

## Comprendre et modéliser l'interaction des ions avec les plasmas denses

**La compréhension des mécanismes physiques associés à l'interaction des ions lourds avec la « matière dense et chaude » est essentielle dans le cadre des recherches liées à la fusion thermonucléaire initiée par des faisceaux d'ions, et plus généralement dans le domaine en plein essor de la physique des hautes densités d'énergie. Par comparaison avec la matière froide, les processus élémentaires d'interaction dans les plasmas tels que l'ionisation, l'échange de charge et les processus de recombinaison, sont profondément affectés par le fait que la matière est chaude et ionisée. Mais ces modifications restent actuellement mal caractérisées et méconnues.**

**Des expériences récentes menées par une équipe du LULI<sup>1</sup>, combinées à une analyse des données reposant sur un modèle d'évolution des états de charge des ions développé dans l'équipe « Agrégats et surfaces sous excitation intense » de l'INSP, ont permis d'obtenir les tout premiers résultats dans ce domaine.**

Dans le dispositif expérimental utilisé (Fig. 1), une impulsion laser (B1) d'une durée de 320 fs et de 1 J d'énergie totale produit deux paquets d'ions ultracourts et identiques de part et d'autre de la cible de mylar irradiée. Un de ces paquets d'ions est directement analysé en énergie et état de charge par un spectromètre à parabole de Thomson (P1). L'autre traverse une cible mince d'aluminium avant d'être analysé par un deuxième spectromètre de Thomson (P2). La cible d'aluminium peut être portée à haute température ( $\geq 1\text{eV}$ ) par chauffage isochorique induit par protons. L'impulsion de protons rapides est générée de façon synchrone par une seconde impulsion laser ultracourte, B2 (même durée de 320 fs et 4 J d'énergie). Ces expériences ont montré que pour les températures relativement modestes atteintes ici, on n'observe pas de différence significative entre les spectres obtenus pour une cible froide et une cible « chaude ».

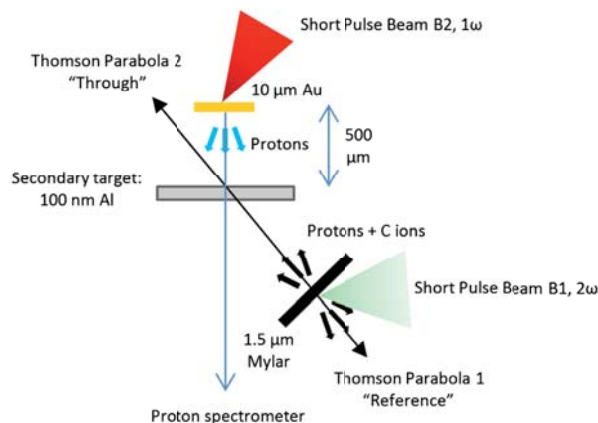
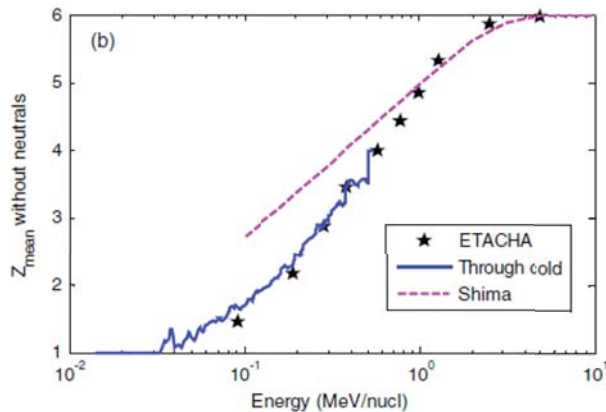


Figure 1  
Dispositif expérimental.

La figure 2 présente un « spectre » d'états de charge moyens obtenu dans le cas d'une cible froide. On peut voir que le modèle de Shima, couramment utilisé, est en désaccord avec les mesures. Rappelons que ce modèle, basé sur une formule analytique établie de façon empirique à partir de données expérimentales, ne donne accès qu'à l'état de charge moyen en sortie de cible. Par contre, les résultats d'une simulation effectuée à l'aide d'une version toute récente de notre code ETACHA, qui prédit l'évolution de population de chaque état du cortège électronique de l'ion traversant une cible d'épaisseur donnée, montre un accord extrêmement satisfaisant. Notre code ETACHA (pour ETats de CHArges) repose sur la résolution d'un système d'équations différentielles couplées gouvernant l'évolution des états de charge en fonction de l'épaisseur de cible traversée sous l'effet des processus élémentaires collisionnels (capture, excitation, ionisation,) et de relaxation radiative et Auger. Le calcul *ab initio* de la probabilité de ces processus, effectué par le programme, a été récemment étendu au régime des vitesses intermédiaires concerné par ces expériences.



**Figure 2**  
*Comparaison des résultats expérimentaux (ligne continue bleue) avec le modèle empirique de Shima (ligne pointillée violette) et les résultats du calcul ab initio par le modèle ETACHA (étoiles noires).*

Au final, deux conclusions importantes découlent de ce travail :

- Pour des températures modérées comme celles atteintes ici (11,6 103 K), où le degré d'ionisation et d'excitation de la cible reste négligeable, on n'observe pas de différence notable de la distribution d'états de charge et de la perte d'énergie des ions par rapport au cas de la matière froide,
- Le modèle ETACHA, combiné aux mesures évoquées ici, a fait la preuve de sa capacité à décrire les phénomènes physiques intervenant dans le cas de la matière froide, et devrait donc permettre de quantifier les modifications affectant les processus élémentaires dans le cas des plasmas denses et très chauds.

La prochaine étape de ces expériences consistera à répéter ces mesures avec d'autres ions et à des températures nettement plus élevées, telles celles que l'on peut atteindre (jusqu'à 100 eV soit plus du million de K) en utilisant un laser X à électrons libres (XFEL).

## Référence

“Charge Equilibrium of a Laser-Generated Carbon-Ion Beam in Warm Dense Matter”

M. Gauthier, S. N. Chen, A. Levy, P. Audebert, C. Blancard, T. Ceccotti, M. Cerchez, D. Doria, V. Floquet, E. Lamour, C. Peth, L. Romagnani, J. -P. Rozet, M. Scheinder, R. Shepherd, T. Toncian, D. Vernhet, O. Willi, M. Borghesi, G. Faussurier, J. Fuchs  
*Physical Review Letters*, Vol. 110, N°135003, 2013

## Contact

dominique.vernhet@insp.jussieu.fr