

PHYSIQUE NUCLEAIRE AVEC DES LASERS ULTRA INTENSES

Groupe Excitations Nucléaires par Lasers du CENBG

Introduction

Les années 1990-2000 ont vu l'émergence de lasers Ultra Haute Intensité (UHI) basés sur le principe de l'amplification à dérive de fréquence. Cette technique permet d'obtenir des impulsions lasers de durées très courtes (entre 10 fs et 300 ps) avec une énergie par impulsion comprise entre 30 mJ et 100 J et un taux de répétition allant de 10^3 Hz à 1 Hz. Ces faisceaux sont focalisés sur des surfaces de l'ordre de $30 \mu\text{m}^2$. Leurs puissances crêtes sont de l'ordre de la dizaine de terawatts (TW) et les intensités sur cible atteignent 10^{20} W/cm². Les trois caractéristiques des lasers UHI qu'il nous paraît intéressant d'explorer sont les suivantes.

L'interaction d'un laser avec la matière se traduit instantanément par la formation d'un plasma dense et chaud.

L'onde électromagnétique et le plasma ne sont pas indépendants. L'onde laser se couple au plasma y générant ainsi des perturbations locales de la charge électrique et de la densité qui sont à l'origine de champs électriques et de champs magnétiques. Ces champs à leur tour sont à l'origine des différents mécanismes d'accélération des particules chargées dans l'interaction laser plasma.

Accélération par la force pondéromotrice \vec{F}_p :

Elle traduit l'interaction du champ électrique du laser avec un électron libre du plasma. C'est une force radiale qui accélère les électrons dans toutes les directions. Les électrons quittent alors le volume focal avec une énergie cinétique moyenne $E = Up$. La valeur de Up pour des électrons relativistes est donnée en fonction de l'intensité du laser par :

$$Up(\text{MeV}) = 0.511 \left[\sqrt{1 + 0.85 I^{18} \lambda^2} - 1 \right]$$

où I^{18} est l'intensité laser en unité de 10^{18} W/cm² et λ sa longueur d'onde exprimée en μm .

Accélération par sillage :

L'onde électromagnétique induit une séparation locale des charges négatives et positives. Celle-ci, due à l'expulsion d'électrons hors de la région de focalisation sous l'effet de \vec{F}_p , est à l'origine d'une onde plasma électronique (OPE) et de la création d'un champ électrique longitudinal, \vec{E}_p , dirigé dans la direction de propagation de l'onde électromagnétique. \vec{E}_p atteint 10^{11} V/m. Cette OPE ne peut pas se développer au delà de la densité critique du plasma $N_c \sim 10^{21}$ e⁻/cm³. Certains électrons libres du plasma peuvent être piégés lors de son

développement. Ils sont alors accélérés par le champ sur une longueur maximum correspondant à une demi-longueur d'onde de l'OPE. L'énergie des électrons dépend du rapport N_e/N_c qui détermine la fréquence de l'OPE. L'énergie maximale et le nombre d'électrons accélérés dépendent de la forme, de la durée et du contraste de l'impulsion laser, de la période de l'OPE et donc de la densité électronique du plasma et, des conditions d'injection dans le sillage de l'OPE.

Accélération de particules chargées lourdes H^+ , ions lourds :

Aussitôt après la mise en évidence de faisceaux d'électrons rapides, il a été montré que les lasers UHI pouvaient également être utilisés pour produire des faisceaux de H^+ et d'ions lourds sous un potentiel moyen de 10 MV. Le potentiel d'accélération est généré par les électrons rapides qui quittent la cible et qui la chargent positivement. Les faisceaux de particules obtenus ont une divergence de quelques milliradians. Leur distribution en énergie est exponentielle. Le nombre de H^+ d'énergie supérieure au MeV est de l'ordre de 10^{10} par impulsion. La variation de l'énergie des protons avec $I\lambda^2$ est linéaire, ceci permet d'envisager des potentiels d'accélération de 100 MeV/unité de charge en utilisant des lasers pétawatts .

Développements envisagés:

- Création de faisceaux d'électrons mono-énergétiques en maîtrisant les conditions d'injection des électrons dans l'OPE.
- Augmentation de l'énergie maximale en utilisant le mécanisme d'accélération par le laser d'électrons pré-accélérés par sillage.
- Augmentation du nombre d'électrons par impulsion en maîtrisant les conditions de l'amorçage de l'OPE.
- Investigation complète de l'effet de la nature des cibles sur les caractéristiques des faisceaux d'électrons et de protons.

Collaborations: LOA, CEA, University of Iena

Les réactions nucléaires dans un plasma ont des caractéristiques particulières

liées à la présence et à l'agitation des ions et à la densité importante des électrons et des photons. Nous nous intéressons ici d'une part à la photoexcitation et à la désexcitation des isomères (applications directement liées au problème du stockage / déstockage de l'énergie et au développement du laser gamma) et d'autre part à la modification des processus nucléaires (par exemple, les taux de réactions). Nous travaillons actuellement, au laboratoire CELIA de l'université Bordeaux1, à une expérience de photoexcitation du niveau à 6 keV de durée de vie 6 μs dans ^{181}Ta . Des expériences réalisées dans des conditions proches rapportent la production d'une centaine d'isomères par impulsion.

Nous mentionnons pour mémoire les travaux sur la recherche de l'effet NEET (Nuclear Excitation by Electronic Transition) dans un plasma de ^{235}U induit par un laser de 10^{13}W/cm^2 . Ces travaux nous ont permis de développer une méthode expérimentale et d'améliorer par deux ordres de grandeur la sensibilité de ce type de mesure par rapport aux expériences antérieures. Nous pensons possible d'installer le dispositif expérimental tel que nous l'avons développé sur des lasers plus puissants (LULI, ALIZE). L'intérêt de ces lasers par rapport au laser utilisé au CENBG serait de pouvoir atteindre les conditions de résonance entre les énergies du système électronique et les énergies du système nucléaire, aux alentours de $T = 100\text{ eV}$, dans une zone dense et sur un volume de plasma plus important.

Développements envisagés:

- Mesure de la photo excitation du ^{181}Ta au CELIA, RAL
- Mesure de l'effet NEET dans ^{235}U LULI ALIZE

Collaborations: Univ. of Glasgow, CELIA Univ. Bordeaux1, CEA DAM Bruyères-le-Chatel

Le champ électrique dans la zone focale de l'impulsion laser est de 10^{11}V/m .

Une approche traditionnelle consiste à dire que dans le champ du laser la fonction d'onde de l'électron libre n'est plus une onde plane mais une fonction de Volkov. De la même manière la présence d'un champ laser affecte profondément la description des états électroniques liés. Il résulte de l'interaction entre l'électron lié et le champ électromagnétique du laser un déplacement des niveaux d'énergie de l'électron appelé "effet Stark dynamique" ou encore déplacement lumineux. L'effet du déplacement des énergies des niveaux atomiques lié à la présence du champ laser a été observé expérimentalement dans des expériences de photo-ionisation des atomes par un laser. Celles-ci montrent que pour provoquer l'ionisation de l'atome il faut fournir au photo-électron une énergie égale à son énergie de liaison augmentée de l'énergie pondéromotrice correspondant au déplacement du continuum. Ces expériences ont été effectuées à des intensités laser relativement faibles 10^{14} W/cm^2 , qui conduisent à des potentiels pondéromoteurs de l'ordre de 10 eV . Les résultats sont en accord avec les prédictions des théories perturbatives qui sont encore applicables dans ce domaine d'intensité. Dans le cas où la valeur de U_p devient de l'ordre de grandeur du MeV on peut s'attendre à un effet du champ laser sur les décroissances radioactives nucléaires qui mettent en jeu les électrons du cortège électronique par exemple, la conversion interne (CI). Dans le cas où l'énergie U_p est supérieure à l'énergie de la transition nucléaire E_γ on peut s'attendre à une sérieuse altération du taux de CI comparé à sa valeur en l'absence du laser. Le même raisonnement s'applique à toutes les décroissances nucléaires qui mettent en jeu le cortège

électronique, par exemple, la décroissance β . Que devient le taux de décroissance en présence d'un laser délivrant des intensités de l'ordre de 10^{20}W/cm^2 ?

Développements envisagés:

Mise au point d'une méthode expérimentale pour étudier l'influence d'un champ laser sur la CI. Les lasers utilisés pourraient être le LULI ou celui du RAL.

Collaborations: Univ. of Glasgow, univ. of Iena, LULI