



## Laser acceleration of particles in plasmas / Accélération laser de particules dans les plasmas

## Foreword

Charged particles can easily be accelerated to quite high energies in plasmas due to electromagnetic fields. These acceleration mechanisms are not necessarily welcomed as they can obstruct possible applications, as in the case of inertial confinement fusion, where suprathermal electrons produced by the laser–plasma interaction can degrade the quality of the preceding compression. On the other hand, since about thirty years, plasma physicists tried to favor these acceleration mechanisms to obtain particle beams of high quality. The first attempts were made on electrons, which can be accelerated up to a GeV and more, in relatively low density plasmas (between  $10^{14}$  and  $10^{20}$   $\text{cm}^{-3}$ ), with accelerating electric fields up to a fraction of GeV/cm. Since about ten years an intense activity has also developed on ions sources, with ultra-intense laser pulses interacting with thin foils. Accelerating fields are in the MeV/ $\mu\text{m}$  range, protons being accelerated to energies up to 60 MeV on present facilities.

This special issue presents a general overview of experimental and theoretical works on acceleration of particles in plasmas. Authors represent eleven countries implied in these researches (Canada, China, France, Germany, Italy, Japan, Portugal, Russia, Sweden, United Kingdom, and United States of America).

The first article by Malka and Mora is a tentative synthesis of laser–plasma accelerators, with an historical presentation of studies on the electron and ion acceleration.

The following articles are devoted to electron acceleration in plasmas. The first one, by Muggli and Hogan, presents experiments in which the accelerating field is not due to a laser interacting with a plasma, in contrast with the other articles of this issue, but to a primary electron beam propagating in a low density plasma. This type of experiment enabled to double the energy of 42 GeV electrons in an 85 cm long plasma.

The three next articles present experimental results on laser–plasma acceleration of electrons, together with some numerical simulations. The first one (Leemans and his collaborators) presents the results obtained at Berkeley, where electrons up to 1 GeV were obtained by laser–plasma interaction in capillaries in the cm range. The paper by Veisz and his collaborators addresses the regime corresponding to ultra-short laser pulses, limited to a few optical cycles and to 40 mJ, with which quasi-monoenergetic electrons of 50 MeV were obtained. Finally Faure and his collaborators propose a method of optical injection of electrons in the accelerating field, in which two counter-propagating laser beams collide inside the plasma.

The two following articles, by Pukhov and his collaborators and by Silva and his collaborators, present analytical and numerical results on different regimes of acceleration of electrons in under-dense plasmas, in particular in the bubble regime, which delighted so much physicists by its very favorable properties, which were discovered in a numerical study of Pukhov and Meyer-ter-Vehn in 2002. The simulations of Silva and his collaborators predict electrons up to 20 GeV with the future lasers of power 10 PW, energy 300 J, and pulse duration 30 fs.

The remaining articles are devoted to ion acceleration, with two mainly experimental articles, and three mainly theoretical and numerical articles. Fuchs and his collaborators present the acceleration mechanism that is considered in nowadays experiments as the relevant one (acceleration at the back of a thin foil irradiated by an ultra-short laser pulse), together with the characteristics of the resultant ion beams, optimization methods, and examples of applications. Carroll and his collaborators, on the same subject, present methods of angular control and improvement of the quality of the ion beams using multiple laser pulses.

The article of Lefebvre and his collaborators is devoted to the numerical study of ion acceleration for different density profiles of the irradiated targets, and to the heating of a secondary target with the ion beams created at the

back of a first target. Macchi and his collaborators address the role of the laser polarization and show that a circular polarization enables a more direct acceleration by the radiation pressure of the laser light, at the front surface of the foil. The simulations help determining the optimal thickness of the foils and analyzing the multi-dimensional effects. The last contribution, by Bulanov and his collaborators, studies analytically the radiation pressure dominated regime, with a special attention to the Rayleigh–Taylor instabilities which may cause the breaking of the plasma slab into separated clumps.

Finally, I would like to thank Victor Malka who helped me making the selection of the contributions of this special issue and contacting the authors.

## *Avant-propos*

*On sait depuis longtemps que dans les plasmas des particules chargées peuvent être accélérées à haute énergie par les champs électromagnétiques y régnant. Initialement, ces phénomènes d'accélération n'étaient pas particulièrement les bienvenus, dans la mesure où ils pouvaient contrarier les applications potentielles des plasmas étudiés, comme dans le cas de la fusion contrôlée par confinement inertiel, où les électrons suprathermiques créés par interaction laser–plasma pouvaient dégrader la qualité de la phase de compression préalable. Mais, depuis une trentaine d'années, les physiciens des plasmas ont au contraire cherché à favoriser ces mécanismes d'accélération de particules de façon à obtenir des faisceaux de grande qualité. Les efforts ont d'abord porté sur les électrons, que l'on sait maintenant accélérer jusqu'au GeV et au-delà, dans des plasmas de faible densité (entre  $10^{14}$  et  $10^{20}$  cm<sup>-3</sup>), avec des champs accélérateurs atteignant une fraction de GeV/cm. Depuis une dizaine d'années, une intense activité s'est également développée sur les sources d'ions, à partir de l'interaction d'impulsions laser ultra-intenses avec des cibles minces. Les champs accélérateurs obtenus sont alors de l'ordre du MeV/μm, les protons pouvant être accélérés jusqu'à 60 MeV sur les installations actuelles.*

*Ce dossier présente donc un tour d'horizon des travaux expérimentaux et théoriques sur l'accélération de particules dans les plasmas. Les auteurs représentent onze pays impliqués dans ces recherches (Allemagne, Canada, Chine, États-Unis, France, Italie, Japon, Portugal, Royaume-Uni, Russie, et Suède).*

*Le premier article de Malka et Mora tente une synthèse des accélérateurs de particules laser–plasma. On y trouve en particulier une présentation historique succincte à la fois des études sur l'accélération des électrons et de celles sur l'accélération des ions.*

*Les articles qui suivent sont consacrés à l'accélération d'électrons dans les plasmas. Le premier d'entre eux, par Muggli et Hogan, a la particularité de présenter des expériences dans lesquelles le champ accélérateur n'est pas dû à un laser, comme dans les autres expériences présentées dans ce dossier, mais à un faisceau d'électrons (dits primaires) traversant un plasma peu dense. Ce type de montage a permis de doubler l'énergie d'électrons de 42 GeV sur une longueur de plasma de 85 cm.*

*Suivent trois articles consacrés à la présentation des résultats expérimentaux sur l'accélération laser–plasma d'électrons, agrémentés de simulations numériques. Le premier (Leemans et ses collaborateurs) présente les résultats obtenus à Berkeley, où des accélérations d'électrons jusqu'à 1 GeV ont été obtenus par interaction laser–plasma dans des capillaires centimétriques. L'article de Veisz et de ses collaborateurs porte sur le régime correspondant à des impulsions laser extrêmement courtes, limitées à quelques cycles optiques, et à 40 mJ seulement, mais permettant d'obtenir des électrons quasi-monoénergétiques de 50 MeV. Enfin Faure et ses collaborateurs nous proposent une méthode d'injection optique des électrons dans un champ accélérateur, méthode qui consiste à faire se rencontrer au sein du plasma deux faisceaux laser se propageant l'un vers l'autre, l'injection se produisant à l'endroit où les deux faisceaux se croisent.*

*Les deux articles qui suivent, de Pukhov et de ses collaborateurs et de Silva et de ses collaborateurs, présentent des résultats théoriques sur les régimes d'accélération d'électrons dans les plasmas sous-denses, en particulier sur le régime dit de la bulle qui a tant réjoui les physiciens par ses propriétés très favorables, lesquelles avait été mises en évidence numériquement par Pukhov et Meyer-ter-Vehn en 2002. Les simulations de Silva et de ses collaborateurs prédisent des électrons atteignant 20 GeV avec les futurs lasers de puissance 10 PW, d'énergie 300 J, et de durée d'impulsion 30 fs.*

*Le dossier se poursuit avec les articles consacrés à l'accélération d'ions. Les deux premiers sont à dominante expérimentale, les trois derniers à dominante théorique et numérique. Fuchs et ses collaborateurs présentent le mécanisme d'accélération considéré comme celui qui est à l'œuvre dans les expériences récentes (accélération en face*

arrière d'une cible mince irradiée par une impulsion laser ultra-courte), ainsi que les caractéristiques des faisceaux d'ions obtenus, les méthodes d'optimisation, et des exemples d'applications. Carroll et ses collaborateurs, sur la même thématique, présentent des méthodes de contrôle angulaire et d'amélioration des qualités des faisceaux d'ions, grâce à l'utilisation de plusieurs faisceaux laser.

L'article de Lefebvre et de ses collaborateurs est consacré à l'étude numérique de l'accélération ionique pour différents profils de densité des cibles irradiées, et du chauffage d'une cible secondaire à l'aide des faisceaux ioniques créés en face arrière d'une cible primaire. Macchi et ses collaborateurs s'intéressent au rôle de la polarisation du laser incident, et montre qu'une polarisation circulaire permet une accélération plus directe par la pression de rayonnement du laser, en face avant de la cible mince. Les simulations permettent de déterminer l'épaisseur optimale des cibles à utiliser et d'analyser les effets multi-dimensionnels. La dernière contribution, de Bulanov et de ses collaborateurs, étudie analytiquement le régime dominé par la pression de radiation, avec une attention particulière portée aux instabilités de type Rayleigh–Taylor pouvant causer la fragmentation transverse de la tranche de plasma accélérée.

Pour terminer, je voudrais remercier Victor Malka qui m'a aidé à effectuer la sélection des contributions qui sont présentées dans ce dossier, et à en contacter les auteurs.

Patrick Mora  
Centre de physique théorique,  
École polytechnique,  
91128 Palaiseau cedex, France  
E-mail address: [patrick.mora@cpht.polytechnique.fr](mailto:patrick.mora@cpht.polytechnique.fr)  
Available online 27 May 2009