

Analyse des spectres d'absorption du fer et du cuivre mesurés dans le domaine X auprès du laser LULI 2000

Dans la région spectrale des transitions $2p\text{-}nd$, $n \geq 3$, les opacités de plasmas d'éléments de numéros atomiques Z voisins ont été mesurées et analysées avec des codes de physique atomique. Les simulations hydrodynamiques, fondées sur les mesures de température radiative effectuées à l'aide du spectromètre μDMX , ont été utilisées pour estimer les températures et densités des échantillons chauffés par une cavité laser. Les comparaisons avec les mesures permettent alors de valider les codes d'opacité dans les cas choisis et d'élucider un certain nombre d'effets importants dans la modélisation comme l'élargissement thermique des structures d'absorption, la séparation spin-orbite et l'interaction de configurations relativistes.

P. Arnault • T. Caillaud • J. Fariaut • F. Gilleron • J.-C. Pain • Q. Porcherot • C. Reverdin •

V. Silvert • B. Villette CEA – DAM Île-de-France

T. Blenski • G. Loisel • M. Poirier • F. Thais CEA – DSM/IRAMIS, Saclay

S. Bastiani-Ceccotti Laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses (LULI), École polytechnique, Palaiseau

S. Turck-Chièze CEA – DSM/IRFU, Saclay

W. Fölsner Max Planck Institut für Quantenoptik, Munich, Allemagne

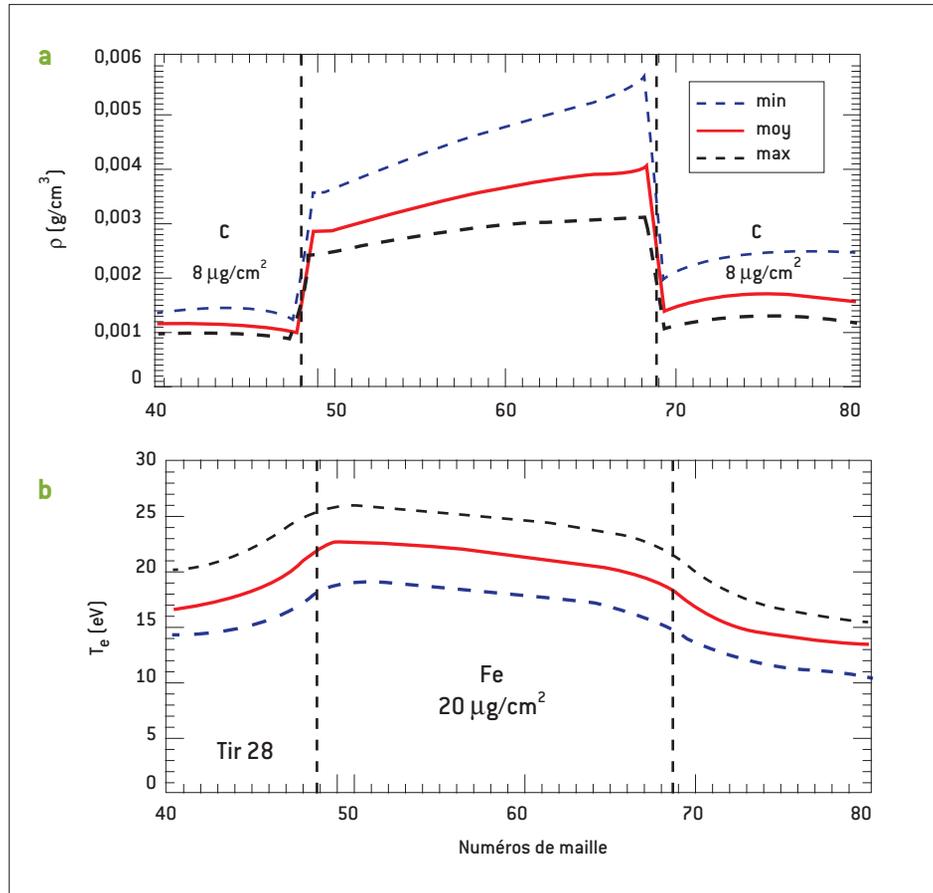
F. de Gaufridy de Dortan Universidad Politecnica de Madrid, Espagne

Des mesures d'opacité de plasmas d'éléments voisins en Z , fer ($Z=26$), nickel (28), cuivre (29) et germanium (32), ont été effectuées auprès de l'installation LULI 2000. La région spectrale correspond aux transitions électroniques $2p\text{-}nd$, $n \geq 3$. Les températures radiatives dans la cavité, mesurées à l'aide du spectromètre large bande μDMX [1], ont servi de point de départ pour des simulations hydro-radiatives (figure 1). Les températures des échantillons sont alors autour de 20 eV et les densités de l'ordre de $0,01 \text{ g/cm}^3$. Selon nos prévisions théoriques la séparation en deux des structures $2p\text{-}3d$, due au couplage spin-orbite, invisible dans le cas du fer, doit apparaître progressivement lorsque Z augmente. De plus, les structures $2p\text{-}3d$ sont sensibles à l'interaction de configurations relativistes (ICR). Les transitions mesurées ont été comparées [1,2] aux résultats théoriques qui sont obtenus à l'aide du code d'opacité statistique SCO [3] des deux codes

détaillés HULLAC [4] et FAC [5], et du nouveau code mixte SCORCG [6]. Bien qu'approximatif dans la description des structures d'absorption, le code SCO permet de tenir compte d'un grand nombre d'états électroniques excités ainsi que de l'écrantage dû aux électrons libres du plasma. Les codes détaillés HULLAC et FAC sont fondés sur un calcul détaillé des raies mais, à cause de la complexité et du temps de calcul requis, ils deviennent en pratique inutilisables en présence de nombreux états atomiques. Le code SCORCG, développé récemment au CEA – DAM Île-de-France, est de nature mixte : fondé sur le code SCO et le modèle RCG de Cowan [7], il permet un calcul détaillé des raies d'un certain nombre de configurations pertinentes, traitant les configurations restantes de manière statistique.

Nous présentons ici deux comparaisons théorie-expérience : la première concerne un plasma de fer, élément important en astrophysique, et la seconde un

Figure 1. Simulation hydrodynamique d'un échantillon de fer de masse surfacique $20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ mis en condition par le rayonnement de la cavité. Profils de densité [a] et de température [b] en fonction des coordonnées lagrangiennes. Les courbes « moy » correspondent aux résultats des mesures de rayonnement données par μDMX . Les courbes « max » et « min » présentent des estimations correspondant aux mesures μDMX décalées d'un écart-type.



plasma de cuivre, constituant de certains ablateurs laser. Dans le cas du fer (figure 2), la forme des structures d'absorption $2p-3d$ (entre 16 et $17,5 \text{ \AA}$) est qualitativement assez bien reproduite par les codes, mais les transmissions théoriques sont plus faibles que celles mesurées. La séparation spin-orbite des structures

$2p-3d$ disparaît suite à des effets thermiques, à la fois dans les transmissions mesurées et théoriques. En effet, les calculs ont révélé que l'élargissement des structures $2p-3d$ du fer provient surtout de la fluctuation thermique du nombre d'électrons sur la sous-couche $3p$ des ions du plasma. La transmission due aux transitions $2p-nd, n > 3$ reste assez élevée et

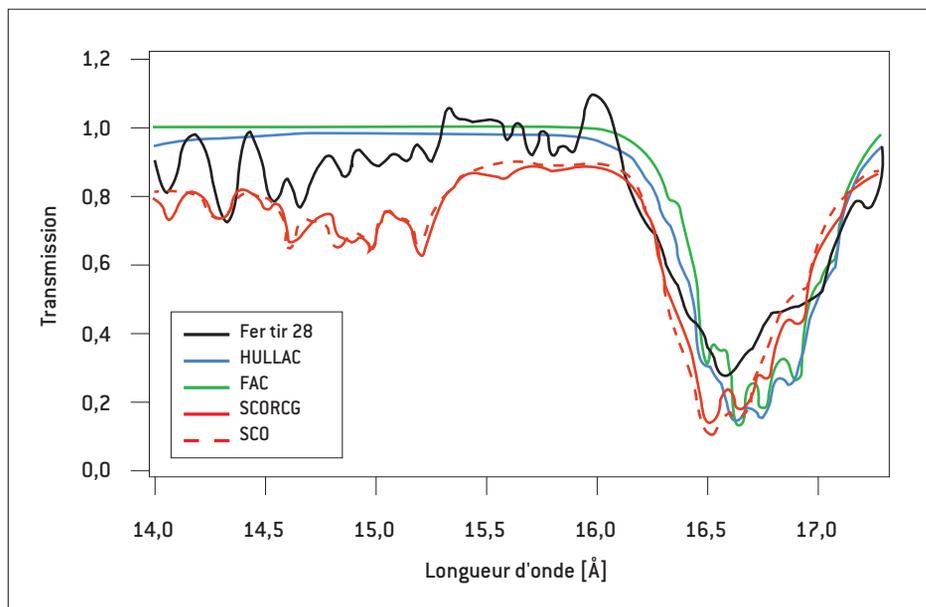


Figure 2. Comparaison de la transmission mesurée d'un échantillon de fer de masse surfacique $20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ avec les transmissions obtenues à l'aide de divers codes [température de 22 eV et densité de $4 \text{ mg}/\text{cm}^3$]. Les transitions $2p-nd, n > 3$ ne sont pas prises en compte dans les calculs détaillés HULLAC et FAC.

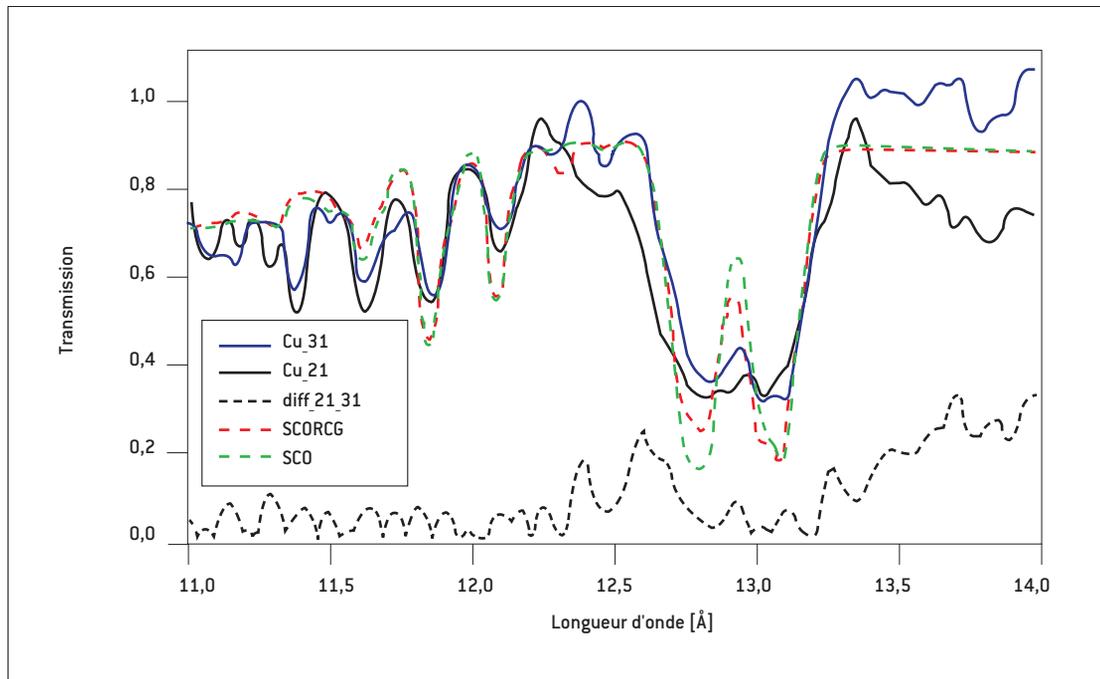


Figure 3. Comparaison des deux transmissions mesurées d'un échantillon de cuivre de masse surfacique $40 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ avec les transmissions des codes statistique SCO et mixte SCORCG [température de 16 eV et densité de $5 \text{mg}/\text{cm}^3$]. L'énergie du laser de chauffage est de 64 J pour le tir 31 [Cu_31] et de 80 J pour le tir 21 [Cu_21]. La différence entre les deux transmissions expérimentales est également tracée [diff_21_31].

bruitée dans le spectre mesuré (13–15,5 Å) et l'accord théorie-expérience est pratiquement inexistant dans cette gamme spectrale.

Dans le cas du cuivre (figure 3), l'accord entre les valeurs théoriques et expérimentales est meilleur que pour le fer. La séparation spin-orbite des structures $2p-3d$ (entre 12,5 et 13,5 Å) est clairement visible, ce qui est conforme aux calculs. L'effet de l'ICR a aussi pu être observé. La transmission théorique obtenue à l'aide du code SCORCG, qui inclut l'ICR de manière exacte, améliore l'accord avec la courbe expérimentale par rapport à SCO qui traite l'ICR de manière approximative. L'analyse des spectres calculés dans le cas du cuivre révèle que la sous-couche $3p$ est ici fermée et que l'élargissement des structures $2p-3d$ est principalement dû à la présence d'un grand nombre de raies lié à l'occupation de la sous-couche $3d$ qui fluctue autour de 5, soit à la moitié de sa valeur maximale. Un relativement bon accord théorie-expérience existe également dans la gamme de longueur d'onde des transitions $2p-nd$, $n > 3$. Les différentes comparaisons publiées [1,2] ont montré que les codes statistiques et détaillés sont capables de reproduire les transmissions mesurées dans la région spectrale $2p-3d$. Les positions des structures $2p-3d$, très sensibles à la température, peuvent aussi servir de diagnostic supplémentaire de température, par exemple lors des mesures d'opacités XUV correspondant à des transitions $\Delta n = 0$, importantes en astrophysique.

RÉFÉRENCES

- [1] T. BLENSKI, G. LOISEL, M. POIRIER, F. THAIS, P. ARNAULT, T. CAILLAUD, J. FARIAUT, F. GILLERON, J.-C. PAIN, Q. PORCHEROT, C. REVERDIN, V. SILVERT, B. VILLETTE, S. BASTIANI-CECCOTTI, S. TURCK-CHIÈZE, W. FOELSNER, F. DE GAUFRIDY DE DORTAN, "Opacity of iron, nickel, and copper plasmas in the x-ray wavelength range: Theoretical interpretation of $2p-3d$ absorption spectra", *Phys. Rev. E*, **84**, 036407 (2011).
- [2] T. BLENSKI, G. LOISEL, M. POIRIER, F. THAIS, P. ARNAULT, T. CAILLAUD, J. FARIAUT, F. GILLERON, J.-C. PAIN, Q. PORCHEROT, C. REVERDIN, V. SILVERT, B. VILLETTE, S. BASTIANI-CECCOTTI, S. TURCK-CHIÈZE, W. FOELSNER, F. DE GAUFRIDY DE DORTAN, "Theoretical interpretation of x-rays photo-absorption in medium-Z elements plasmas measured at LULI2000 facility", *High Energy Density Phys.*, **7**, p. 320-326 (2011).
- [4] A. BAR-SHALOM, M. KLAPISCH, J. OREG, "HULLAC, an integrated computer package for atomic processes in plasmas", *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **71**, p. 169-188 (2001).
- [5] M. F. GU, "The flexible atomic code", *Can. J. Phys.*, **86**, p. 675-689 (2008).
- [6] Q. PORCHEROT, J.-C. PAIN, F. GILLERON, T. BLENSKI, "A consistent approach for mixed detailed and statistical calculation of opacities in hot plasmas", *High Energy Density Phys.*, **7**, p. 234-239 (2011).
- [7] R. D. COWAN, *The theory of atomic structure and spectra*, University of California Eds, Berkeley (1981).