

Etude de la matière sous conditions extrêmes sur les installations FEL

M. Harmand¹, S. Toleikis¹, T. Tschentscher² et al.

¹DESY, Notkestr. 85, 22607 Hamburg, Germany

²European XFEL GmbH, Albert-Einstein-Ring 19, 22761 Hamburg, Germany

mél: marion.harmand@desy.de

Ces dernières années, l'essor des lasers à électrons libres (Free Electron Laser, FEL) a donné lieu à des résultats scientifiques particulièrement innovants et prometteurs [1, 2]. Plus spécifiquement, les paramètres FEL tels qu'une brillance élevée, des durées d'impulsion extrêmement brèves et une longueur d'onde variable ouvrent de nouvelles perspectives pour la communauté de la physique des plasmas. Entre autre l'interaction d'un laser FEL avec la matière permet un chauffage homogène et en volume [1, 3-5] et le développement de diagnostics X permettent d'étudier des régimes particuliers de la matière tel que la matière dense et tiède. De plus, la durée ultra-brève (10fs – 200fs) du rayonnement FEL permet d'accéder à des dynamiques ultra rapides et donc d'observer des régimes hautement transitoires.

Introduction : la matière dense et tiède WDM

La matière dense et tiède (ou WDM pour Warm Dense Matter) est un régime de la matière à la frontière de l'état solide et du plasma (cf figure 1). Il est trop dense pour être décrit comme un plasma quasi - idéal (à faible couplage), pour lequel les modèles cinétiques et fluides sont adaptés. Il est aussi trop chaud pour être décrit par les modèles de la matière condensée [3]. Les températures caractéristiques de la WDM s'étendent de 0.1 à 100 eV et les densités sont de 0.1 à 10 fois celle du solide.

L'intérêt pour la WDM s'explique par sa présence récurrente dans de nombreux systèmes physiques. Le régime WDM intervient dans des domaines aussi variés que l'astrophysique [6], la planétologie [7-9] ou encore les processus d'ablation et d'usinage par laser à plus petite échelle. C'est encore la WDM que l'on retrouve dans la plupart des transitions solide - plasma. Il constitue par conséquent une étape clé dans la fusion par confinement inertiel [10,11]. L'étude de la matière dense et tiède représente aussi de véritables enjeux pour la modélisation de la relaxation de l'énergie [12]. Les processus et temps caractéristiques pour atteindre l'équilibre thermodynamique local sont d'une importance capitale pour appréhender l'opacité, les propriétés optiques de la WDM ou encore les équations d'états [13,14].

Mesurer et comprendre l'articulation entre la densité, la température, l'organisation globale et locale de la matière, en étroite relation avec les théories et modèles actuels permettrait d'avancer dans notre compréhension de ce régime de la matière. Pour cela, réaliser des expériences « pompes – sondes » impliquant laser ultra intenses et FEL est une approche prometteuse pour créer et sonder des dynamiques ultra rapides (fs - ps) de matériaux soumis à des impulsions d'intensité très élevée. A ceci, est venu s'ajouter la démonstration de diagnostics très performants qui insérés dans des expériences de type « pompe – sonde » permettent de suivre des processus et dynamiques ultra rapides impliqués lors des transitions matière condensée - matière dense et tiède - plasma. Les résultats expérimentaux obtenus permettront aussi de résoudre certaines questions fondamentales sur l'interaction photon – matière.

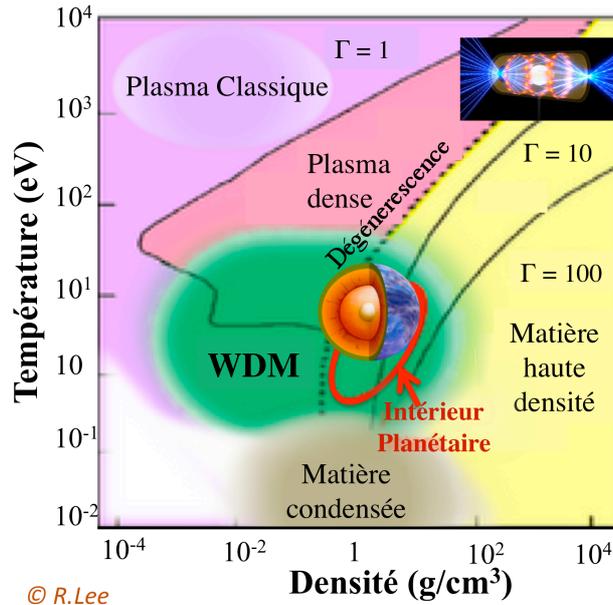


Figure 1 : Diagramme de phase de l'Aluminium

La matière dense et tiède sur les installations FEL

L'étude des plasmas et de la matière dense et tiède est une thématique de plus en plus explorée sur les installations FEL. En effet, plusieurs publications ont démontré l'intérêt de ce type de sources X ultra-brèves, pour des études sur la WDM et même plus généralement pour l'étude de plasmas denses [1-5]. L'intérêt de ce type d'installation est double : la durée d'impulsion attendue varie d'environ 10 à 200 fs ce qui permet un chauffage très rapide, homogène et isochore jusqu'à plus de 100eV [5] ; l'utilisation de rayonnement X permet de sonder la matière en volume et d'en étudier l'ordre global ou local.

1) Créer la matière dense et tiède

Dans le cas de l'interaction d'un rayonnement FEL avec la matière, la photoionisation et l'ionisation collisionnelle sont deux processus fondamentaux à l'origine de ce régime hautement transitoire [15]. En effet, dans la gamme des rayons X et XUV, la photoionisation, donnant lieu à un électron primaire (photoélectrons ou électrons Auger), est rapidement suivie par l'ionisation collisionnelle des électrons primaires puis secondaires dans un milieu dense. De premières expériences réalisées sur l'Aluminium chauffé par le faisceau XUV-FEL (92eV, $2 \cdot 10^{14}$ W/cm²) ont permis d'identifier un processus de dépôt de l'énergie singulier [1, 4], appelé saturation de couche et basé sur des processus d'ionisation extrêmement brefs.

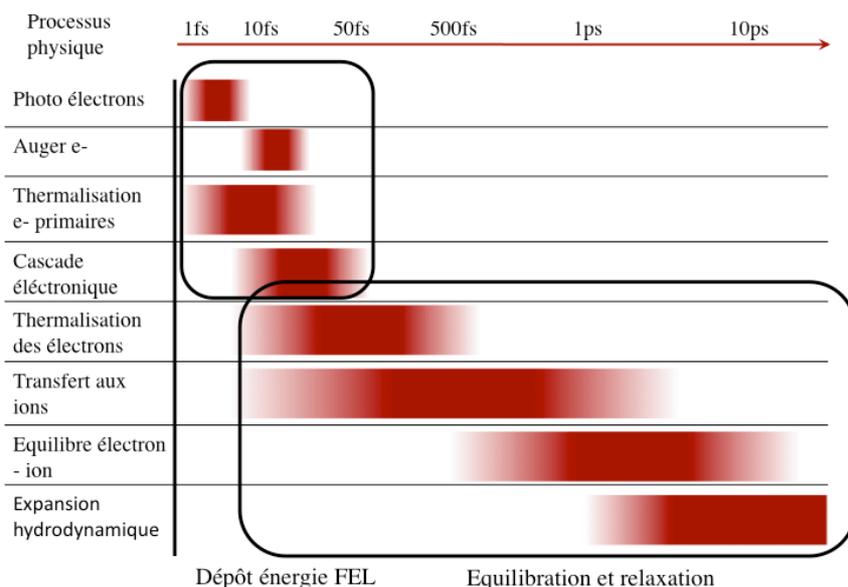


Figure 2 : Temps caractéristiques mis en jeu lors de l'interaction d'un FEL avec la matière.

2) Sonder la matière dense et tiède

Les installations FEL permettent aussi de véritables avancées pour sonder la matière sous conditions extrêmes. La diffusion X en est un exemple [2,13,16,17]. Ce diagnostic permet la caractérisation en volume des plasmas en accédant à la température, à la densité et aux informations structurales du matériau chauffé (facteur de structure). De part des sections efficaces de diffusion très faible et des décalages spectraux mesurés très faibles, la diffusion X requiert une source X très brillante et de très faible largeur spectrale. Les installations XFEL se pose naturellement comme des candidates idéales pour ce type d'expérience [2].

A FLASH et au sein de la « Peak Brightness Collaboration », nous avons récemment menés plusieurs campagnes expérimentales pour suivre la dynamique d'un jet d'Hydrogène liquide chauffé par laser. Le principal diagnostic consistait en la mesure de spectres de diffusion XUV du faisceau FEL à 13.5nm pour plusieurs angles en simultané et pour différents délais pompe - sonde. Le dispositif expérimental, présenté figure 3, comprenait donc trois spectromètres aux angles de 20°, 90° et 180°, ainsi qu'un spectromètre pour mesurer le spectre FEL incident et un dernier pour le signal transmis. De premiers résultats, toujours en cours d'analyse, indiquent un chauffage laser inhomogène. Malgré cela, la diffusion X en mode collectif, dite diffusion « Thomson X », offre néanmoins la possibilité d'étudier les processus de relaxation mis en jeu dans les plasmas denses et même de résoudre ces problèmes d'inhomogénéité [16,17].

De récentes études ont aussi démontré le potentiel de la spectroscopie d'absorption X proche des seuils pour sonder la WDM [18-20]. Ce diagnostic permet de remonter la température électronique dans le cas d'un chauffage isochore, à la structure de la matière (fonction de corrélation) et à la dynamique électronique (densité d'états électroniques, déplacement de bandes ou de niveau de cœur, effets d'écrantage).

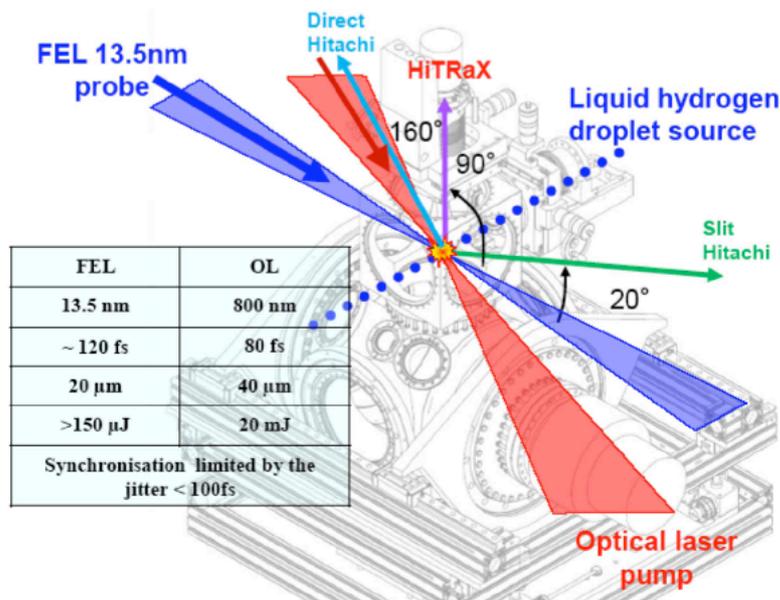


Figure 3 : Dispositif expérimental à FLASH pour la diffusion X (« Peak Brightness Collaboration »).

C'est dans ce contexte et au regard de récents résultats innovants [1, 2] que les lasers à électrons libres FLASH (Hambourg), LCLS (Stanford) et le future European XFEL (Hambourg) ont clairement démarrés des programmes scientifiques et stations expérimentales axées sur la matière sous conditions extrêmes et entre autre sur la matière dense et tiède. Ainsi, les station MEC (Matter on Extreme Conditions) et XPP (X-ray Pump Probe) du LCLS ainsi que la future station HED du XFEL sont ou seront toutes équipées de lasers intenses et permettront de coupler directement la physique des plasmas étudiée avec les lasers avec la physique des FEL. Les moyens mis en jeu sont effectivement à la hauteur des résultats attendus : explorer divers états de la matière sous conditions extrêmes et accéder à des échelles temporelles extrêmement brèves.

References

- [1] B. Nagler et al., Nature Phys. **5**, 693 (2009).
- [2] R.R. Fäustlin et al., Phys. Rev. Lett. **104**, 125002 (2010).
- [3] R. W. Lee et al., J. Opt. Soc. Am. B **20**, 770 (2003).
- [4] U. Zastra et al., Phys. Rev. E **78**, 066406 (2008).
- [5] T. Tschentscher et al., Eur. Phys. J. D **36**, 193 (2005).
- [6] T. Guillot, Science **286**, 72 (1999).
- [7] G. Huser et al., Phys. of Plasmas **12**, 060701 (2005).
- [8] M. Koenig et al., Plasma Phys. Control. Fusion **47**, B441 (2005).
- [9] H.C. Connolly et al., Science **280**, 62 (1998).
- [10] J. D. Lindl et al., **11**, 339 (2004).
- [11] M. Koenig et al., Appl. Phys. Lett. **72**, 1033 (1998).
- [12] G. Gregori et al., Eur. Phys. Lett. **83**, 15002 (2008).
- [13] A.L. Kritcher et al., Phys. Rev. Lett. **103**, 245004 (2009).
- [14] H.J. Lee et al. Phys. Rev. Lett. **102**, 115001 (2009).
- [15] B. Ziaja et al., Eur. Phys. J. D **40**, 465 (2006).
- [16] R. Thiele et al., Phys. Rev. E **82**, 056404 (2010).
- [17] C. Fortmann et al., High Energy Density Phys. **5**, 208 (2009).
- [18] A. Mancic et al., Phys. Rev. Lett. **104**, 035002 (2010).
- [19] F. Dorchies et al., Phys. Rev. Lett. **107**, 245006 (2011).
- [20] A. Benuzzi-Monaix et al., Phys. Rev. Lett. **107**, 165006 (2011)