

Étude de l'opacité d'un mélange de fer et de magnésium chauffé radiativement

L'opacité est une grandeur physique fondamentale pour décrire le transport de l'énergie dans les plasmas à haute densité d'énergie. Le besoin de calculs précis d'opacité est partagé par différents domaines de recherche tels que la modélisation des intérieurs stellaires ou celle de l'évolution des plasmas de laboratoire. La précision d'un calcul d'opacité peut être évaluée grâce à des comparaisons code-à-code. Ces comparaisons sont le plus souvent réalisées sur des grandeurs moyennes. Leur intérêt est ainsi limité par le fait qu'entre deux codes de même niveau de sophistication, le nombre et la nature des approximations qu'ils mettent en jeu, et qui les différencient peuvent conduire à des résultats théoriques comparables par simple effet de compensation. Dans ces conditions, seul le résultat d'une mesure de qualité permet de discriminer entre les différents calculs.

- C. Blancard • Ph. Cossé • G. Faussurier CEA - DAM Île-de-France
 J.E. Bailey • G.A. Rochau Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, USA
 R.C. Mancini University of Nevada, Reno, Nevada, USA
 C.A. Iglesias Lawrence Livermore National Laboratory, University of California, Livermore, California, USA
 J.J. MacFarlane • I.E. Golovkin Prism Computational Sciences, Madison, Wisconsin, USA

Une façon de tester un calcul d'opacité consiste à comparer, sur une gamme plus ou moins étendue de longueurs d'onde, la transmission spectrale mesurée d'un échantillon bien caractérisé avec celle déduite du calcul tenant compte de la résolution finie du dispositif expérimental. Très récemment, une expérience réalisée auprès du Z-pinch du Sandia National Laboratory par l'équipe de J. Bailey, a permis de mesurer la transmission spectrale d'un mélange de fer et de magnésium porté à une température supérieure à 150 eV [1]. Un exemple de transmission spectrale mesurée par l'équipe de J. Bailey est présenté sur la **figure 1**. Les raies d'absorption en couche *K* du magnésium sont observées en-deçà de 9,4 Å. Au-delà de cette valeur, l'absorption en couche *L* de différents ions du fer est clairement visible. La température et la densité électroniques de l'échantillon sont évaluées grâce à l'analyse des raies d'absorption du magnésium. La densité électronique, $6,9 \pm 1,7 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-3}$, est déduite de l'analyse des profils des raies héliumöide $\text{He}\beta, \gamma, \delta$ pour lesquels l'élargissement par effet Stark est important. La densité électronique étant connue, la température électronique, $156 \pm 6 \text{ eV}$, est déduite de l'analyse de différents rapports de raies (ex. $\text{Ly}\alpha/\text{He}\beta$) [2,3].

La **figure 2** regroupe la transmission spectrale mesurée du mélange dans le domaine des raies d'absorption du fer ainsi que celles déduites des résultats de calcul du code OPAS développé au CEA ainsi que des codes OPAL [4], PRISMSPECT [5] et MUTA [6]. Tous ces calculs supposent le mélange

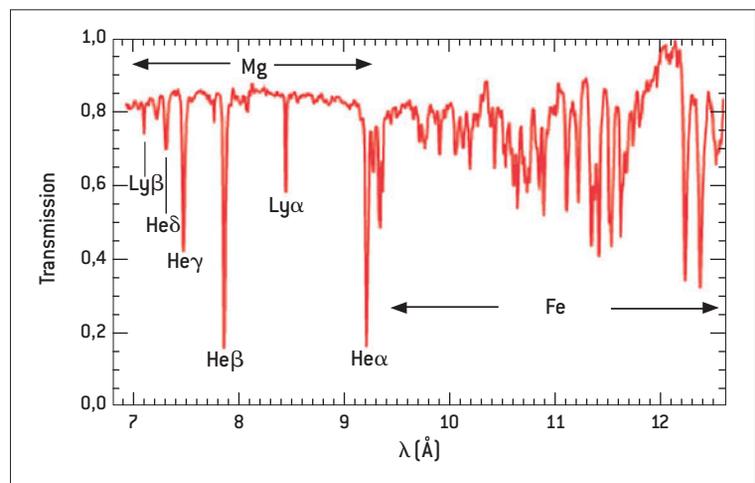


Figure 1. Transmission spectrale mesurée d'un mélange de magnésium et de fer.

à l'équilibre thermodynamique local. Ils correspondent à une température de 150 eV et à une densité électronique de $8,6 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-3}$. Dans le cas présent, nous observons un bon accord entre les transmissions spectrales mesurées et calculées. Les quatre codes, qui tous décrivent les raies d'absorption en couplage intermédiaire, indiquent que les nombreuses structures d'absorption émanent de transitions du type $2l - 3l'$ en-dessous de 990 eV et de transitions du type $2l - 4l'$ et $2l - 5l'$ au-dessus de cette valeur comme indiqué sur la **figure 2**. En ce qui concerne les transitions $2l - 3l'$, les contributions de nombreux degrés de charge présents dans le plasma sont clairement identifiables. Ainsi, dans le domaine 810 - 830 eV, nous observons principalement les transitions $2p - 3d$ dans le fer néonoïde (FeXVII). De plus, ce degré de charge est principalement responsable des deux structures entre 1000 et 1030 eV caractéristiques de transitions $2p - 4d$. Nous observons que tous les codes restituent difficilement le spectre d'absorption

expérimental dans ces deux domaines d'énergies de photon. Pour réconcilier l'absorption calculée avec celle mesurée, il faut que le Fe^{14+} (FeXV) contribue à hauteur de 4% à la distribution ionique dans le plasma. Si la densité électronique est conservée, cette valeur ne peut être atteinte qu'avec une température de 130 eV. Si l'existence de gradients de température dans l'échantillon au cours de la mesure est inévitable, nous pouvons cependant objecter qu'une variation de l'ordre de 20% de la température affecterait notablement les structures d'absorption du Mg, lesquelles sont par ailleurs correctement restituées avec un seul couple densité-température.

Les potentialités du code OPAS ont pu être testées, dans le cadre d'une collaboration CEA - DAM / DOE-NNSA, en comparant les transmissions spectrales mesurées et calculées d'un mélange de magnésium et de fer au voisinage des seuils K du Mg et L du Fe à une température de 150 eV et une densité électronique de $8,6 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-3}$. De nouvelles expériences ainsi que la mise en œuvre d'un nouveau type de cibles devraient permettre d'atteindre des températures et surtout des densités plus élevées. Ces conditions thermodynamiques seront ainsi favorables au test du traitement des effets de l'environnement plasma sur le calcul des profils de raie.

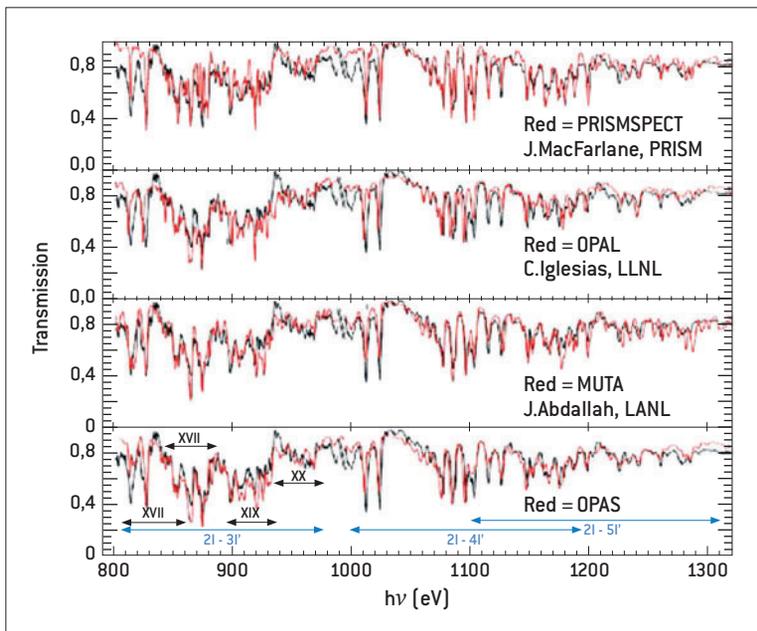


Figure 2. Transmissions spectrales d'un mélange de magnésium et de fer dans le domaine des raies d'absorption $2p \rightarrow nl$ avec $n \geq 3$ et $l = s, d$ du fer. La mesure (en noir) est comparée aux résultats des calculs (en rouge) OPAL [4], PRISM/SPECT [5], MUTA [6] et OPAS réalisés à l'équilibre thermodynamique local à une température de 150 eV et à une densité électronique égale à $8,6 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-3}$.

RÉFÉRENCES

- [1] J.E. BAILEY *et al.*, "Iron-Plasma Transmission Measurements at Temperatures Above 150 eV", *Phys. Rev. Lett.*, **99**, 265002 (2007).
- [2] J.E. BAILEY *et al.*, "Diagnosis of x-ray heated Mg/Fe opacity research plasmas", *Rev. Sci. Instrum.*, **79**, 113104 (2008).
- [3] J.E. BAILEY *et al.*, "Experimental investigation of opacity models for stellar interior, inertial fusion, and high energy density plasmas", *Phys. Plasmas*, **16**, 058101 (2009).
- [4] C.A. IGLESIAS, F.J. ROGERS, "Updated OPAL opacities", *Astrophys. J.*, **464**, p. 943-953 (1996).
- [5] J.J. MACFARLANE *et al.*, "Simulation of the ionization dynamics of aluminium irradiated by intense short-pulse laser", Proceedings of Inertial Fusion and Science Applications 2003, American Nuclear Society, La Grange Park IL, 2004.
- [6] S. MAZEVET, J. ABDALLAH, "Mixed UTA and detailed line treatment for mid-Z opacity and spectral calculations", *J. Phys.*, **B 39**, p. 3419-3429 (2006).