Diagnosics spectroscopiques des plasmas chauds dans les domaines X et X-UV

H. Merdji, M. Fajardo, F. Gilleron, J.C. Gauthier, C. Chenais-Popovics, D. Kloeppel*, I. Uschmann*, E. Förster* et J.F. Wyart**

Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses, Unité Mixte 7605 du CNRS, CEA, École Polytechnique, Université Pierre et Marie Curie, 91128 Palaiseau, France

** Abteilung Roentgenoptik, Institut für Optik und Quantenelektronik,*

Friedrich-Schiller-Universität Jena, Max-Wien-Platz 1, 07743 Jena, Germany

*** Laboratoire Aimé Cotton, CNRS, bâtiment 505, Université Paris-Sud, 91405 Orsay cedex, France*

Résumé : Nous montrons deux spectrographes utilisés au laboratoire LULI pour la caractérisation de plasmas créés par laser. Nous présenterons tout d'abord un spectrographe X-UV à réseau en transmission et plus précisément la mesure de l'efficacité des ordres de diffraction. Puis, nous présenterons deux spectrographes à cristaux de Bragg utilisés dans le domaine du keV. Ils présentent une meilleure résolution et ont permis l'identification des raies d'émission 2-4 à 2-5 des ions Li-, Be- et B-like d'un plasma fer.

1. INTRODUCTION

La spectroscopie X des plasmas chauds est indispensable à la caractérisation des sources X créées par laser ou Z-pinch, et utilisées soit en recherche, soit pour leurs applications comme la biologie ou les nanotechnologies. La connaissance du spectre d'émission ou d'absorption d'un plasma chaud permet d'avoir accès à de nombreux paramètres tels que la température, la densité ou l'ionisation. La connaissance de ces paramètres permet l'optimisation d'un spectre donné, par exemple pour le choix de couples d'éléments émetteur-absorbant dans des expériences d'absorption X, ou bien pour l'étude d'une source X pour la lithographie à 13 nm. Les spectrographes doivent alors être adaptés à la diversité des gammes spectrales offertes par ces sources X. Pour les rayonnements de l'ordre du keV, caractéristiques d'un plasma chaud, les cristaux de Bragg présentent une très bonne résolution sur une petite gamme spectrale. Pour les plasmas peu chauds, émetteurs de rayonnement X-UV, les réseaux en transmission permettent d'accéder à une gamme spectrale plus large avec un bon pouvoir de résolution.

Tout d'abord, nous présenterons un spectrographe X-UV, plus particulièrement la calibration des différents ordres de diffraction nécessaire à l'analyse d'expériences de spectroscopie d'absorption effectuées au LULI. Puis, nous donnerons un exemple d'utilisation de cristaux de Bragg, plan ou courbe, pour l'obtention d'un spectre d'émission du fer entre 6.5 et 9.5 Å d'intérêt astrophysique.

2. CALIBRATION D'UN RÉSEAU EN TRANSMISSION POUR LA SPECTROSCOPIE X-UV

Dans le domaine X-UV, il existe de nombreuses techniques de spectroscopie, dont l'une a été utilisée au LULI. Nous avons développé un spectromètre très résolvant constitué d'un miroir sphérique couplé à un réseau de 5000 traits/mm. Le miroir sphérique, sous incidence rasante, permet d'améliorer la résolution en collectant et en focalisant le rayonnement sur le détecteur X-UV. Il agit aussi comme filtre passe-bas, coupant le rayonnement X-dur. Le spectre est obtenu entre 20 et 300 Å, avec une résolution de 0.7 à quelques Å, limitée par le faible angle solide collecté par le miroir.

Une des caractéristiques de ce spectromètre est la superposition des ordres de diffraction sur le détecteur. Pour remonter au spectre émis par la source, il faut connaître la contribution de chaque ordre du réseau. Les réseaux dont nous disposons sont conçus pour avoir un rapport cyclique théorique $\Gamma=0.5$ afin d'annuler les ordres pairs. Des mesures effectuées au synchrotron SUPER-ACO à Orsay ont permis de déterminer l'efficacité des ordres 0 à 6 entre 250 et 800 eV. Elles mettent en évidence une contribution importante des ordres pairs. La figure 1 montre l'efficacité du réseau à 250 eV : les ordres 2 et 4 ont une efficacité de 20% et 5% respectivement, l'ordre 3 contribuant de façon négligeable. Ces taux sont quasi constants dans la gamme d'énergie étudiée [1]. Un modèle théorique permet de calculer l'efficacité des ordres. Les résultats expérimentaux sont reproduits exactement en prenant un rapport $\Gamma=0.37$ (fig. 1). Ces mesures étaient indispensables à la déconvolution en absolu de spectres provenant d'expériences d'absorption XUV. Nous avons ainsi pu améliorer la compréhension de codes d'opacité et de codes hydro-radiatifs qui permettent de calculer les spectres d'absorption et de mesurer, par comparaison avec les spectres expérimentaux, la température électronique du plasma. D'autre part, la résolution ultime du spectrographe nous a permis de mesurer la densité électronique d'un plasma peu chaud à partir de l'élargissement Stark du profil des raies d'absorption He α et He β du bore [2].

3. SPECTROSCOPIE D'ÉMISSION AVEC UN CRISTAL DE BRAGG

Dans le domaine du keV, il est possible d'obtenir de très bonnes résolutions spectrales en utilisant des cristaux de Bragg. Nous présentons ici le spectre d'un plasma de fer créé par laser, mesuré dans deux géométries particulières. Le plasma émetteur est obtenu en focalisant un laser (15 J, 600 ps, 0.53 μm) sur une cible solide de fer, sur laquelle est placé un marqueur, Al ou Mg. Les spectres ont été enregistrés avec un cristal plan entre 7.5 et 9.5 Å et un cristal courbe entre 6.5 et 8 Å. La figure 2 montre la superposition de ces deux spectres.

Dans le cas du cristal plan, la résolution spectrale est limitée par la taille de la source X, pouvant aller de 10 à 100 μm dans nos expériences ou, dans le cas d'une source ponctuelle, par la rugosité de la surface et le nombre de plans réfléchissants. Avec un cristal plan d'ADP ($2d = 10.648$ Å), le spectre est mesuré entre 7.5 et 9.5 Å, avec une résolution de 5 mÅ, limitée principalement par la taille de la source (100 μm).

L'utilisation d'un cristal courbe (géométrie Johann) permet de focaliser une source sur le cercle de Rowland du cristal et de s'affranchir du problème de la taille de source. La résolution optimale est obtenue en plaçant le détecteur sur ce cercle. Le spectromètre utilise un cristal de quartz 100 ($2d = 8.51$ Å) de rayon de courbure 70 mm. Cette géométrie nous a permis d'obtenir une résolution de 2 mÅ entre 6.5 et 8 Å.

La Figure 2 montre le spectre d'émission du fer pour les transitions 2-4 et 2-5 des ions isoélectroniques de Li, Be, B et C. Ces données ont permis le repérage de raies inconnues du fer, notamment à l'aide de raies intenses des éléments traceurs. La comparaison du spectre expérimental avec un modèle théorique (code RELAC) a permis d'identifier ces raies du fer d'intérêt astrophysique [3].

Figure 1 : Intensité normalisée transmise par le réseau à 250 eV en fonction de l'angle de diffraction. En trait plein : les mesures ; en pointillés : le calcul obtenu pour un rapport cyclique de 0.37. Les ordres de diffraction ont été notés jusqu'au 3^{ème} ordre.

Figure 2 : Spectre d'émission du fer entre 6.5 et 9.5 Å. en haut, le spectre expérimental où sont indiquées les raies des traceurs. En dessous, les transitions 2-4 et 2-5 des ions isoélectroniques de C, B, Be et Li, calculées avec le code RELAC.

4. CONCLUSION

Les diagnostics présentés ici ont permis de caractériser des sources de rayonnement X assez différentes. La spectroscopie X donne une information directe sur l'état d'ionisation, et indirecte sur la température et la densité électroniques. C'est un outil très performant, qui s'appuie sur une instrumentation et des codes d'analyse assez complexes. Nous n'avons présentés ici qu'un rapide tour d'horizon assez technique. Les données rassemblées ici sont très succinctes et incomplètes mais permettent de dégager quelques pistes à explorer.

M. Fajardo a été financée par la bourse PRAXIS XX1/BD/13732/97 de la fondation FCT au Portugal.

Références

1. P. Desauté et al., submitted to Opt. Commun.
2. H. Merdji et al. J. Quant. Spectrosc. Rad. Transfer, **58**, 783 (1997).
3. J. F. Wyart et al, submitted to Physica Scripta