

Fusion thermonucléaire et astrophysique : étude de la structure atomique et des paramètres radiatifs de certains éléments lourds



V. Fivet, P. Quinet*, P. Palmeri et É. Biéumont*



Astrophysique et Spectroscopie, Université de Mons, Faculté des Sciences,
20 Place du Parc, B-7000 Mons, Belgium

Introduction

Ce travail a pour but d'étudier la structure électronique (niveaux d'énergie, longueurs d'onde,...) et les paramètres radiatifs (durées de vie, probabilités de transition, forces d'oscillateur,...) de certains éléments lourds du tableau périodique ($Z > 40$).

Ces éléments jouent un rôle très important en astrophysique, notamment en nucléosynthèse stellaire. Les éléments au-delà du pic du fer sont formés par des processus de capture neutronique, appelés processus r (pour "rapid") et processus s (pour "slow"). A l'heure actuelle, les astrophysiciens ont besoin de données atomiques fiables pour pouvoir déterminer l'importance relative des processus r et s lors de la formation des éléments lourds dans les étoiles. Ces données sont également essentielles lorsqu'il s'agit d'étudier la composition chimique des étoiles dites chimiquement particulières (CP).

Certains éléments lourds comme le tungstène sont d'un intérêt considérable pour la physique des plasmas et en particulier pour la fusion thermonucléaire contrôlée. En effet, en raison de son taux d'érosion assez faible et de son point de fusion assez élevé, le tungstène est utilisé comme matériau de construction pour le dispositif ITER [1].

Mesures de durées de vie: Méthode LIF

Les mesures de durées de vie ont été effectuées à l'aide de la méthode de fluorescence induite par laser (LIF) et résolue dans le temps à partir d'un plasma lui-même généré par laser.

Le dispositif expérimental est illustré par la Figure 1. L'échantillon à étudier est placé sur une cible tournante dans une chambre à vide, puis est irradié perpendiculairement par un laser Nd:YAG caractérisé par une longueur d'onde de 532 nm. Lorsque le plasma ainsi produit atteint la zone d'interaction (environ 5 mm au-dessus de la feuille), il est traversé par le faisceau d'un deuxième laser qui va produire une excitation. La fluorescence consécutive à cette excitation sera alors détectée par un photomultiplicateur.

Les courbes de décroissance enregistrées sont alors analysées par un code informatique appelé DECFIT et spécialement développé pour cette application. Les durées de vie sont obtenues en ajustant une exponentielle pure au signal de décroissance enregistré. Une courbe de décroissance typique est représentée sur la Figure 2.

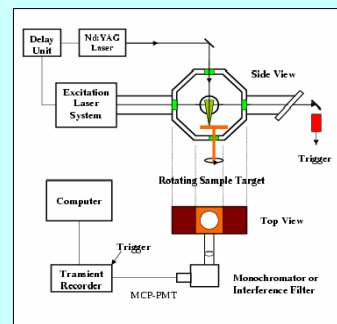


Fig. 1. Schéma du dispositif expérimental utilisé pour mesurer les durées de vie radiative par la méthode LIF.

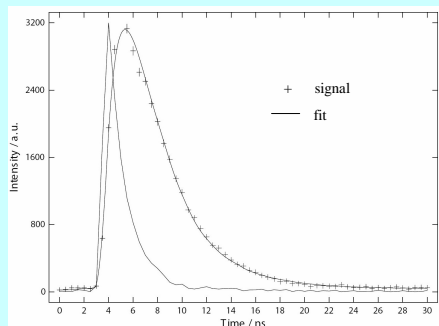


Fig. 2. Courbe de décroissance expérimentale avec un fit exponentiel enregistré dans le cas de l'ion Ta III pour le niveau à 48197.85 cm^{-1} .

Modèle théorique: méthode Hartree-Fock Relativiste

Afin d'effectuer des calculs de structures atomiques réalistes dans des atomes lourds, il est nécessaire de prendre en compte simultanément les effets relativistes et les effets de corrélation.

Nous avons donc adopté la méthode Hartree-Fock Relativiste (HFR) [2] qui est une méthode partiellement relativiste basée sur l'équation de Schrödinger. Les effets relativistes sont introduits dans le modèle grâce aux corrections de masse- vitesse, du terme de Darwin et de l'interaction de spin-orbite de Blume-Watson. Tandis que les interactions intravalencielles sont introduites explicitement dans le modèle, les interactions cœur-valence sont prises en compte par un potentiel de polarisation et une correction à l'opérateur de moment dipolaire donnant ainsi lieu à l'approche HFR+CPOL (voir [3]).

La méthode HFR peut être utilisée de manière *ab initio* ou semi-empirique (c-à-d combinée avec un ajustement par moindres carrés des valeurs propres de l'hamiltonien au valeurs expérimentales des niveaux d'énergie). Nous avons utilisé cette dernière technique afin de calculer les paramètres radiatifs obtenus dans ce travail.

Résultats

Lors de ce travail, nous avons considéré le cas des éléments des cinquième et sixième périodes. Nous nous sommes intéressés aux ions suivants: Nb II, Nb III, Ru I [4], Ta II [5], Ta III [6], W II [7], W III [8], Pt II [9], Au I et Au II [10]. Un échantillon des durées de vie obtenues pour ces ions est présenté dans le Tableau 1 (résultats théoriques et expérimentaux). Malgré les difficultés de modélisation de ces éléments lourds faiblement ionisés, nous pouvons constater que l'accord théorie-expérience est très satisfaisant.

Nous avons également effectué des calculs dans quasiment tous les lanthanides (voir par ex. Pm II [11]) et dans les actinides (Ac I, Ac II, Ra I, Ra II [12] et Am I [13]). Pour la plupart de ces éléments, il s'agit de la première détermination de paramètres radiatifs. Les données obtenues dans le cadre de ce travail ont été utilisées par des astrophysiciens pour essayer de confirmer la présence d'éléments radioactifs dans les atmosphères stellaires.

Les probabilités de transition obtenues pour les ions de la sixième période sont disponibles dans la base de données DESIRE, hébergée à l'université de Mons (<http://www.umh.ac.be/~astro/desire.shtml>). Les résultats concernant les lanthanides sont stockés dans la base de données DREAM (<http://www.umh.ac.be/~astro/dream.shtml>).

| Niveau d'énergie (cm^{-1}) | Durée de vie (ns) Théorie (HFR+CPOL) | Durée de vie (ns) Expérience (LIF) | Niveau d'énergie (cm^{-1}) | Durée de vie (ns) Théorie (HFR+CPOL) | Durée de vie (ns) Expérience(LIF) |
|---------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Nb II | | | | | |
| 40103.61 | 5.0 | 5.1 ± 0.3 | 48181.03 | 20.44 | 21.5 ± 1.0 |
| 43290.34 | 7.3 | 7.5 ± 0.4 | 51045.29 | 4.28 | 4.7 ± 0.4 |
| 44066.67 | 6.7 | 6.4 ± 0.5 | 55392.45 | 2.45 | 2.3 ± 0.2 |
| Ru I [4] | | | | | |
| 30348.45 | 13.6 | 12.2 ± 0.6 | 57231.04 | 2.86 | 2.9 ± 0.3 |
| 38200.40 | 9.0 | 8.6 ± 0.8 | 61488.36 | 2.33 | 2.5 ± 0.3 |
| 44607.61 | 8.6 | 8.9 ± 0.9 | | | |
| Ta II [5] | | | | | |
| 33706.46 | 29.8 | 22.8 ± 1.0 | 51408.37 | 4.1 | 3.9 ± 0.3 |
| 42959.63 | 5.8 | 6.0 ± 0.4 | 57018.13 | 4.4 | 4.1 ± 0.3 |
| 43064.95 | 8.8 | 9.0 ± 0.5 | 63738.84 | 3.1 | 2.9 ± 0.3 |
| Ta III [6] | | | | | |
| 48197.85 | 2.61 | 2.6 ± 0.2 | 45537.20 | 93.4 | 97 ± 8 |
| 55389.15 | 1.76 | 1.7 ± 0.3 | 47007.43 | 81.1 | 120 ± 10 |
| 58907.94 | 1.72 | 1.8 ± 0.3 | 51653.460 | 141.4 | 127 ± 11 |
| Au II [10] | | | | | |
| | | | 63053.318 | 3.5 | 3.7 ± 0.3 |

Table 1. Echantillon de durées de vie obtenues pour les ions des 5^{ème} et 6^{ème} périodes

Références

- [1] D. Naujoks *et al.*, Nucl. Fusion **36**, 671 (1996); [2] R.D. Cowan, *The Theory of Atomic Structure and Spectra*, University of California Press, Berkeley (1981); [3] P. Quinet *et al.*, Mon. Not. Astr. Soc. **307**, 939 (1999); [4] V. Fivet *et al.*, Mon. Not. Astr. Soc. (2009) soumis pour publication; [5] P. Quinet *et al.*, A&A **493**, 711 (2009); [6] V. Fivet *et al.*, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **41**, 015702 (2008); [7] H. Nilsson *et al.*, Eur. Phys. J. D **49**, 13 (2009); [8] P. Palmeri *et al.*, Phys. Script. **78**, 015304 (2008); [9] P. Quinet *et al.*, Phys. Rev. A **77**, 022501 (2008); [10] V. Fivet *et al.*, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **39**, 1 (2006); [11] V. Fivet *et al.*, Mon. Not. Astr. Soc. **380**, 771 (2007); [12] P. Quinet *et al.*, A&A **474**, 307 (2007); [13] V. Fivet *et al.*, J. Elec. Spectr. Rel. Phen. **156-158**, 250 (2007).

Remerciements

Ce travail a été soutenu financièrement par le projet LASERLAB-EUROPE (contrat RIH3-CT-2003-506350), le Conseil de la Recherche Suédois (bourse Linné) et le FRS-FNRS. EB, PQ et PP sont respectivement Directeur de Recherches, Maître de Recherches et Chercheur Qualifié du FRS-FNRS. VF remercie le FRIA pour le soutien financier. Un grand merci au Prof. S. Svanberg et son équipe (Lund Laser centre) pour leur accueil chaleureux durant les campagnes de mesures expérimentales.

* EB et PQ sont aussi membres de l'IPNAS, Université de Liège, Sart Tilman B15, B-4000 Liège