such photons is the interaction of an ultra-high-intensity laser pulse with low-mass foam targets. In these conditions, where the electron density is close to the plasma critical density, very strong magnetic fields (multi-GG) are generated. These magnetic fields enhance electron acceleration inside the plasma, which consequently, emit gamma rays from tens to hundreds of MeV. The currently available L3 high-repetition rate PW-class laser (30J, 30fs, 10Hz) at ELI Beamlines fulfills the requirements for such research. However, an important work must be made regarding diagnostics for being able to operate such experiments at decent repetition rates. Indeed, standard gamma-ray diagnostics use passive detectors to record the signal, which are not suitable for high-repetition rate operation at ELI Beamlines. Here, we describe the design and the challenging implementation of an active gamma-ray calorimeter in extreme environments (i.e. electromagnetic pulses, particles and ultra-high vacuum).

References

- [1] Stark, D. J., Toma Toncian, and A. V. Arefiev. "Enhanced multi-MeV photon emission by a laser-driven electron beam in a self-generated magnetic field." *Physical review letters* 116, no. 18 (2016): 185003.
- [2] Hannasch, A., A. Laso Garcia, M. LaBerge, R. Zgadzaj, A. Köhler, J. P. Couperus Cabadağ, O. Zarini et al. "Compact spectroscopy of keV to MeV X-rays from a laser wakefield accelerator." *Scientific Reports* 11, no. 1 (2021): 1-16.

Application du problème de Zel'dovich généralisé à des codes hydrodynamiques de différentes échelles

M. Fontaine, C. Busschaert, G. Bignon, R. Chalayer, L. Grospellier, C. Eaux
et E. Falize

CEA, DAM, DIF

L'étude des supernovæ est un domaine de grand intérêt en astrophysique. Différents phénomènes physiques sont étudiés : la production et le transport des neutrinos (Kifonidis et al. 2003), la propagation de chocs radiatifs (Chevalier & Fransson 2008) ou encore les instabilités hydrodynamiques (Kuranz et al. 2009). Le développement de l'astrophysique de laboratoire a permis de reproduire et d'étudier certains aspects pertinents pour ces études (Michel et al. 2019). Toutes ces études s'appuient sur des simulations numériques de plus en plus poussées (Ugliano et al. 2012). Cependant, la modélisation de l'expansion des éjectas reste un défi majeur pour les codes de simulation. L'expansion d'un système auto-similaire dans le vide, aussi appelé problème de Zeldovich (Zel'dovich & Raizer 1967), est un excellent cas test pouvant être appliqué aux codes d'hydrodynamique et permettant de s'assurer de la maîtrise de la phase balistique de cette expansion avec précision. Dans ce travail, nous proposons une généralisation de ce cas test à toutes les dimensions appliquée aux codes Ramses (Teyssier R. 2011) et TROLL du CEA-DAM. De plus, nous avons mené une étude analytique et numérique de l'influence de l'entropie initiale emportée par le reste de supernova sur son évolution auto-similaire. L'ensemble de cette étude permet d'expliquer les mesures spectroscopiques des premières phases d'explosions de supernovæ. En explicitant les lois d'échelle de ce type d'écoulement, nous étudierons la possibilité d'une validation expérimentale sur une grande installation de physique des hautes densités d'énergie.

References

- Chevalier, R. A., & Fransson, C. 2008, *The Astrophysical Journal*, 683, L135
Kifonidis, K., Plewa, T., Janka, H.-T., & Müller, E. 2003, *Astronomy & Astrophysics*, 408, 621
Kuranz, C. et al. 2009, *The Astrophysical Journal*, 696, 749
Michel, T. et al. 2019, *The Astrophysical Journal*, 888, 25
Teyssier R. 2011, Ramses software, version 3.10
Ugliano, M., Janka, H.-T., Marek, A., & Arcones, A. 2012, *The Astrophysical Journal*, 757, 69
Zel'dovich, Y. B., & Raizer, Y. P. 1967, Academic press

Simulation de collisions de chocs obliques hydrodynamiques et cinétiques dans un cadre d'astrophysique de laboratoire

M. François¹, E. d'Humières¹, X. Ribeyre¹

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

Les rayons cosmiques sont des particules très énergétiques accélérées lors de phénomènes astrophysiques violents. Les chocs sont susceptibles d'être des structures accélératrices via des processus tels que ceux présentés par Fermi [1]. Dans l'univers il est possible que deux chocs sphériques collisionnent, par exemple dans le cadre de la collision de deux restes de supernovæ [2]. Nous étudions ici la collision de chocs obliques à l'aide du code hydrodynamique FLASH et du code Particle-In-Cell (PIC) SMILEI. Lors de la collision de chocs obliques, au-delà d'un certain angle un troisième choc appelé choc de Mach va se former ainsi qu'une structure appelée configuration de Courant-Friedrich [3]. Nous avons étudié la création de ce choc d'un point de vue théorique et avec des simulations avec le code hydrodynamique FLASH en fonction du nombre de Mach des chocs incidents. L'accélération de particules met en jeu des processus cinétiques, nous avons donc utilisé le code PIC SMILEI pour l'étudier au travers des chocs sans collision. Pour qu'un choc sans collision se forme il faut qu'un phénomène de dissipation transforme l'énergie cinétique dirigée en température ou en énergie de particules réfléchies (dans un choc collisionnel les collisions entre particules dissipent l'énergie dirigée sous forme de chaleur), celui-ci peut être lié aux non-linéarités du système ou à des instabilités qui entraînent de la turbulence. Nous avons essayé de reproduire la formation d'un choc de Mach avec des chocs non-collisionnel afin d'étudier l'accélération de particules dans ces structures. Ces outils peuvent être utilisés lors de l'analyse d'expérience d'astrophysique de laboratoire [4][5]. Dans ces expériences le plasma dans lequel se propage le choc passe de collisionnel à non-collisionnel nécessitant l'utilisation des deux codes de simulation pour l'étudier. Nous avons reproduit l'évolution du choc formé dans l'expérience de B. Albertazzi et al [5] afin d'étudier cette transition.

References

- [1] E. Fermi, Physical Review (1949)
- [2] Watanabe, T. A&A (1982)
- [3] R. Courant & K.O. Friedrichs, Supersonic flow and shock waves. p.464,(1948)
- [4] A. Fazzini et al. A&A (2022)
- [5] B. Albertazzi et al. Matter and Radiation at Extermes (2022)

Nouvelle expérience et dimensionnement pour de futures études des instabilités hydrodynamiques sur installations XFEL

T. Goudal¹, V. Bouffetier², Y. Liu³, B. Nagler³, M.P. Valdivia⁴, G. Perez-Callejo⁵, A. Casner⁶, E.C. Galtier³, D. Khagani³, H.J. Lee³, K. Li³, A. Sakdinawat³, D. Mancelli⁷, M. Nakatsutsumi², K. Appel², M. Makita², U. Zastra²

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

² European XFEL, Holzkoppel 4, 22869 Schenefeld, Germany

³ SLAC National Accelerator Laboratory, 2575 Sand Hill Rd, Menlo Park, California 94025, USA

⁴ Center for Energy Research, University of California, San Diego, La Jolla, California 92093-0417, USA

⁵ Departamento de Física Teórica Atómica y Óptica, Universidad de Valladolid, 47011 Valladolid, Spain

⁶ CEA, DAM, CESTA, 33116 Le Barp Cedex, France

⁷ Centre for Plasma Physics & Lasers, Hellenic Mediterranean University, 74133 Rethymno, Greece

Les «X-rays Free Electron Lasers» (XFELs) repoussent davantage l'exploration de la matière dans des régimes à haute densité d'énergie ($e>0.1\text{TJ}/\text{m}^3$) [1]. Une nouvelle expérience sur l'installation «Linac Coherent Light Source» (LCLS) à Standford exploitera le faisceau d'électrons comme source radiographique pour produire un rayonnement X très intense ($\simeq 10^{16}\text{ W}/\text{cm}^2$ de photons à 8keV) et quasi-monochromatique ($\Delta E/E=0.1\%$) [2]. Couplé à un système d'imagerie interférométrique du type Talbot-Lau [3] ou par projection de source ponctuelle, ce dispositif permettra d'atteindre des résolutions spatiales sub-micrométriques ($\simeq 600\text{nm}$). Ces performances rendront possible l'observation de structures dans le volume de mousses carbonées irradiées à des intensités laser de l'ordre de $5.10^{13}\text{ W}/\text{cm}^2$ à 2ω . Très proche des tailles caractéristiques des pores, la résolution spatiale attendue sera capable de résoudre des structures fines au voisinage des fronts de choc et d'ablation afin de préparer la plateforme pour l'étude de développement d'instabilités hydrodynamiques du type Rayleigh- Taylor [4] et Richtmyer-Meshkov [5] sur des cibles pré-modulées ou présentant des gradients de densité.

References

- [1] R.P. Drake (2018) ISBN : 978-3-319-67711-8
- [2] L.F. Dimauro et al. (2007) DOI : 10.1088/1742-6596/88/1/012058
- [3] V. Bouffetier et al. (2020) DOI : 10.1364/A0.398839
- [4] Lord Rayleigh (1882) DOI : 10.1112/plms/s1-14.1.170
- [5] R.D. Richtmyer (1960) DOI : 10.1002/cpa.3160130207

Investigation of dynamic properties of highly magnetized plasma through Molecular Dynamics.

D. Guerroudj, J. Rosato, A. Calisti and S. Ferri

Aix-Marseille Université, CNRS, PIIM, UMR7345, Marseille, France

Highly magnetized plasmas can be found in various fields such as Astrophysics or Magneto-Inertial Fusion (MIF). The presence of strong magnetic fields raises new questions since they impact both the atomic properties of the plasma particles and their trajectories. In this framework, we aim to study how the transport of plasma particles is affected by the presence of strong magnetic field in conditions such that $\omega_c/\omega_p \gg 1$, where ω_c refers to the cyclotron frequency and ω_p refers to the plasma frequency. In order to carry out this study, Molecular Dynamics (MD) simulations are performed giving access to the particles positions and velocities and allowing the computation of the velocity autocorrelation function (VAF) [1]. The VAF is then used to infer the diffusion coefficient using the Green-Kubo relation [2]. The magnetic field is accounted for using a modified Velocity-Verlet algorithm [3] which is designed for strong magnetic field conditions. In this work, we present specific applications relevant to the study of dense magnetized plasma.

References

- [1] A. Calisti, S. Ferri and B. Talin, Classical molecular dynamics model for coupled two component plasmas, *High Energy Density Physics* 5, 307 (2009).
- [2] JP Hansen, EL Pollock, and IR McDonald. Velocity autocorrelation function and dynamical structure factor of the classical one-component plasma. *Physical Review Letters*, 32(6):277, 1974.
- [3] Q Spreiter and M Walter. Classical molecular dynamics simulation with the velocity verlet algorithm at strong external magnetic fields. *Journal of Computational Physics*, 152(1):102–119, 1999.

A scintillator detector for energy-profile reconstruction of ion beams at high repetition rate

M. Huault¹, M. Ehret², D. De Luis², J. A. Perez², J. Apiñaniz², J. L. Henares², S. Malko³, M. Touati⁴, N. Gordillo⁵, C. Gutierrez Neira⁶, J. Metzkes-Ng⁷, M. Reimold⁸, U. Schramm⁷, K. Zeil⁷, L. Roso¹, G. Gatti², L. Volpe¹

¹ University of Salamanca

² Centro de Laseres Pulsados Ultracortos Ultraintenso

³ Princeton University Plasma Physics Laboratory

⁴ Marvel Fusion GmbH

⁵ Universidad Autonoma de Madrid, of Applied Physics

⁶ Sincrotrón ALBA

⁷ Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Institute of Radiation Physics

⁸ Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Technische Universität Dresden

We present the first experimental results of a 2D scintillator-based detector developed at the CLPU aiming at the spatio spectral characterization of proton beams driven by ultra-relativistic laser pulses at high repetition rate. We report its implementation in laser-driven proton acceleration at the DRACO (HZDR) and VEGA (CLPU) laser facilities to demonstrate its operation. The analysis of the obtained results demonstrates the relevance of the presented diagnostic for high repetition rate acquisition of laser-driven proton sources promoting it as an essential tool for large parametric studies in the emerging field of laser-driven accelerators. A validation of the spectral and divergence reconstruction method is also presented together with the scintillator calibration performed at the conventional accelerator CMAM in Madrid.

References

[1] M. Huault, D. De Luis, J. I. Apiñaniz, M. De Marco, C. Salgado, N. Gordillo, C. Gutiérrez Neira, J. A. Pérez- Hernández, R. Fedosejevs, G. Gatti, and et al., “A 2d scintillator-based proton detector for high repetition rate experiments,” *High Power Laser Science and Engineering*, vol. 7, p. e60, 2019.

On the competition of laser acceleration mechanisms of electrons and ions in steep density profiles at overdense plasmas interfaces

S. Hüller¹, A. Porzio^{1,2}, A. Héron¹, and P. Mora¹

¹ Centre de Physique Théorique(CPHT), CNRS, Ecole Polytechnique, IP Paris, 91128 Palaiseau, France

² LAGA, Institut Galilée, Université Paris 13, Villetaneuse, France

The role of the density gradient in the electron acceleration process by intense laser pulses for a plasma profile with a steep interface between vacuum and a strongly overdense plasma is investigated. In a recent article [1] (see [2]) it has been shown that the distribution function of electrons accelerated by intense laser pulses at abrupt vacuum-plasma interfaces is of non-thermal nature in its high-energy tail due to stochastic electron acceleration. Here laser intensities in the relativistic regime are considered. Finite gradients at the interface favours the formation of an electron cloud in front of it that favours collective electron motion in the underdense plasma and that alters the evolution of the distribution of electrons that are injected into the dense plasma and also leads to the heating of the electron bulk inside the dense plasma without the generation of a pronounced high energy tail as seen for abrupt interfaces. The different heating mechanisms have consequences on the onset of the ion motion at the rear of the target. For finite gradients the acceleration is dominated by ponderomotive effects at the laser interface and the resulting electron kinetic energy is hence limited by the oscillatory energy. For very steep interfaces an ultra-relativistic and non-thermal electron population exits the rear of the target, its influence on the ion expansion is eventually masked by the heated electron bulk. The heating of the resulting hot electron population predominant for the ion expansion evolves in time. While this time evolution is not considered in the known analytic models [3-5], we show here that the ion dynamics can still be quite well reproduced with this model provided that the hot electron population be traced in determining its temperature and density.

References

- [1] S. Hüller, A. Porzio, J.-C. Adam, and A. Héron, *Phys. Plasmas* 26, 083107 (2019).
- [2] J. May, J. Tonge, F. Fiuza, R. A. Fonseca, L. O. Silva, C. Ren, and W. B. Mori, *Phys. Rev. E* 84, 025401 (2011).
- [3] P. Mora, *Phys. Rev. Lett.* 90, 185002 (2003).
- [4] L. M. Wickens, J. E. Allen, and P. T. Rumsby, *Phys. Rev. Lett.* 41, 243 (1978).
- [5] M. A. True, J. R. Albritton, and E. A. Williams, *Physics of Fluids* 24, 1885 (1981).

Optimisation de la méthode d'analyse PIXE avec des ions accélérés par laser à l'aide de cible hélicoïdale

C. Lacoste^{1,2,3}, A. Hirsch^{1,2}, E. Cartrix³, C. Boynukara³, S. Fourmaux³, E. D'Humières², P. Antici³ et M. Bardon^{1,2}

¹ CEA-CESTA, Le Barp 33114, France

² CELIA, University of Bordeaux-CNRS-CEA, Talence 33405, France

³ INRS EMT, Varennes, J3X 1P7, Canada

L'accélération de proton par TNSA (Target Normal Sheath Acceleration) [1] permet de nombreuses applications. Parmi celles-ci se trouve la PIXE (Particule Induced X-ray Emission) [2], une technique qui permet d'analyser avec précision la composition chimique d'un matériau sans causer de dommage. Lorsque les protons interagissent avec la cible à analyser, ils vont ioniser la cible en éjectant des électrons des couches internes. Un électron de la couche externe va alors se désexciter en émettant un rayon X. Comme la longueur d'onde des rayons X est caractéristique de l'atome, nous pouvons connaître la composition d'un matériau en obtenant le spectre X émis.

L'inconvénient du mécanisme d'accélération TNSA est qu'il génère un faisceau de protons avec une divergence angulaire relativement importante ($\pm 20^\circ$). Pour cela, nous nous sommes intéressés aux cibles hélicoïdales [3] permettant de focaliser et de post-accélérer un faisceau de protons produit par TNSA [4].

Lors de l'interaction laser-matière, un courant de décharge est généré lors de l'éjection d'électrons chauds [5]. Avec une cible hélicoïdale, ce courant va se propager le long d'une hélice conductrice connectée à la face arrière de la cible. Cette propagation va alors générer une impulsion électromagnétique à l'intérieur de l'hélice qui va focaliser et accélérer le faisceau de protons TNSA.

Je présenterai les résultats TNSA et PIXE obtenus grâce au haut taux de répétition du laser ALLS (2.5Hz, 22fs, 3.2J) de l'INRS EMT (Canada) et les résultats obtenus grâce à la cible hélicoïdale. Le couplage de ces 2 méthodes a de nombreux avantages. Tout d'abord, l'augmentation de la fluence protonique permet un accroissement de la fluorescence X induite. Elle permet également un sondage plus en profondeur, en particulier pour les matériaux à Z élevé [2,6,7]. Enfin, je terminerai par une présentation de la prochaine expérience qui sera réalisée au printemps 2023 sur l'installation ALLS à l'INRS.

References

- [1] S. Kar et al, Nature Com. 7, 10792 (2016)
- [2] M. Barberio et al Scientific reports, 9(1) :1–9 (2019)
- [3] R. A. Snavely et al, Phys. Rev. Lett. 85 2945 (2000)
- [4] M. Bardon et al, Plasma Phys. Control. Fusion 62, 125019 (2020)
- [5] F. Consoli et al, High Power Laser Science and Engineering 8, e22 (2020)
- [6] Q. Mouchard PhD thesis, (2021)
- [7] A. Subercaze PhD thesis, (2017)

Simulations du développement d'une zone de mélange turbulent à l'interface ablateur-gaz pour des expériences de FCI à réactifs séparés

Y. Marchenay et J. Griffond

CEA-DIF

Une des causes majeures de dégradation des performances de la fusion par confinement inertiel (FCI) est la présence en mélange d'une fraction de l'ablateur ou de DT cryogénique dans le point chaud. Cette pollution du point chaud reflète en partie le développement d'instabilités hydrodynamiques durant l'implosion dues aux imperfections géométriques de la cible. On s'intéressera ici aux instabilités de type Richtmyer-Meshkov et Rayleigh-Taylor se développant à l'interface ablateur-gaz lors de la phase d'implosion. Plusieurs campagnes expérimentales [1,2] effectuées au National ignition facility (NIF) ont quantifié l'impact de ce mélange par le biais d'une méthode de réactifs séparés. L'idée est, contrairement aux cibles d'ignition, de séparer physiquement les réactifs de fusion (Deutérium et Tritium) afin de limiter les zones de fusion DT aux seules zones de mélange caractéristiques des instabilités hydrodynamiques étudiées. L'objectif du travail proposé ici est d'interpréter les expériences de Kyrala et al. à l'aide de simulations 1D et 2D. Pour cela, on considère une interface ablateur-gaz non perturbée dont la dynamique de mélange est pilotée par un modèle RANS au second ordre [3]. Afin de reproduire l'effet du spectre de rugosités expérimental à l'interface ablateur-gaz, la zone de mélange turbulent est initialisée de manière cohérente avec la transition vers la turbulence de l'instabilité de Richtmyer-Meshkov. L'analyse des performances de l'implosion montre la pertinence de ce type de simulations et l'importance du développement des zones de mélange turbulent sur la dégradation de la FCI.

References

- [1] Casey et al. (2014). Development of the CD symcap platform to study gas-shell mix in implosions at the National Ignition Facility. *Physics of Plasmas*.
- [2] Kyrala et al. (2018). Using a 2-shock 1D platform at NIF to measure the effect of convergence on mix and symmetry. *Physics of Plasmas*.
- [3] Griffond et al. (2022). A Modified Dissipation Equation for Reynolds Stress Turbulent Mixing Models. *Journal of Fluids Engineering*.

AvIon, un modèle d'atome moyen reproduisant la structure électronique à haute densité des simulations ab initio

G. Massacrier ¹

¹ CRAL-Observatoire de Lyon

L'étude numérique des plasmas denses emprunte essentiellement deux voies: d'une part des simulations lourdes de dynamique moléculaire (MD) couplée à la théorie de la fonctionnelle densité (DFT) pour suivre un mélange de noyaux et d'électrons; d'autre part des modèles d'atome moyen (AA) centrés sur l'environnement d'un seul ion. Ces derniers ont des difficultés à reproduire les résultats ab initio dans le domaine de la matière condensée (au delà de la densité solide). Le code présenté, AvIon, est un modèle AA basé sur un nouveau paradigme pour le calcul des densités d'état électroniques. Ce poster illustre ses capacités à reproduire les calculs DFT-MD, et ceci en quelques secondes CPU au lieu de milliers d'heures.

References

[1] Massacrier, G. et al, Phys. Rev. Research, 3 (2021), 023026

Beam dynamics for a 200 MeV laser wakefield accelerator

D. Minenna¹, S. Marini, I. Moulanier, F. Massimo, B. Cros and
P. A. P. Nghiem

¹ CEA/Irfu

Laser wakefield accelerators (LWFA) have already demonstrated the feasibility to generate a high-quality electron beam. This technology is expected to transition soon from physics experiments to practical uses (flash therapy, electron sources, light sources, etc.). Obtaining the required beams is a difficult challenge. Within the laser-plasma interaction, several key parameters, such as the laser distribution and plasma profile, must be selected carefully to control the final electron beam properties and generate a high-quality electron beam. This step relies on a massive campaign of Particule-in-Cell (PIC) simulations. Then, the electron beam must be transported to the target via conventional magnetic elements. This requires controlling the extracting beam from the plasma and designing an adapted transfer line with beam dynamics codes. This work is performed in the frame of the EARLI project, a LWFA expected as an electron injector for the AWAKE experiment.

Simulation of heavy atom ionization for ultra-high intensity laser diagnostics in PIC codes

A. A. Mironov¹, S. V. Popruzhenko², M. Grech³, C. Riconda¹

¹ LULI, Sorbonne Université, CNRS, CEA, École Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris, F-75252 Paris, France

² Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow 119991, Russia

³ LULI, CNRS, Sorbonne Université, CEA, École Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris, F-91128 Palaiseau, France

The accurate measurement of the ultra-high intensity of a multi-PW laser pulse at the focus is so far not possible and the laser intensity is extrapolated from low-intensity measurements. Yet it is crucial information for most upcoming experiments at future laser facilities of this class like Apollon, ELI-Beamlines, or CoReLS, and for studies of laser-plasma interaction effects. A recently proposed idea [1,2] for measuring such high intensities relies on sequential tunnel ionization of heavy atoms like Ar or Xe in a strong field. Being highly non-linear, the ionization process is extremely sensitive to field strength, and might be utilized for *in situ* measurements of intensities exceeding 10^{21} W/cm².

Building a proper diagnostic requires an accurate simulation tool. We discuss some aspects of simulating the process of heavy atom ionization in PIC codes, particularly, in SMILEI [3], based on the setup with a strong laser pulse illuminating initially neutral or not strongly ionized gas. We investigate the effect of the ionization model choice, as it might affect the resulting ion mixture prediction, and therefore the associated laser intensity. We suggest possible refinements for the widely used Perelomov-Popov-Terent'ev theory in order to improve its accuracy.

References

- [1] M. F. Ciappina, S. V. Popruzhenko, S. V. Bulanov, T. Ditmire, G. Korn, and S. Weber, Progress toward atomic diagnostics of ultrahigh laser intensities, *Physical Review A* **99**, 043405 (2019).
- [2] M. F. Ciappina, E. E. Peganov, and S. V. Popruzhenko, Focal-shape effects on the efficiency of the tunnel-ionization probe for extreme laser intensities, *Matter and Radiation at Extremes* **5**, 044401 (2020).
- [3] J. Derouillat, A. Beck, F. Pérez, T. Vinci, M. Chiaramello, A. Grassi, M. Flé, G. Bouchard, I. Plotnikov, N. Aunai, et al., SMILEI: a collaborative, open-source, multi-purpose particle-in-cell code for plasma simulation, *Computer Physics Communications* **222**, 351 (2018).

Investigation of ultra-high dose rate effects on Fricke dosimeter with laser driven very high-energy electron beam

A. Panchal¹, G. Baldacchino¹, P. Forestier-Colleoni¹, T. Ceccotti¹, S. Dobosz Dufrenoy¹, C. Giacaglia², A. Flacco²

¹ Université Paris-Saclay, CEA, CNRS, LIDYL, 91191 Gif-sur-Yvette, France

² LOA, ENSTA Paris, CNRS, Ecole Polytechnique, Institute Polytechnique de Paris, 91120 Palaiseau, France

Radiotherapy is one of the primary modalities of cancer treatment. Flash radiotherapy (FLASH-RT) is a novel technique in which delivery of ultra-high dose rate irradiation reduces toxicity of surrounding normal tissue while still maintaining tumour control. At present, FLASH-RT is recognised as one of the most promising breakthrough in radiation oncology; however, the underlying physical and biological mechanisms remain unclear.

Laser-driven particle sources are promising sources for FLASH RT as they are able to deliver ultra-high dose rate, because of their extreme short duration. One objective of the community is to develop dosimetry systems adapted to such new irradiation modalities. We want to study the Fricke dosimetry, also called ferrous sulphate dosimetry, which is sensitive to dose rate effects^[1]. This technique depends on the oxidation of ferrous ions (Fe^{2+}) to ferric ions (Fe^{3+}) by ionizing radiation. The Fricke dosimeter is 96% water by weight; hence strongly influenced by the water reactions to ionizing radiation.

This dose rate effect was identified with ns electron beams^[2] from conventional accelerator, showing a decrease of the Fe^{3+} yields with dose rate of 10^8 Gy/s. What happens to Fe^{3+} yields when irradiated by electron beams with dose rates up to 10^{12} Gy/s? Results from experiments performed in collaboration with A. Flacco's team at LOA in the Salle Jaune experimental facility will be presented.

References

- [1] Willis, C., et al. "Experimental and calculated yields in the radiolysis of water at very high dose rates." *International Journal for Radiation Physics and Chemistry* 1.3 (1969): 373-381.
- [2] Trupin-Wasselin, Virginie. Primary processes in radiation chemistry. LET (Linear Energy Transfer) effect in water radiolysis. No. FRCEA-TH-782. CEA/Saclay, 2000.

Etude expérimentale de l'équation d'état du nitrure de bore par ondes de choc en conditions extrêmes

D. Singappuli¹, D. Batani¹, D. Raffestin¹, K. Batani², P. Nicolai¹, D. Margarone³, A. Martynenko⁴, M. Huault⁵

¹ CELIA

² IPPLM

³ ELI BEAMLINES

⁴ GSI

⁵ Université de Salamanque

La fusion par confinement inertielle (FCI) est intensément étudiée et constitue l'un des plus grands enjeux de l'humanité. Elle repose sur l'irradiation indirecte par faisceaux laser d'une cible sphérique en trois couches : l'ablateur (plastique ou diamant), le combustible (glace deutérium-tritium) et le cœur (D-T gazeux). Avec la montée en température, l'ablateur se transforme en plasma tandis qu'une onde de choc se propage en direction opposée. Lorsque le cœur de la cible brûle, les réactions de fusion commencent et l'énergie est libérée.

De récentes études suggèrent que le nitrure de bore (ses propriétés sont proches du diamant) comme ablateur, permettrait un meilleur couplage entre le laser et la capsule. Il faut donc connaître l'équation d'état de cet élément. Les données obtenues pour le bore et ses composés à des pressions supérieures à 1 Mbar sont extrêmement rares, ne permettant pas une réelle validation des modèles théoriques. Notre campagne expérimentale au Prague Asterix Laser System reposait sur l'irradiation directe par laser intense ($I \sim 2 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$) d'une cible constituée d'aluminium en face avant, et de deux couches distinctes de nitrure de bore et de quartz en face arrière. La génération du choc par laser est étudié via deux diagnostics, le VISAR et la SOP. Le premier utilise un laser à impulsion qui va sonder le mouvement de la face arrière puis entrer dans un interféromètre. En sortie, une streak camera imagent les franges d'interférences obtenues lors du débouché du choc dans les différents matériaux et sa vitesse associée. Le second permet d'enregistrer l'émission thermique de la face arrière de la cible et de retrouver la température du milieu choqué. De plus, les équations de conservation d'Hugoniot-Rankine et à la méthode de désadaptation d'impédance sont nécessaires afin de trouver un point de l'équation d'état du matériau. Cette expérience au PALS a fourni des éléments préliminaires sur le nitrure de bore en conditions extrêmes.

References

- [1] E.Knittle, R.M.Wentzcovitch, R.Jeanloz & M.L.Cohen "Experimental and theoretical equation of state of cubic boron nitride, *Nature* 337, 349–352
- [2] Shuai Zhang, et al. "Equation of state of boron nitride combining computation, modeling, and experiment" *Phys. Rev. B* 99, 165103
- [3] Shuai Zhang, Burkhard Militzer, Michelle C. Gregor, Kyle Caspersen, et al. "Theoretical and experimental investigation of the equation of state of boron plasmas" *Phys. Rev. E* 98, 023205

Stability of ablation flows in inertial-confinement fusion: Receptivity

J.-G. Thiriet^{1,2}, J.-M. Clarisse¹, A. Couairon²

¹ CEA

² Ecole Polytechnique

Inertial confinement fusion (ICF) consists in the implosion of a spherical pellet by means of a high energetic irradiation in order to trigger thermonuclear reactions. During the early stage of the implosion, the so-called shock transit stage involves an ablation flow: a supersonic shock wave preceding a subsonic ablation front. Controlling hydrodynamic instabilities during this phase is crucial to achieve a sufficiently homogeneous implosion. Perturbation dynamics of ablation flows have been classically analyzed according to two configurations: irradiation asymmetries [2] or initial external-surface defects. A common practice for analysing perturbations in ablation flows is to set a well-chosen initial perturbation and to study its dynamics. This way of proceeding is incomplete since it could miss critical initial perturbations that could grow in the flow. To overcome this defect, we advocate for nonmodal stability analyses of ablation flows. This approach is capable of identifying perturbation growth at all time horizons as opposed to modal stability analysis which can yield only asymptotic stability results. In a previous work, a local nonmodal stability analysis has indicated the possibility of initial transient growth of perturbations for a model ablation flow [3]. Perturbation transient growth at finite times was subsequently confirmed by a full nonmodal stability analysis [1] leading to the identification of corresponding (optimal) initial perturbations and of distinct mechanisms of transient growth for short and long time horizons. The present work aims at characterizing perturbations that would preexist in the flow upstream to the leading shock front and that would yield such optimal initial perturbations. This problem is equivalent to a flow receptivity analysis to upstream perturbations of the shock front. Results analysis are paramount to the definition of initial conditions for the numerical simulation of instabilities in more realistic flows.

References

- [1] P. J. Schmid and D. S. Henningson. Stability and transition in shear flows. Springer, 2001
- [2] R. Taylor, J. Dahlburg, A. Iwase, et al. Phys. Rev. Letter, 76:1643, 1996
- [3] G. Varillon, J.-M. Clarisse, and A. Couairon. Phys. Rev. E, 103:023211, Feb 2021

Experimental study of laser-plasma interaction in the multi-beams configuration in the context of laser driven inertial confinement thermonuclear fusion

Vilayphone Kévin¹, Depierreux Sylvie¹ and many others at CEA¹

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

Inertial confinement fusion (ICF) experiments are currently mostly realized with the indirect drive approach. In this scheme, numerous laser beams are shot in a cavity called ‘hohlraum’. As the hohlraum is vaporized into a plasma, the laser energy is then converted into X rays which irradiates the fuel-filled capsule, placed in the center of the cavity. The combustible is heated and implodes, leading to fusion reactions [1]. The hohlraum is a place where laser-plasma interaction can lead to instabilities such as stimulated Raman scattering (SRS). This non-linear mechanism is described by the coupling of a large amplitude incident light wave with a scattered light wave and an electron plasma wave (EPW). As SRS was revealed to be a major source of energy losses in experiments at NIF [2] and on the Omega Laser Facility [1], SRS is an important mechanism to master in order to optimize the laser energy deposited in the cavity. Here, we show that the SRS temporal evolution could be a way to study energy transfer between crossing beams. Moreover, the analysis of SRS spectra at different beam angles with varying laser energies shows that there may be side-scattering of Raman light from a beam towards the direction of another one. A possible explanation could be the stimulation of a common EPW by the two incident beams in their crossing region (an analogous mechanism has been shown for Stimulated Brillouin Scattering [3]). Finally, further studies are necessary as light refraction in the cavity, collisional absorption and Landau damping are non-negligible mechanisms [4,5] which have not been taken into account in our studies.

References

- [1] Masson-Laborde, P. E. et al. ”Laser plasma interaction on rugby hohlraum on the Omega Laser Facility: Comparisons between cylinder, rugby, and elliptical hohlraums”, *Physics of Plasmas* 23, 022703 (2016).
- [2] Hinkel, Denise et al. “Stimulated Raman scatter analyses of experiments conducted at the National Ignition Facility a.” *Physics of Plasmas* 18 (2010).
- [3] Neuville, C et al. “Experimental Evidence of the Collective Brillouin Scattering of Multiple Laser Beams Sharing Acoustic Waves.” *Physical review letters* vol. 116,23 (2016).
- [4] Depierreux, S et al. “Experimental Investigation of the Collective Raman Scattering of Multiple Laser Beams in Inhomogeneous Plasmas.” *Physical review letters* vol. 117,23 (2016).
- [5] Depierreux, S., Yahia, V., Goyon, C. et al. “Laser light triggers increased Raman amplification in the regime of nonlinear Landau damping.” *Nat Commun* 5, 4158 (2014).