

Dynamique de formation des chocs non collisionnels induits par l'instabilité de Weibel

C. RUYER - L. GREMILLET / CEA – DAM Île-de-France

G. BONNAUD / CEA – Saclay

C. RICONDA / Laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses (LULI), UMR 7605 CNRS – CEA – École polytechnique – Université Pierre-et-Marie-Curie, Palaiseau

Les instabilités électromagnétiques induites dans l'interaction de plasmas à grande vitesse peuvent engendrer des chocs dits non collisionnels, dans lesquels les interactions onde-particule se substituent aux collisions coulombiennes usuelles. Ces structures, auxquelles on attribue l'origine des rayons cosmiques dans divers contextes astrophysiques, paraissent désormais à la portée d'expériences laser. Cet article relate l'étude des conditions de formation à l'aide de simulations cinétiques et propose un modèle analytique reproduisant les résultats numériques.

Les micro-instabilités cinétiques induites lors de collisions de plasmas à grande vitesse sont un sujet fondateur de la physique des plasmas. Leur omniprésence dans les plasmas naturels et artificiels a motivé un nombre considérable d'études au cours des dernières décennies. Une classe spécifique d'instabilités, identifiée par Weibel [1] et qui se manifeste par la formation de filaments magnétisés, suscite un intérêt de longue date en raison de son influence sur le transport des particules dans l'interaction laser-plasma ainsi que dans des systèmes astrophysiques de haute énergie (supernovae, vents stellaires ou

de pulsars, etc.), où elle contribue également à la génération de particules de très haute énergie, les rayons cosmiques [2]. Dans ce dernier cas, le scénario envisagé est le suivant : les filaments électromagnétiques induits par l'instabilité de Weibel lors du télescopage de deux plasmas à grande vitesse (>1000 km/s) défléchissent et ralentissent ceux-ci, jusqu'à la création d'une onde de choc si la durée d'interaction est assez longue. On parle alors de choc non collisionnel, car les fluctuations électromagnétiques y assurent la dissipation habituellement causée en hydrodynamique par les collisions coulombiennes. De

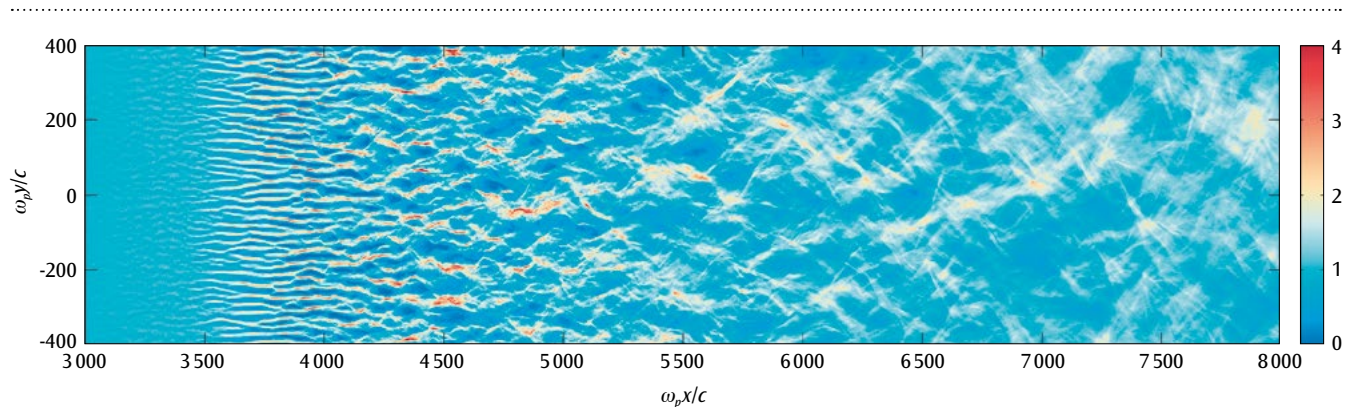


Figure 1. Simulation de type particle-in-cell de la collision entre deux plasmas symétriques de vitesses $\pm 0,4 c$ (où c est la vitesse de la lumière) et pour un rapport des masses électron-ion $m_i/m_e=400$. La figure représente la carte de densité des ions venant de la gauche (n_i , normalisée à sa valeur initiale), et montre leur filamentation et leur diffusion au cours de l'interaction. Les distances sont mesurées en épaisseur de peau électronique $c/\omega_{pe} = 5,3 \times 10^2 n_e^{-1/2}$ cm (où n_e est la densité électronique exprimée en cm^{-3}).

fait, le libre parcours moyen collisionnel dans de tels systèmes est bien plus grand que la zone de transition du choc et, *a fortiori*, que les échelles caractéristiques de la microturbulence. La variation de la vitesse de déplacement des fluctuations magnétiques de part et d'autre du front de choc permet alors, par réflexions successives des particules, une accélération jusqu'à des énergies potentiellement considérables ($<10^{15}$ eV pour les rayons cosmiques d'origine galactique). En outre, en se propageant en amont du choc, les particules accélérées y entretiennent l'instabilité de Weibel, ce qui permet l'autorégulation du choc. Parallèlement, ces particules émettent, par rayonnement synchrotron, un large spectre de photons énergétiques à l'origine des sursauts gamma [2].

Reproduire en laboratoire de tels phénomènes constituerait une formidable avancée pour la validation des modèles astrophysiques, mais aussi pour la compréhension fondamentale des plasmas cinétiques. À cette fin, des collaborations entre physiciens des plasmas et astrophysiciens ont été établies, qui ont donné lieu à plusieurs expériences prometteuses de collisions de plasmas sur des lasers de puissance [3]. Le CEA - DAM a conduit des travaux théoriques, récemment publiés dans *Physical Review Letters* [4], qui s'inscrivent dans le cadre de ces investigations. Il a d'abord été montré qu'un modèle quasi linéaire précédemment développé [5] reproduit correctement l'instabilité de Weibel observée sur l'installation Omega, aux États-Unis, dans des collisions de plasmas de vitesse 2 000 km/s et de densité particulaire avoisinant $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ [3]. Afin de comprendre la dynamique non linéaire de l'instabilité jusqu'à l'isotropisation totale des ions, des simulations cinétiques de type particle-in-cell (PIC) ont été effectuées au moyen du code CALDER [6] (figure 1). Ces calculs ont révélé l'influence auparavant négligée du rapport des masses ion-électron, généralement sous-estimé dans les simulations du fait de fortes contraintes numériques. Cette influence résulte de l'écrantage des microcourants ioniques par les électrons, dont l'efficacité dépend de la taille des filaments relativement à l'épaisseur de peau électronique. Ces résultats ont été interprétés à l'aide d'un modèle analytique prédisant l'évolution spatio-temporelle de la turbulence par coalescences successives des filaments. Une formule de la

longueur de formation du choc a notamment été obtenue; compte tenu du rôle de l'écrantage électronique, elle s'avère plus contraignante que les lois d'échelles utilisées à ce jour.

En dépit de ses approximations, le modèle ainsi développé constitue un outil complémentaire aux simulations cinétiques pour la conception et l'analyse des expériences de collisions de plasmas. En particulier, il impose une énergie laser minimum d'environ 100 kJ par cible ablatée pour la création d'un choc non collisionnel en laboratoire: des conditions accessibles sur la National Ignition Facility, aux États-Unis, où sont menés de premiers tests – infructueux à ce stade, probablement en raison de diagnostics insuffisamment résolvants et de plasmas trop denses, et donc collisionnels.

Références

- [1] E. S. WEIBEL, "Spontaneous growing transverse waves in a plasma due to an anisotropic velocity distribution", *Phys. Rev. Lett.*, **2**, p. 83-84 (1959).
- [2] M. V. MEDVEDEV, A. A. LOEB, "Generation of magnetic fields in the relativistic shock of gamma-ray burst sources", *Astrophys. J.*, **526**, p. 697-706 (1999).
- [3] W. FOX *et al.*, "Filamentation instability of counterstreaming laser-driven plasmas", *Phys. Rev. Lett.*, **111**, 225002 (2013); C. M. HUNTINGTON *et al.*, "Observation of magnetic field generation via the Weibel instability in interpenetrating plasma flows", *Nat. Phys.*, **11**, p. 173-176 (2015).
- [4] C. RUYER, L. GREMILLET, G. BONNAUD, C. RICONDA, "Analytical predictions of field and plasma dynamics during nonlinear Weibel-mediated flow collisions", *Phys. Rev. Lett.*, **117**, 065001 (2016).
- [5] C. RUYER, L. GREMILLET, A. DEBAYLE, G. BONNAUD, "Nonlinear dynamics of the ion Weibel-filamentation instability: An analytical model for the evolution of the plasma and spectral properties", *Phys. Plasmas*, **22**, 032102 (2015).
- [6] E. LEFEBVRE *et al.*, "Electron and photon production from relativistic laser-plasma interactions", *Nucl. Fusion*, **43**, p. 629-633 (2003).