

Les effets des électrons chauds sur le calcul des taux d'ionisation du Be et des ions Be^{+1} , Be^{+2} et Be^{+3}

Samia DILMI et El-Habib GUEDDA

Faculté des Sciences Exactes

Université d'El-Oued, B.P. 789 El-Oued 39000, ALGERIE

E-mail : dilmisamia@gmail.com

RÉSUMÉ : Pour un modèle collisionnel radiatif, les densités des populations des niveaux atomiques sont déterminées par un système d'équations contenant les taux des différents processus atomiques. L'ionisation par impact électronique est un processus atomique indispensable dans la simulation des émissions radiatives des raies et aussi pour l'étude du bilan ionique. Plusieurs problèmes liés à l'étude des plasmas de laboratoire, d'astrophysique et de fusion thermonucléaire contrôlée nécessitent la connaissance au préalable de la structure atomique comme les énergies des différents niveaux et les sections efficaces. Dans notre travail, nous avons choisi le code FAC (Flexible Atomic Code) pour calculer les sections efficaces d'ionisation de l'atome de Be et les ions Be^{+1} , Be^{+2} et Be^{+3} . Les taux d'ionisation seront générés par un calcul numérique. Nous avons étudié les effets de la fraction des électrons chauds sur le taux d'ionisation. La fraction des électrons chauds est représentée par une distribution non-Maxwellienne. Les taux d'ionisation sont générés à partir des sections efficaces et pondérées par cette distribution. L'utilisation d'une distribution Non-Maxwellienne des électrons chauds, pour différentes fractions nous a permis de montrer la sensibilité de ces taux par rapport aux fractions des électrons chauds. Les résultats sont comparés à ceux trouvés dans la littérature. **MOTS CLÉS :** Modèles collisionnels radiatifs, Ionisation par impact électronique, Code FAC, Distribution Non-Maxwellienne des électrons.

ABSTRACT: For a radiative collisional model, population densities of atomic levels are determined by a system of equations containing the various atomic processes rates. The electron impact ionization is an important atomic process in the line radiative emissions simulation and also for the study of ion balance. Several issues related to the study of laboratory plasmas, astrophysics and controlled thermonuclear fusion require the knowledge of the atomic structure as the energies of different levels and cross sections. This work is based on the FAC code (Flexible Atomic Code) to calculate the ionization cross sections of Be, Be^{+1} , Be^{+2} and Be^{+3} . The ionization rate will be generated by a numerical calculation. We studied the effects of hot electrons fraction in the ionization rates. The hot electrons fraction is represented by a non-Maxwellian distribution. The ionization rates are generated from cross sections and weighted by this distribution. The use of non-Maxwellian distribution of hot electrons for different fractions showed the sensitivity of these rates to fractions of hot electrons. The results are compared to those found in the literature.

KEY WORDS: collisional radiative models, electron impact ionization, FAC Code, Non-Maxwellian distribution of electrons.

1. Introduction

La compréhension du rôle d'électrons chauds dans les plasmas est particulièrement importante à cause de leur influence sur la dynamique de plasma, la production de rayonnement et les bilans énergétiques [1]. La motivation de l'étude des plasmas avec les électrons chauds est la question de réchauffements de ces électrons dans le laser motorisé présents dans un plasma de fusion par confinement inertiels. De tels électrons peuvent mener aux pertes d'énergie significatives et avoir des effets négatifs sur la stabilité et le contrôle du plasma. Les électrons Non-Maxwelliens et suprathermiques (ou 'chaud') présentent un sujet d'intérêt continu à la physique des plasmas et la fusion car ces électrons peuvent jouer un rôle important dans la formation, l'évolution et les propriétés radiatives d'une large variété de sources plasma. La distribution d'énergie électronique Non-Maxwellienne a été prédite ou détectée dans des diverse sources de laboratoire incluant les tokamaks, des plasmas Laser [1], et des plasmas à force pulsée [2], aussi bien qu'à des sources astrophysiques comme des fusées de signalisation solaires [3,4] et des noyaux galactiques actifs, où ils sont produits par des champs électriques forts ou des interactions laser-plasma résonantes. De plus, les sources collisionnelle de rayon X (RX) qui mesurent les processus atomiques de base,

comme des pièges d'ion de faisceau électronique sont typiquement conduites par des faisceaux électroniques, qui sont principalement Non-Maxwelliens [5]. Les modèles collisionnel-radiatifs atomiques qui incluent les effets non-maxwelliens et les distributions d'énergies électroniques sont donc d'intérêts significatifs, tant dans les données de physique atomiques que comme les outils spectroscopiques qui peuvent déterminer la présence et les caractéristiques de la fonction de distribution d'électron (EDF) dans des plasmas à partir des mesures spectroscopiques non invasives. L'ionisation par impact électronique est un processus atomique indispensable dans la simulation des émissions radiatives des raies et aussi pour l'étude du bilan ionique. Notre objectif à travers ce travail s'attache à l'étude des effets des électrons chauds sur les taux d'ionisation du Be et les divers ions étudiés tel que : Be^{+1} , Be^{+2} et Be^{+3} en utilisant une distribution Non-Maxwellienne des électrons chauds, pour différentes fractions.

2. Eléments de théorie

2.1. Les sections efficaces

Il existe, pour le calcul des sections efficaces, une grande variété de méthodes avec une précision croissante mais dont les difficultés théoriques et surtout numériques augmentent notablement. Le calcul théorique de la section efficace d'ionisation par impact électronique est un problème complexe car il fait intervenir trois corps après la collision. Bien que des progrès significatifs aient été réalisés ces dernières années, aucune théorie n'est à l'heure actuelle pleinement satisfaisante [6].

Les sections efficaces d'ionisation par impact électronique peuvent être calculées par le code FAC [7,8] en utilisant l'approximation relativiste des ondes déformées « Distorted Wave method, DW » avec une méthode d'interpolation- factorisation.

Pour le présent travail les sections efficaces d'ionisation du Be neutre et les ions Be^{+1} , Be^{+2} et Be^{+3} ont été obtenues par le code FAC [7,8]. Les résultats de calcul sont reportés sur la figure 1 dans la gamme énergétique (0-10³) eV. Malgré l'absence de confirmation expérimentale, nous avons donc choisi de se limiter aux résultats théoriques obtenus par le code FAC pour notre étude.

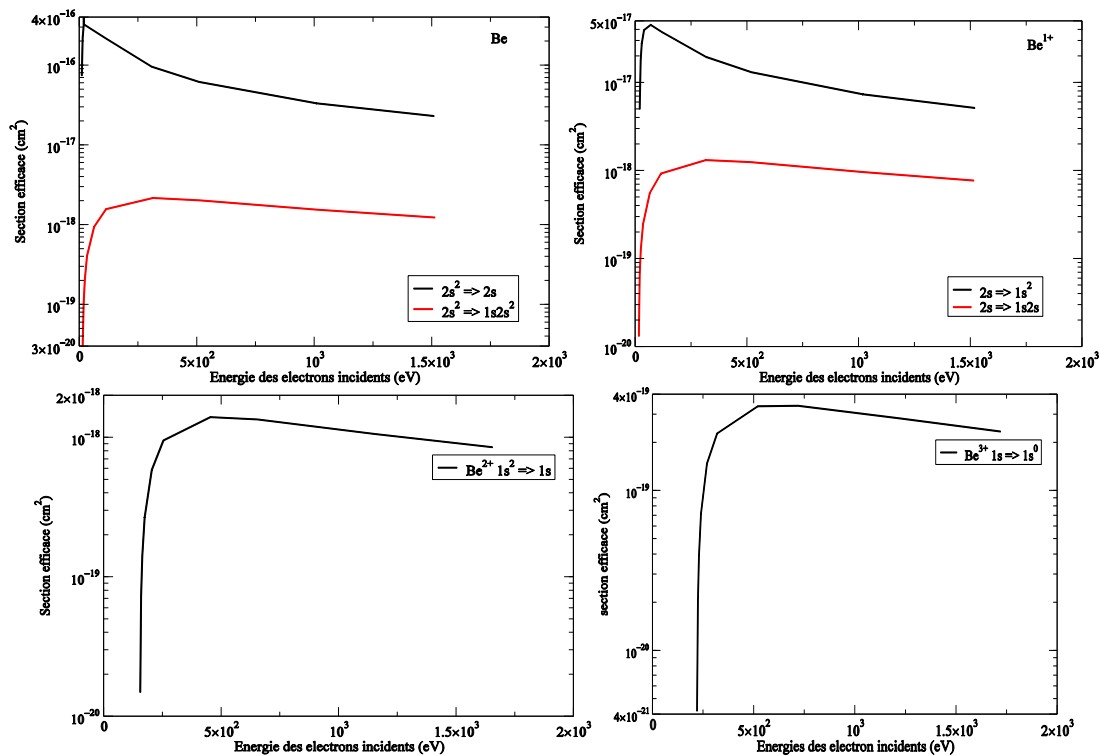


Figure 1 : Sections efficaces d'ionisation directe par impact d'électrons en fonction de l'énergie des électrons incidents pour le Be neutre et les ions Be^{+1} , Be^{+2} et Be^{+3}

2.2. Méthode de calcul des coefficients de taux d'ionisation en utilisant une distribution Non-Maxwellienne

Dans un plasma, les électrons libres sont caractérisés par une certaine distribution d'énergie. La grandeur intéressante est le coefficient de taux d'ionisation par impact d'électrons qui est obtenu en moyennant le produit de la vitesse de l'électron par la section efficace d'ionisation.

Dans le cas de l'ionisation directe, le coefficient de taux d'ionisation est donné par [9] :

$$\tau = \int v \sigma(E) f(E) dE \quad (\text{cm}^3 \text{s}^{-1}) \quad (1)$$

$$v = \sqrt{\frac{2E}{M}} \quad ; \quad f(E) dE = \frac{2\sqrt{E} e^{-\frac{E}{T}}}{T^{3/2} \sqrt{\pi}} dE$$

où M est la masse des particules, $f(E)$ est la fonction de distribution en fonction de l'énergie, E représente l'énergie d'impact électronique et v est la vitesse des particules.

Nous utilisons une distribution non-maxwellienne en énergie pour le calcul des taux d'ionisation à partir des sections efficaces. Les plasmas produits à basse pression exhibent souvent des fonctions de distributions non-maxwelliennes pour les électrons qui peuvent être représentées par une distribution à deux températures qui correspondent à une population chaude et une autre froide [9]. Une distribution non-Maxwellienne proposée par Hansen et al. [9] et Escarguel et al. [10] a été choisie pour étudier les effets des électrons chauds sur les taux d'ionisation du Béryllium et qui prend la forme :

$$f_{NM}(E) = (1 - f_{hot}) f_M(T_{bulk}) + f_{hot} f_M(T_{hot}), \quad (2)$$

où f_{hot} est une fraction normalisée des électrons chauds, f_M la distribution maxwellienne, T_{bulk} et T_{hot} sont les températures des électrons froids et chauds respectivement.

L'injection de la relation (2) dans l'équation (1), ainsi que les sections efficaces d'ionisation calculées par le code FAC [7] pour le Be et les divers ions Be^{+1} , Be^{+2} et Be^{+3} nous ont permis d'obtenir les taux d'ionisation pour différentes valeurs de la fraction des électrons chauds f_{hot} .

3. Résultats et discussions

Nous avons tracé dans les figures 2 et 3 les courbes représentant les variations des coefficients de taux d'ionisation du Be neutre et les ions Be^{+1} , Be^{+2} et Be^{+3} pour la distribution non-maxwellienne pour différentes fractions des électrons chaud en fonction de la température électronique et ceci dans le domaine de température électronique T entre 0.5 et 10^3 eV. Nous avons aussi inclus les résultats obtenus par application d'une distribution maxwellienne pour $f_{hot}=1$.

La température T_{bulk} a été prise pour une valeur moyenne de $k_B T_{bulk}$ égale à 0.85 eV [6]. En effet les fractions des électrons froids sont prises faibles par rapport aux électrons chauds.

Cependant, et pour les deux figure 2 et 3, on remarque que les courbes du présent travail pour les différentes fractions (70%, 80%, 90%) sont en général assez proches de celle tracer pour la fraction $f_{hot}=1$ et qui représente les taux d'ionisation pour une distribution Maxwellienne. En effet, aux faibles températures, les taux d'ionisation sont très sensibles au comportement des sections efficaces [4]. Il existe des écarts considérables entre les différentes méthodes théoriques et/ou empiriques. Les courbes des taux d'ionisation sur les figures 2 et 3 s'éloignent de celle obtenue par la distribution maxwellienne pour $f_{hot}=1$ au fur et à mesure que la fraction des électrons chauds diminue. Ceci montre une sensibilité remarquable des taux d'ionisation en fonction des fractions des électrons chauds. Nous avons pu faire la comparaison des taux d'ionisation avec les résultats publiés par Kato et al [4] et cela seulement pour le Be neutre car, à notre connaissance, les autres résultats sont peu présents sur la littérature. En général, une bonne concordance a été remarquée sur la courbe du taux d'ionisation pour une distribution maxwellienne pour $f_{hot}=1$ et celle de Kato et al.

comme le montre la figure (2-a). Il existe des écarts relatifs dans l'intervalle [100 -1000] (eV), ces écarts sont de l'ordre de 20%. Lorsque les sections efficaces se désintègrent très rapidement comme dans la figure 1, les énergies de distributions ont un impact significatif sur les coefficients de taux. Les coefficients de taux d'ionisation sont assez sensibles à la forme des fonctions de distributions car ses sections efficaces sont intégrées sur toute la fonction de distribution d'électrons (The electrons distribution function EDF) [9]. La sensibilité relative de l'ionisation collisionnelle envers les énergies de distributions d'électrons a des conséquences importantes pour les modèles collisionnel-radiatifs à deux températures (chaude et froide) [9].

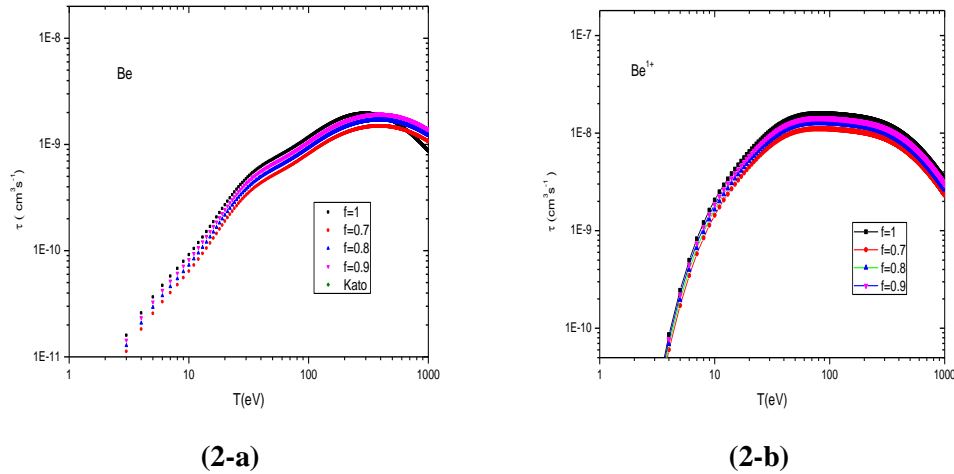


Figure 2 : Coefficients du taux d'ionisation pour le Be neutre et Be^{+1} pour $f_{hot}= 0.7, 0.8, 0.9$ et 1.0

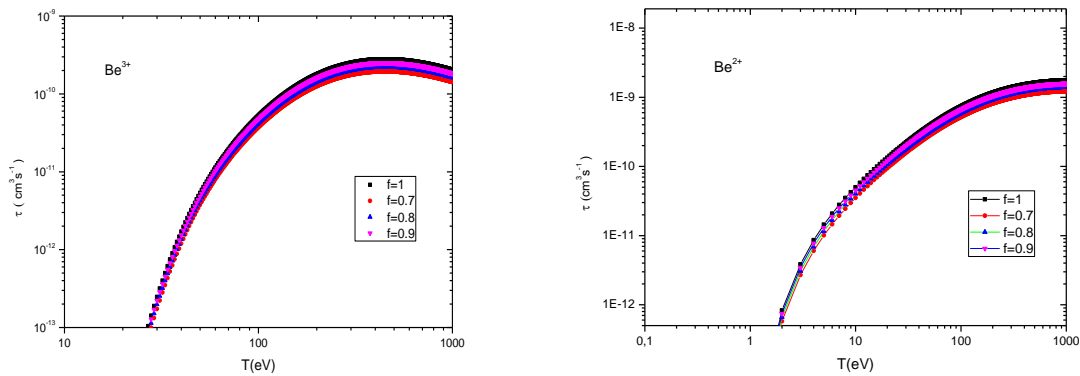


Figure 3 : Coefficients du taux d'ionisation pour le Be^{+2} et le Be^{+3} pour $f_{hot}= 0.7, 0.8, 0.9$ et 1.0

4. Conclusion

Une distribution non-Maxwellienne proposée par Hansen et al. [9] et Escarguel et al. [10] a été choisie pour étudier les effets des électrons chauds sur les taux d'ionisation du Béryllium et les ions Be^{+1} , Be^{+2} et Be^{+3} . Les coefficients de taux d'ionisation sont assez insensibles à la forme des fonctions de distributions. Les coefficients des taux d'ionisation du Béryllium et les ions Be^{+1} , Be^{+2} et Be^{+3} ont été calculés à partir des sections efficaces. Nous avons montré que les courbes des taux d'ionisation sont très sensibles aux fractions des électrons chauds.

5. References

- [1] Zhidkov.A. G., Sasaki A., Fukumoto I., Tajima T., Auguste T., D'Oliveira P., Hulin S., Monot P., Faenov A. Ya., Pikuz T. A. and Skobelev I. Yu.; *Phys. Plasmas* **8**, 3718 (2001).
- [2] Kantsyrev V. L., Fedin D. A., Shlyaptseva A. S., Hansen S., Chamberlain D. and Quart N.; *Phys. of Plasmas* **10**, 2519 (2003).
- [3] Feldman U.; *Physica Scripta* **65**, 185 (2002).
- [4] Kato T., Fujiwara T. and Hanaoka Y.; *Astroph. J.* **492**, 822 (1998).
- [5] Beiersdorfer P., Elliott S. R., Osterheld A., Stohlker T., Autrey J., Brown G.V., Smith A. J. and Widmann K.; *Phys. Rev. A* **53**, 4000 (1996).
- [6] Dilmi S., Guedda E. H. and Boumali A. M.; *Calcul des taux d'ionisation de l'hélium neutre; Can. J. Phys.*, Vol. **91**, 1–4 (2013).
- [7] Gu M. F.; FAC 1.0.7, <http://kipac-tree.stanford.edu/fac/>
- [8] Gu M. F.; *Can. J. Phys.*, Vol. **86**, 675—689 (2008).
- [9] Hansen S. B. and Shlyaptseva A. S.; *Physical Review E* **70**, 36402 (2004).
- [10] Escarguel A., Rosmej F. B., Brault C., Pierre Th., Stamm R. and Quotb K.; *Plasma Phys. Control. Fusion*, **49**, 85–93 (2007).