

Titre : Interaction Laser-Plasma et Fusion par confinement inertiel
Sigle : O8
Coordinateur de l'UE : Sylvie DEPIERREUX, Benoit CANAUD (CEA/DAM)
Equipe pédagogique : Sylvie DEPIERREUX, Benoit CANAUD, Frédéric PEREZ
Prérequis : Masters M1 de Physique fondamentale.
Crédits : 3 ECTS
Langue : Français/Anglais
Mots-clefs : Interaction Laser-Matière. Plasmas générés par laser & Fusion inertielle. Fusion thermonucléaire.

Ce module comprend deux parties. La première est consacrée à l'interaction laser-plasma. On y aborde les mécanismes non-linéaires de mélange d'ondes inhérents à la propagation d'une onde de grande amplitude dans un plasma et les couplages résonnants qui en découlent. La force pondéromotrice est décrite ainsi que ses effets sur le plasma comme l'autofocalisation. On présente aussi la diffusion Thomson comme une méthode puissante de diagnostic du plasma et les différentes instabilités paramétriques comme la diffusion Raman stimulée. Enfin diverses applications sont présentées.

La seconde partie expose les concepts généraux de la fusion par confinement inertiel: compression, chauffage, allumage, gain. On rappelle les concepts fondamentaux de la fusion thermonucléaire et le principe du confinement. On introduit les notions de température de Post et le critère de Lawson. Différents schémas de fusion à gain y sont présentés, comme l'allumage isobare, l'allumage rapide et l'allumage par choc. L'hydrodynamique des plasmas créés par laser offre l'occasion d'aborder les notions d'écoulement auto-semblable ou de chocs. Les modes de transport de l'énergie thermique au sein de la cible sont détaillés.

Interaction laser-plasma

Dans cette partie, on étudie les mécanismes non-linéaires qui se développent lors de la propagation d'une onde électromagnétique laser intense dans un plasma. Pour ce type d'onde, un développement des équations de propagation de l'onde laser et des ondes acoustique ionique et plasma électronique jusqu'au deuxième ordre est nécessaire. De nouveaux mécanismes de couplage non-linéaire entre ces modes apparaissent.

Un premier effet, appelé force pondéromotrice, amène à une expulsion des électrons des zones de plus fortes intensités. Pour un faisceau de dimension transverse finie, de profil gaussien par exemple, la force pondéromotrice conduit à une modification de l'indice optique dans la direction transverse à la propagation, produisant l'effet d'une lentille plasma. Cette force conduit dans ce cas à une concentration de l'énergie du faisceau sur une plus petite tache focale ou autofocalisation du faisceau (Fig.1a). Pour des faisceaux de très courte durée, de l'ordre de quelques femtosecondes, la dimension finie de l'impulsion laser entraîne une mise en mouvement des électrons dirigée dans le sens de propagation de l'impulsion pour le début d'impulsion et dans le sens opposé pour la fin d'impulsion (Fig. 1b).

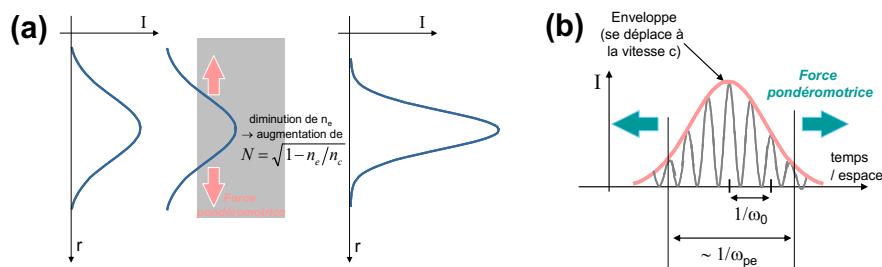


Fig. 1 : deux effets de la force pondéromotrice. (a) autofocalisation d'un faisceau gaussien ; (b) excitation d'une onde plasma électronique par une impulsion courte.

Le deuxième effet non-linéaire existe pour toute onde électromagnétique incidente dans un plasma. Il s'agit du terme de courant résultant de l'oscillation des électrons dans le champ électrique de l'onde électromagnétique incidente. Ce terme de courant est source d'une onde électromagnétique diffusée. Pour un faisceau incident de faible intensité ou sonde, il donne lieu à la diffusion de la sonde sur les fluctuations de densité dans le plasma encore appelée « diffusion Thomson ». Au-delà d'un seuil en intensité pour le faisceau incident, ces deux termes non-linéaires (force pondéromotrice et courant non-linéaire) amènent au couplage instable de l'onde électromagnétique incidente avec une onde plasma et une onde électromagnétique diffusée. Cette instabilité à trois ondes est représentée schématiquement sur la Fig. 2. L'énergie de l'onde laser incidente entretient l'instabilité qui amplifie à la fois l'onde diffusée et l'onde plasma. Ces instabilités sont appelées « diffusion Raman stimulée » ou « diffusion Brillouin stimulée » selon qu'elles impliquent une onde plasma électronique ou une onde acoustique ionique.

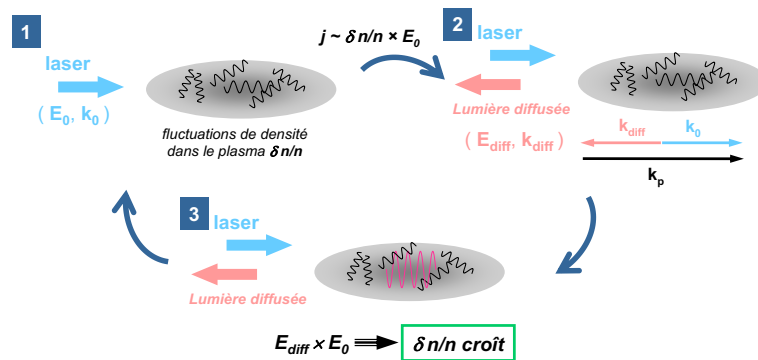


Fig 2 : Représentation schématique des instabilités de diffusion (couplage à trois ondes)

Tous ces mécanismes sont décrits dans les cours ainsi que différents aspects expérimentaux de l'interaction laser-plasma.

Ces mécanismes ont d'abord été étudiés dans le contexte de la fusion thermonucléaire contrôlée par confinement inertiel laser (FCI). L'interaction laser-plasma est ici l'une des premières thématiques à maîtriser puisqu'elle vise à optimiser l'efficacité et la qualité du dépôt de l'énergie laser. Dans ce contexte, l'autofocalisation nuit à la bonne propagation du laser alors que les instabilités de diffusion stimulée conduisent à des pertes significatives d'énergie laser sous forme de rétrodiffusion. Dans les configurations multi-faisceaux de l'attaque directe et de l'attaque indirecte en FCI, le battement pondéromoteur entre les ondes laser incidentes elles-mêmes modifie profondément l'interaction laser-plasma dans les régions de croisement des faisceaux laser. Cet aspect de l'interaction laser-plasma sera aussi traité dans le cours.

L'interaction laser-plasma amène aussi à de nombreuses applications qui seront aussi abordées dans ce cours. Les instabilités de diffusion Raman et Brillouin stimulées sont étudiées aujourd'hui en tant que technique pour l'amplification d'impulsions courtes. Ces schémas d'amplification d'impulsions courtes dans des plasmas visent à repousser les limites vers les ultra-hautes intensités au-delà de la limite technologique de tenue au flux des réseaux inhérente à la traditionnelle méthode d'amplification d'impulsions à dérive de fréquence.

Fusion par confinement inertiel

Dans cette partie, on expose les principes généraux de la fusion par confinement inertiel (FCI), ainsi que les principaux problèmes de physique des plasmas qui lui sont associés. Après un rappel détaillé des réactions nucléaires mises en jeu, des concepts de physique nucléaire et des différentes voies de la fusion nucléaire, on introduit les éléments fondamentaux de la fusion thermonucléaire tels que la réactivité thermique et la notion de confinement qui conduit à la définition de la température de Post ou du critère de Lawson.

Ensuite, on aborde le confinement inertiel et la notion d'allumage par point chaud et ses différentes variantes (auto-allumage isobare, allumage par choc dit non-isobare, allumage « rapide ») pour s'intéresser à l'implosion d'une cible et sa compression. On introduit ainsi la notion d'énergie cinétique minimale d'allumage isobare et les différentes voies de la fusion par confinement inertiel (attaque directe de la cible par le rayonnement laser ou attaque indirecte après conversion du rayonnement laser en rayonnement X). On poursuit par la description de l'hydrodynamique des plasmas créés par laser tels que l'écoulement que déclenche l'interaction laser-matière, les chocs, qui jouent un rôle important dans la mise en vitesse des couches internes, ou la conduction de l'énergie thermique, en particulier entre la zone d'absorption de l'énergie et les parties plus internes de la cible. Pour cette dernière, on aborde la conduction de Spitzer-Härm qui, dans les situations extrêmes rencontrées en FCI, n'est plus correcte et doit évoluer vers une théorie non linéaire et non locale. Enfin, on présentera les mécanismes délétères de l'implosion que sont les instabilités hydrodynamiques qui dégradent la symétrie que l'on voudrait parfaitement sphérique.

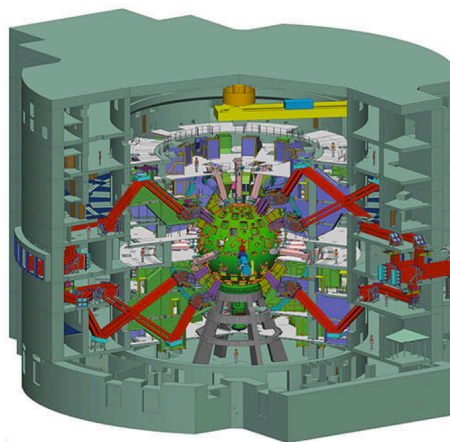


Fig 3 : Expérience de fusion thermonucléaire inertielle