

## IV.1 Introduction :

Le rapport d'intensité des deux raies y et z peut être évalué en fonction de la densité des électrons à partir de l'équation (III-21) une fois connues les probabilités de transition radiative et les coefficients de taux d'excitation pour différents valeurs de la température électronique. Dans ce qui suit, nous allons commencer par introduire quelques caractéristiques brèves des raies y et z de l'ion  $\text{Ne}^{8+}$ , puis nous exposerons un ensemble de tableaux donnant les valeurs de diverses quantités utilisées dans les calculs du rapport d'intensité. Parmi ces quantités, on peut citer les énergies des niveaux de  $\text{Ne}^{8+}$ , les probabilités de transition radiative, les coefficients de taux d'excitation collisionnelle à partir du niveau fondamentale et du niveau métastable.

## IV.2 Raie y :

Dans l'atome neutre d'hélium, tous les niveaux du terme triplet  $1s2p\ ^3P$  déclinent vers le niveau excité inférieur  $1s2s\ ^3S_1$  par transition dipolaire électrique (E1) avec une probabilité de l'ordre de  $10^8\ \text{s}^{-1}$ . La transition E1 du niveau  $1s2p\ ^3P_1$  vers le fondamental  $1s^2\ ^1S_0$  est interdite à cause du changement de spin ( $\Delta S \neq 0$ ). Dans les ions héliumoides de charge nucléaire de plus en plus grande, l'interaction spin-orbite et d'autres interactions relativistes causent un mélange de plus en plus grande, l'interaction spin-orbite et d'autres interactions relativistes deviennent de plus en plus importantes et causent ainsi un mélange de plus en plus appréciable des niveaux singulet et triplet  $1s2p\ ^1P_1$  et  $^3P_1$ . Ceci entraîne que la probabilité de transition E1 d'intercombinaison ( $\Delta S=1$ ) du niveau  $1s2p\ ^3P_1$  vers le niveau fondamental  $1s^2\ ^1S_0$ , qui correspond à la raie d'intercombinaison appelée y croît rapidement lorsqu'on se déplace sur la séquence isoélectrique et peut devenir plus grande que la probabilité de transition permise dès que Z dépasse la valeur 7 (c.-à-d. pour l'ion  $\text{N}^{5+}$ ). Pour l'ion  $\text{Ne}^{8+}$ , la probabilité de transition d'intercombinaison  $1s2p\ ^3P_1 \rightarrow 1s^2\ ^1S_0$  est d'après le tableau IV.2, égale à  $5.36 \times 10^9\ \text{s}^{-1}$  alors que la probabilité de transition permise  $1s2p\ ^3P_1 \rightarrow 1s2s\ ^3S_1$  est égale à  $1.03 \times 10^8\ \text{s}^{-1}$ .

## IV.3 Raie z :

Le seul mode de déclin du niveau  $1s2s\ ^3S_1$ , qui est le premier niveau excité dans tous les ions héliumoides, est par dipôle magnétique (M1) relativiste vers le fondamental, ce qui correspond à la raie interdite appelée z. Rappelons qu'une transition M1 obéit aux règles de sélection :  $\pi_i \pi_f = 1$  (pas de changement de parité entre les niveaux de la transition) et variation de moment angulaire total  $\Delta J = 0, \pm 1$ . La probabilité de cette raie M1 croît très rapidement avec Z, comme  $Z^{10}$  le long de la série isoélectrique de l'hélium. Dans le cas de l'ion  $\text{Ne}^{8+}$  la probabilité de transition  $1s2s\ ^3S_1 \rightarrow 1s^2$

$^1S_0$  est assez faible. Elle vaut, d'après le tableau IV.2,  $1.09 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ , soit cinq ordres de grandeurs plus petites que celle d'intercombinaison  $1s2p \ ^3P_1 \rightarrow 1s^2 \ ^1S_0$  ce qui donne un caractère très métastable au niveau  $1s2s \ ^3S_1$ . Pour l'ion  $\text{Ne}^{8+}$ , comme il sera vu plus tard il n'est pas raisonnable de négliger les processus de dépeuplement collisionnel du niveau  $1s2s \ ^3S_1$  devant le processus de désexcitation radiative spontanée et ceci même lorsque la densité des électrons dans le plasma est de l'ordre de  $\sim 10^9 \text{ cm}^{-3}$ .

Mentionnons que dans les plasmas dilués ou de densités électroniques intermédiaires, la raie z, bien qu'elle corresponde à une transition interdite, peut être observée avec une importante intensité. Par contre dans les plasmas denses, la raie z est rarement observée du fait que la désexcitation collisionnelle du niveau  $1s2s \ ^3S_1$  domine est le déclin radiatif par M1 devient considérablement moins probable.

#### IV.4 Niveaux d'énergie et probabilités de transition radiative :

Nous avons inclus dans la résolution numérique des équations du modèle collisionnel-radiatif l'ensemble des 17 premiers niveaux de l'ion  $\text{Ne}^{8+}$ , ceux appartenant aux 6 configurations  $1s^2$ ,  $1s2s$ ,  $1s2p$ ,  $1s3s$ ,  $1s3p$ , et  $1s3d$ . L'énergie de ces 17 niveaux de l'ion  $\text{Ne}^{8+}$  et les valeurs des probabilités de transition radiative issue des 16 niveaux excités des configurations  $1s2l$  et  $1s3l$  sont données respectivement dans les tableaux IV.1 et IV.2. Ces valeurs d'énergie et de probabilité de transition radiative ont été calculées par Rachedi et Inal [15] en utilisant le code de structure atomique SUPERSTRUCTURE dans lequel les corrections relativistes sont incluses au moyen de l'approximation de *Breit-Pauli*. Cette approximation traite les interactions relativistes comme des perturbations à l'hamiltonien non relativiste du système atomique. Pour les probabilités de transition E1, M1 et M2 à partir des niveaux triplets de  $1s2l$ , nous avons adopté les résultats sophistiqués de *Johnson et al.* [12]. Notons qu'en réalité il n'y a que 13 niveaux qui jouent un rôle dans le peuplement des niveaux  $1s2s \ ^3S_1$  et  $1s2p \ ^3P_1$  qui nous intéressent dans cette étude. Il s'agit des 11 niveaux triplets  $1s2s \ ^3S_1$ ,  $1s2p \ ^3P_{0,1,2}$ ,  $1s3s \ ^3S_1$ ,  $1s3p \ ^3P_{0,1,2}$ ,  $1s3d \ ^3D_1$ ,  $1s3d \ ^3D_2$  et  $1s3d \ ^3D_3$ , le niveau singulet  $1s3d \ ^1D_2$ , plus bien sûr le niveau fondamental  $1s^2 \ ^1S_0$ .

#### IV.5 Taux d'excitation collisionnelle par impact d'électrons :

En vue d'évaluer les coefficients de taux d'excitation collisionnelle  $C_{ij}$  nous avons adopté les forces de collision  $\Omega_{ij}$  données par le code FAC (Flexible atomic code) pour les transitions à partir du niveau fondamental vers les 12 niveaux de l'ion  $\text{Ne}^{8+}$ , ceux qui contribuent au peuplement des niveaux supérieurs des raies y et z comme mentionné précédemment.

**Tableau IV.1:** Energie des 17 premiers niveaux de L'ion Ne<sup>8+</sup> (en eV).

Niveaux	<i>E</i> (eV)
1s <sup>2</sup> <sup>1</sup> S <sub>0</sub>	0
1s2s <sup>3</sup> S <sub>1</sub>	906.50
1s2p <sup>3</sup> P <sub>0</sub>	916.13
1s2p <sup>3</sup> P <sub>1</sub>	916.24
1s2p <sup>3</sup> P <sub>2</sub>	916.49
1s2s <sup>1</sup> S <sub>0</sub>	917.76
1s2p <sup>1</sup> P <sub>1</sub>	923.91
1s3s <sup>3</sup> S <sub>1</sub>	1071.04
1s3p <sup>3</sup> P <sub>0</sub>	1073.67
1s3p <sup>3</sup> P <sub>1</sub>	1073.70
1s3p <sup>3</sup> P <sub>2</sub>	1073.77
1s3s <sup>1</sup> S <sub>0</sub>	1074.29
1s3d <sup>3</sup> D <sub>1</sub>	1075.19
1s3d <sup>3</sup> D <sub>2</sub>	1075.20
1s3d <sup>3</sup> D <sub>3</sub>	1075.23
1s3d <sup>1</sup> D <sub>2</sub>	1075.30
1s3p <sup>1</sup> P <sub>1</sub>	1075.84

En appliquant la relation (III-10), nous pouvons calculer à partir des valeurs de forces de collision les coefficients de taux d'excitation par impact d'électrons à partir du niveau fondamental vers les 4 niveaux 1s2*l* puis vers les 8 niveaux 1s3*l* considérés et à partir du niveau métastable 1s2s <sup>3</sup>S<sub>1</sub> vers les niveaux triplets 1s2p <sup>3</sup>P<sub>0,1,2</sub> des ions Ne<sup>8+</sup>. Ces valeurs sont présentées respectivement sur les tableaux IV.3, IV.4 et IV.5. L'évaluation des coefficients de taux d'excitation collisionnelle a été effectuée en utilisant le logiciel MATHEMATICA. Ce logiciel a permis de déduire au moyen d'une interpolation numérique les forces de collision  $\Omega_{ij}$  comme fonctions de l'énergie de l'électron incident puis faire une intégration numérique sur l'énergie en considérant les trois valeurs de température comprises entre  $2 \times 10^6$  et  $5 \times 10^6$  K. Il est utile de mentionner que l'excitation à partir du niveau métastable concerne essentiellement les trois niveaux triplets 1s2p <sup>3</sup>P<sub>0,1,2</sub> du fait que les coefficients de taux d'excitation vers les niveaux tels que 1s2p <sup>1</sup>P<sub>1</sub> sont nettement plus faibles.

**Tableau IV.2 :** Probabilités de transition radiative (en  $s^{-1}$ ) pour toutes les transitions à partir de tous les niveaux  $1s2l$  et  $1s3l$  considérés dans le tableau IV.1 vers des niveaux inférieurs dans l'ion  $Ne^{8+}$

Transition	Probabilité
$2^3S_1 \rightarrow 1^1S_0$	$1.09 \cdot 10^4$
$2^3P_0 \rightarrow 2^3S_1$	$1.02 \cdot 10^8$
$2^3P_1 \rightarrow 2^1S_0$	$5.36 \cdot 10^9$
$2^3P_1 \rightarrow 2^3S_1$	$1.03 \cdot 10^8$
$2^3P_2 \rightarrow 1^1S_0$	$2.26 \cdot 10^6$
$2^3P_2 \rightarrow 2^3S_1$	$1.10 \cdot 10^8$
$2^1P_1 \rightarrow 2^1S_0$	$8.85 \cdot 10^{12}$
$3^3S_1 \rightarrow 2^3P_0$	$5.98 \cdot 10^9$
$3^3S_1 \rightarrow 2^3P_1$	$1.80 \cdot 10^{10}$
$3^3S_1 \rightarrow 2^3P_2$	$3.05 \cdot 10^{10}$
$3^3P_0 \rightarrow 2^3S_1$	$1.47 \cdot 10^{11}$
$3^3P_1 \rightarrow 1^1S_0$	$1.51 \cdot 10^9$
$3^3P_1 \rightarrow 2^3S_1$	$1.47 \cdot 10^{11}$
$3^3P_2 \rightarrow 2^3S_1$	$1.47 \cdot 10^{11}$
$3^1S_0 \rightarrow 2^1P_1$	$6.46 \cdot 10^{10}$
$3^3D_1 \rightarrow 2^3P_0$	$2.43 \cdot 10^{11}$
$3^3D_1 \rightarrow 2^3P_1$	$1.82 \cdot 10^{11}$
$3^3D_1 \rightarrow 2^3P_2$	$1.21 \cdot 10^{10}$
$3^3D_2 \rightarrow 2^3P_1$	$3.21 \cdot 10^{11}$
$3^3D_2 \rightarrow 2^3P_2$	$1.06 \cdot 10^{11}$
$3^3D_2 \rightarrow 2^1P_1$	$9.07 \cdot 10^9$
$3^3D_3 \rightarrow 2^3P_2$	$4.37 \cdot 10^{11}$
$3^1D_2 \rightarrow 2^3P_1$	$6.48 \cdot 10^9$
$3^1D_2 \rightarrow 2^3P_2$	$2.99 \cdot 10^9$
$3^1D_2 \rightarrow 2^1P_1$	$4.13 \cdot 10^{11}$
$3^1P_1 \rightarrow 1^1S_0$	$3.04 \cdot 10^{12}$
$3^1P_1 \rightarrow 2^1S_0$	$1.58 \cdot 10^{11}$

**Tableau IV.3 :** Les coefficients de taux d'excitations ( $\text{cm}^3/\text{s}$ ) à partir du niveau fondamental vers les différents niveaux  $1s2l$  dans l'ion  $\text{Ne}^{8+}$  en trois valeurs de la température électronique  $T_e(\text{K})$ .

Niveau finale	$T_e$ (K)		
	$2 \times 10^6$	$3 \times 10^6$	$5 \times 10^6$
$1s2s \ ^3S_1$	$6.84 \times 10^{-14}$	$3.00 \times 10^{-13}$	$8.45 \times 10^{-13}$
$1s2p \ ^3P_0$	$3.70 \times 10^{-14}$	$1.63 \times 10^{-13}$	$4.51 \times 10^{-13}$
$1s2p \ ^3P_1$	$1.11 \times 10^{-13}$	$4.87 \times 10^{-13}$	$1.35 \times 10^{-12}$
$1s2p \ ^3P_2$	$1.83 \times 10^{-13}$	$8.06 \times 10^{-13}$	$2.24 \times 10^{-12}$

**Tableau IV.4 :** Les coefficients de taux d'excitations ( $\text{cm}^3/\text{s}$ ) à partir du niveau fondamental vers les différents niveaux  $1s3l$  dans l'ion  $\text{Ne}^{8+}$  en trois valeurs de la température électronique  $T_e(\text{K})$ .

Niveau finale	$T_e$ (K)		
	$2 \times 10^6$	$3 \times 10^6$	$5 \times 10^6$
$1s3s \ ^3S_1$	$6.55 \times 10^{-15}$	$3.98 \times 10^{-14}$	$1.45 \times 10^{-13}$
$1s3p \ ^3P_0$	$3.87 \times 10^{-15}$	$2.30 \times 10^{-14}$	$8.14 \times 10^{-14}$
$1s3p \ ^3P_1$	$1.16 \times 10^{-14}$	$6.90 \times 10^{-14}$	$2.44 \times 10^{-13}$
$1s3p \ ^3P_2$	$1.93 \times 10^{-14}$	$1.15 \times 10^{-13}$	$4.05 \times 10^{-13}$
$1s3d \ ^3D_1$	$1.48 \times 10^{-15}$	$8.65 \times 10^{-15}$	$2.99 \times 10^{-14}$
$1s3d \ ^3D_2$	$2.46 \times 10^{-15}$	$1.45 \times 10^{-14}$	$5.07 \times 10^{-14}$
$1s3d \ ^3D_3$	$3.44 \times 10^{-15}$	$2.01 \times 10^{-14}$	$6.95 \times 10^{-14}$
$1s3d \ ^1D_2$	$2.44 \times 10^{-15}$	$1.80 \times 10^{-14}$	$8.98 \times 10^{-14}$

**Tableau IV.5 :** Les coefficients de taux d'excitations ( $\text{cm}^3/\text{s}$ ) à partir du niveau  $1s2s \ ^3S_1$  vers les trois niveaux  $1s2p \ ^3P_{0,1,2}$  dans l'ion  $\text{Ne}^{8+}$  en trois valeurs de la température électronique  $T_e(\text{K})$ .

Niveau finale	$T_e$ (K)		
	$2 \times 10^6$	$3 \times 10^6$	$5 \times 10^6$
$1s2p \ ^3P_0$	$1.34 \times 10^{-9}$	$1.20 \times 10^{-9}$	$1.04 \times 10^{-9}$
$1s2p \ ^3P_1$	$4.04 \times 10^{-9}$	$3.61 \times 10^{-9}$	$3.11 \times 10^{-9}$
$1s2p \ ^3P_2$	$6.70 \times 10^{-9}$	$5.99 \times 10^{-9}$	$5.16 \times 10^{-9}$