

SOURCES X CRÉÉES PAR LASER : DU MULTI-KEV AU MULTI-MEV

M. PRIMOUT, A. COMPANT LA FONTAINE, C. COURTOIS, F. GIRARD,
L. JACQUET, E. LEFEBVRE, P. RENAUDIN, B. VILLETTE
CEA - DAM - ÎLE-DE-FRANCE

Pour les besoins de ses programmes, le CEA-DAM développe des sources de rayonnement X couvrant une large plage d'énergie de photons, du keV au multi-MeV, en privilégiant, selon les applications, la monochromaticité, la brièveté, l'intensité ou la faible taille des sources. Celles-ci peuvent être utilisées pour des expériences de radiographie, de diffusion ou de diffraction sur différents types de cibles, depuis des matériaux choqués par explosif jusqu'aux cibles plasma du futur Laser Mégajoule. Plusieurs schémas de cibles sont à l'étude, reposant soit sur le rayonnement émis dans une cible de conversion par un faisceau d'électrons énergétiques, soit sur l'émission thermique d'un plasma chauffé.

Sources X en impulsions picosecondes

Le rayonnement X multi-MeV est produit dans le premier type de sources par des électrons relativistes subissant de multiples collisions dans une cible de conversion. Ces électrons sont produits par l'interaction d'une impulsion laser brève et intense, soit directement avec la cible, soit dans un jet de gaz placé juste devant celle-ci. Ce dernier schéma produit des doses X plus élevées et un lobe d'émission plus directif, mais il est aussi plus délicat à maîtriser expérimentalement.

Entre ces deux extrêmes, les conditions d'interaction du schéma "cible solide" peuvent aussi être modifiées en créant un pré-plasma sur la face avant de la cible à l'aide d'un faisceau laser de chauffage. Les codes d'interaction laser-plasma CALDER et de transport de particules MCNP ont été couplés pour simuler de façon complète une telle configuration. Pour une faible extension du pré-plasma, nous observons une augmentation de l'ouverture angulaire du lobe d'émission électronique et des variations aléatoires de son pointé. Ces effets sont attribués à une forte filamentation du faisceau laser dans le pré-plasma dense. En augmentant le délai entre le faisceau de chauffage et le faisceau d'interaction,

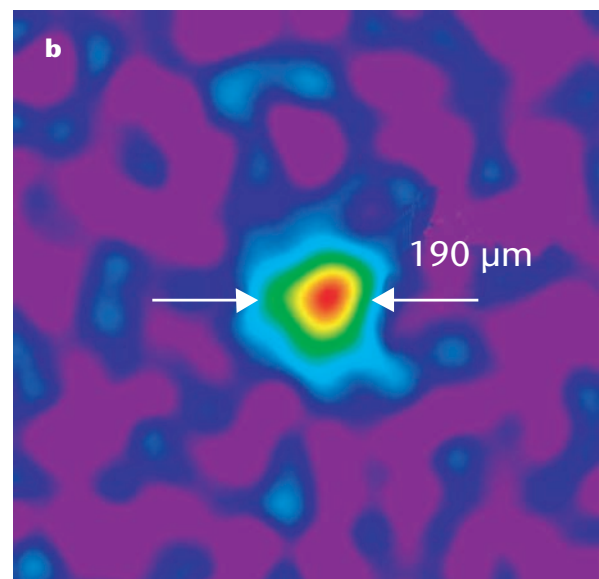
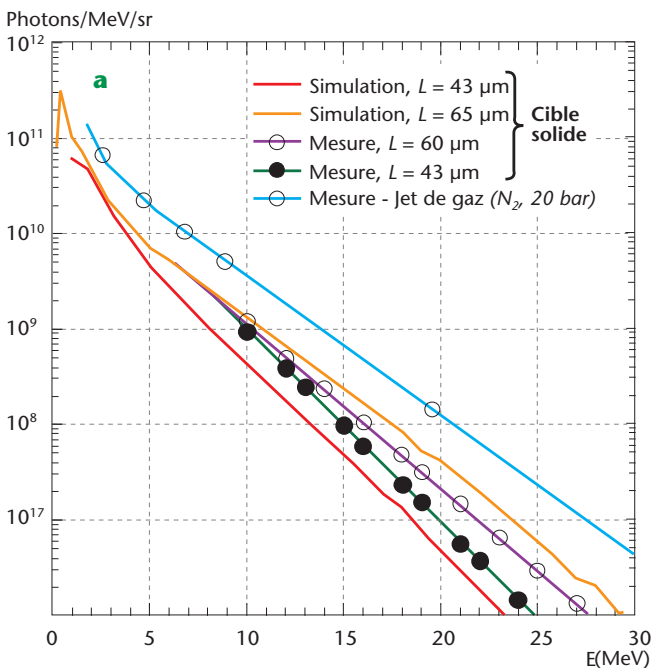


Figure 1

a Spectres d'émission X (simulés et mesurés) obtenus sur cible solide pour différentes longueurs de plasma et sur jet de gaz.
b Image reconstruite de la source X obtenue par imagerie de pénombre.

ce dernier finit toutefois par rencontrer un pré-plasma sous-critique dans lequel la filamentation diminue et l'absorption augmente. En accord avec ces calculs, nous avons ainsi observé lors d'expériences sur le laser Alisé du CEA-CESTA que la dose X et la « dureté » du spectre d'émission (figure 1a) sont d'autant plus élevées que le pré-plasma est long [1]. La figure 1b montre une image déconvoluée de la source X mesurée par imagerie de pénombre. Ses faibles dimensions, inférieures à 200 µm, rendent ces sources X multi-MeV potentiellement intéressantes pour des applications de radiographie qui nécessitent de bonnes résolutions spatiale et temporelle.

Un schéma expérimental similaire permet de générer des sources X multi-keV utiles pour caractériser les propriétés spectrales des plasmas denses [2], via des mesures de

Pour des cavités tapissées de titane (figure 2), les valeurs maximales de rendement X entre 4 et 6 keV mesurées expérimentalement s'élèvent à 17,6 % [4], ce qui est nettement plus élevé que les meilleurs rendements obtenus avec les feuilles minces explosées. Ceci peut être attribué à l'effet de confinement à la fois hydrodynamique et radiatif du plasma métallique, lié à la géométrie de cavité. Pour des cavités tapissées de germanium, les meilleurs taux de conversion mesurés entre 9 et 13 keV sont de l'ordre de 1 %, soit légèrement inférieurs aux valeurs optimales obtenues avec des feuilles minces. Ces expériences ont fait l'objet d'un travail d'interprétation effectué avec le code hydroradiatif 2D FCI2. Pour les sources de titane, les taux de conversion calculés sont nettement inférieurs aux mesures. Les causes possibles de ce désaccord sont en cours d'exploration.

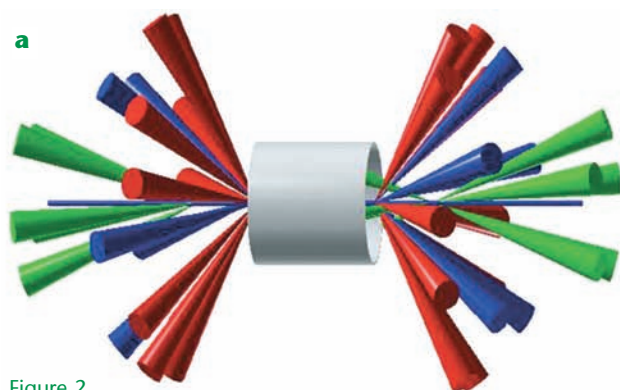


Figure 2

- a Schéma d'irradiation d'une cavité tapissée de titane.
- b Image sténopé intégrée en temps de la même cavité cylindrique dans le domaine X durs.



spectroscopie d'absorption. L'émission X est cette fois d'origine thermique et provient du plasma chauffé en volume dans la cible par les électrons relativistes issus de la zone d'interaction laser-matière. Les résultats d'une expérience réalisée au LULI (Laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses) en collaboration avec des équipes du LULI et du CELIA ont permis d'utiliser les caractéristiques du rayonnement multi-keV produit pour remonter aux propriétés thermodynamiques du plasma émetteur. Ces données permettent de tester la validité de certaines hypothèses liées à la propagation des électrons et à leur couplage avec la cible solide.

Sources X multi-keV en impulsions nanosecondes

Après plusieurs expériences sur l'émission de feuilles minces métalliques [3], nos travaux sur les sources X multi-keV produites à l'aide d'impulsions laser kJ/ns se sont orientés vers l'étude de sources en cavités cylindriques tapissées de métal sur leur face interne. Plusieurs campagnes expérimentales ont été conduites sur le laser Omega (États-Unis) pour tester ces géométries et étudier l'influence sur le rendement de conversion X des dimensions de la cavité, de la forme et de la puissance de la loi d'irradiation laser ainsi que la nature du métal utilisé.

Perspectives

Les études présentées ci-dessus se poursuivront en 2009 sur les différentes installations auxquelles le CEA-DAM a accès – Alisé, LULI, Omega, Gekko XII – [5]. Elles nous permettront de poursuivre nos progrès tant dans la maîtrise expérimentale que dans la compréhension du fonctionnement des sources X créées par laser.

Références

- [1] C. COURTOIS *et al.*, "Effect of plasma density scale length on the properties of Bremsstrahlung x-ray sources created by picosecond laser pulses", *Phys. Plasmas*, **16**, 013105 (2009).
- [2] P. RENAUDIN *et al.*, "Spectroscopie d'absorption picoseconde d'un plasma produit par un laser intense ultrabref", *Chocs*, **36**, p. 68-77 (2008).
- [3] D. BABONNEAU *et al.*, "Efficient multi-keV X-ray sources from laser-exploded metallic foils", *Phys. Plasmas*, **15**, 92702 (2008).
- [4] M. PRIMOUT *et al.*, "Recent progress in metal-lined cylindrical hohlraum as efficient multi-keV X-ray sources", *J. Phys.: Conf. Ser.*, **112**, 042051 (2008).
- [5] M. TANABE *et al.*, "Titanium dioxide nanofiber-cotton targets for efficient multi-keV x-ray generation", *Appl. Phys. Lett.*, **93**, 051505 (2008).