

Des Accélérateurs Laser-Plasma aux Sources de Rayonnement X : Etude, Développement et Applications

Sébastien Corde

*Laboratoire d'Optique Appliquée, ENSTA ParisTech-CNRS UMR7639-École Polytechnique,
Chemin de la Hunière, 91761 Palaiseau, France*

Lors de l'interaction relativiste entre une impulsion laser brève et intense et un plasma sous-dense, des électrons peuvent être injectés et accélérés jusqu'à plusieurs centaines de MeV dans une structure accélératrice se formant dans le sillage de l'impulsion laser : c'est l'accélérateur laser-plasma. Une des applications majeures de ces accélérateurs réside dans le développement de sources compactes de faisceaux de rayonnement X femtoseconde.

Deux sources de rayonnement X basées sur les accélérateurs laser-plasma sont étudiées : le rayonnement bétatron et la diffusion Compton contre-propagative. Le rayonnement bétatron est produit naturellement dans l'accélérateur laser-plasma. Il est dû aux forces focalisantes présentes dans le sillage de l'impulsion laser. Les électrons en accélération oscillent autour de l'axe de propagation et émettent des rayons X appelés bétatron. Dans le cas de la diffusion Compton contre-propagative, le paquet d'électrons, après avoir été accéléré par l'accélérateur laser-plasma, entre en collision avec une impulsion laser contre-propagative, et oscille transversalement dans le champ de l'impulsion laser, émettant alors des photons de haute énergie.

Au delà de la démonstration de ces deux sources de rayonnement X très brillantes, leur potentiel pour des expériences d'applications a été mis en évidence et le rayonnement X bétatron a été utilisé comme diagnostic de l'interaction, permettant une meilleure compréhension de l'interaction laser-plasma relativiste.

En collaboration avec le groupe de J. C. Kieffer à l'INRS au Canada, une série d'expériences a été réalisée sur le système ALLS (Advanced Laser Light Source) qui produit des impulsions de 2.5 J avec une durée de 30 fs (FWHM). Des électrons et des rayons X bétatron ont été produits en focalisant l'impulsion laser dans un jet de gaz. Les rayons X bétatron ainsi créés ont, pour la première fois, été caractérisés par comptage de photons [1]. Après optimisation de la source, un faisceau de rayonnement X avec une divergence de 28 mrad (FWHM) et contenant 10^9 photons distribués dans un spectre synchrotron ayant une énergie critique supérieure à 10 keV [2], a été produit. Les propriétés de la source, telles que le nombre de photons, l'énergie des photons, la divergence du faisceau mais aussi la taille micrométrique de la source, sont très prometteuses pour les applications. Une image à contraste de phase d'une abeille [2] a par exemple pu être réalisée, une technique qui tire avantage de la taille micrométrique de la source bétatron. Le nombre de photons par tir était assez élevé pour obtenir une image à contraste de phase à partir d'un seul tir laser.

Dans une expérience réalisée au Laboratoire d'Optique Appliquée (LOA) en France, une source Compton tout-optique dans une gamme d'énergies allant de quelques dizaines de keV à quelques centaines de keV [3] a été démontrée. Cette expérience représente une avancée majeure pour le domaine des sources de rayonnement X basées sur l'interaction laser-plasma relativiste. Un nouveau schéma, combinant un accélérateur laser-plasma et un miroir plasma, a été utilisé. Il permet de s'affranchir de la nécessité d'avoir une deuxième impulsion laser et garantit la superposition systématique entre le faisceau d'électrons et l'impulsion laser contre-propagative. L'impulsion laser se propage dans un plasma sous-dense et entraîne l'auto-injection et l'accélération des électrons dans son sillage. En positionnant une cible solide à la fin de l'interaction, le

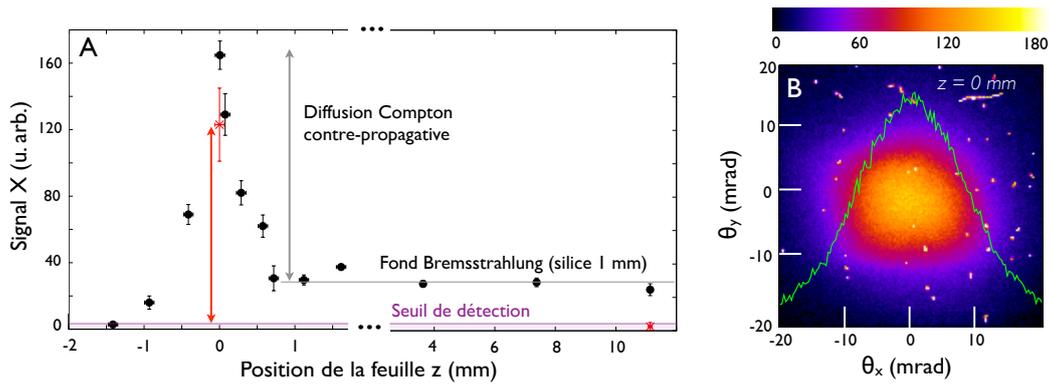


FIGURE 1 – **Diffusion Compton contre-propagative.** (A) Évolution du signal X en fonction de la position de la feuille z le long de l’axe de propagation du laser. La feuille est constituée d’un mm de verre de silice pour les données en cercles noirs, et de $300\ \mu\text{m}$ de plastique pour les données en croix rouges. (B) Profil angulaire du rayonnement X Compton.

front montant de l’impulsion laser transforme la feuille en un miroir plasma sur lequel l’impulsion laser se réfléchit. Juste après la réflexion, l’impulsion laser entre en collision avec le faisceau d’électrons, aboutissant à l’émission de photons Compton de haute énergie. En utilisant le système laser de la salle jaune du LOA, qui produit une impulsion laser de 1 J avec une durée de 35 fs (FWHM), un faisceau Compton de rayonnement gamma (voir figure 1) a été produit avec une durée de l’ordre de la femtoseconde, une taille de source micrométrique, une divergence de 18 mrad (FWHM) et un total de 10^8 photons dans un spectre large s’étendant jusqu’à quelques centaines de keV. Sa brillance pic a été estimée à 10^{21} photons/s/mm²/mrad²/0.1%BW à 100 keV, 10000 fois plus élevée que celle des sources Compton conventionnelles [4, 5].

L’émission de rayonnement X bêta-tron peut également être utilisée pour une application plus fondamentale, la compréhension de la physique sous-jacente à l’accélération laser-plasma.

Un diagnostic innovant, permettant de cartographier longitudinalement la région d’émission X dans un accélérateur laser-plasma pour obtenir des informations détaillées sur la physique de l’accélération laser-plasma [6], a été développé. La méthode de mesure, basée sur l’observation, dans le profil angulaire du rayonnement X bêta-tron, de l’ombre d’un petit diaphragme positionné juste après la région d’émission, est monocoup. Ce diagnostic a permis de montrer qu’à haute densité, l’émission X bêta-tron commence plus tôt pendant la propagation du laser dans le plasma et la longueur de la ligne d’émission X mesurée est beaucoup plus élevée qu’attendue. Des simulations PIC montrent que ces comportements peuvent être expliqués comme étant la conséquence, d’une part, de la dynamique d’auto-focalisation et d’auto-compression de l’impulsion laser, plus rapide à haute densité, et d’autre part, de l’excitation d’un sillage par le faisceau d’électrons lui-même en fin d’interaction.

Une deuxième expérience s’est focalisée sur la production de rayonnement bêta-tron par des faisceaux d’électrons stables et contrôlables, en utilisant le principe de l’injection optique [7]. Ce contrôle offre une opportunité unique pour étudier en détail les mécanismes physiques à l’origine du rayonnement bêta-tron. Les résultats montrent une forte corrélation entre les propriétés du rayonnement X et les paramètres du faisceau d’électrons, et ils sont bien reproduits par un modèle simple de rayonnement généré par un faisceau d’électrons en accélération dans une cavité ionique. Ils confirment ainsi l’origine du rayonnement observé et valident l’utilisation du modèle de cavité ionique.

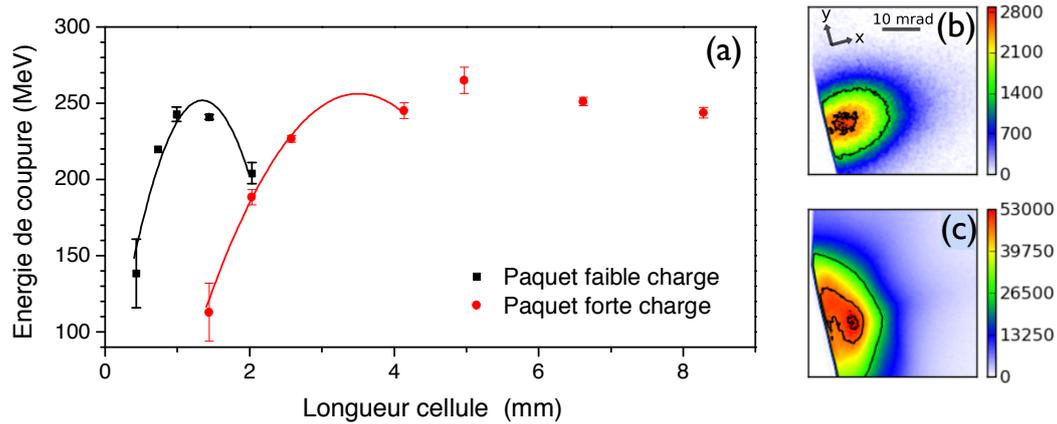


FIGURE 2 – **Auto-injection longitudinal et transverse.** (a) Énergie de coupure en fonction de la longueur de la cellule pour les deux types d’auto-injection. (b)-(c) Profils angulaires du rayonnement bétatron produit dans le cas de l’auto-injection longitudinale (b) et transverse (c).

Enfin, en utilisant une cellule de gaz à longueur variable, une étude multicoup de l’accélération laser-plasma et de la production de rayonnement X bétatron en régime d’auto-injection [8] a été réalisée. En effet, grâce au contrôle de la longueur de la cellule, l’accélération progressive des électrons a pu être observée et le champ accélérateur pic et la longueur de déphasage de l’accélérateur laser-plasma ont été mesurés. Elle a également permis une autre observation : l’injection successive de deux paquets d’électrons, de faible et de forte charge. Les propriétés très différentes des deux paquets et de leur rayonnement X (voir figure 2) ont permis d’identifier leur origine. Les deux paquets correspondent à deux mécanismes d’injection différents, l’auto-injection longitudinale et l’auto-injection transverse.

Références

- [1] S. Fourmaux, S. Corde *et al.*, *Demonstration of the synchrotron-type spectrum of laser-produced Betatron radiation*, *New J. Phys.* **13**, 033017 (2011).
- [2] S. Fourmaux, S. Corde *et al.*, *Single shot phase contrast imaging using laser-produced Betatron x-ray beams*, *Opt. Lett.* **36**, 2426 (2011).
- [3] K. Ta Phuoc, S. Corde *et al.*, *All-optical Compton gamma-ray source*, *Nature Photon.* **6**, 308 (2012).
- [4] R. W. Schoenlein, W. P. Leemans *et al.*, *Femtosecond X-ray Pulses at 0.4 angstrom Generated by 90 degrees Thomson Scattering : A Tool for Probing the Structural Dynamics of Materials*, *Science* **274**, 236 (1996).
- [5] F. Albert, S. G. Anderson *et al.*, *Characterization and applications of a tunable, laser-based, MeV-class Compton-scattering γ -ray source*, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **13**, 070704 (2010).
- [6] S. Corde, C. Thaury *et al.*, *Mapping the X-Ray Emission Region in a Laser-Plasma Accelerator*, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 215004 (2011).
- [7] S. Corde, K. Ta Phuoc *et al.*, *Controlled Betatron X-Ray Radiation from Tunable Optically Injected Electrons*, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 255003 (2011).
- [8] S. Corde, C. Thaury *et al.*, *Observation of longitudinal and transverse self-injections in laser-plasma accelerators*, *Nat. Commun.* **4**, 1501 (2013).