



**HAL**  
open science

## Etude du fer, du cobalt et du nickel par la spectroscopie d'ions rapides

C. Jacques, J.-P. Moreau, E.J. Knystautas

### ► To cite this version:

C. Jacques, J.-P. Moreau, E.J. Knystautas. Etude du fer, du cobalt et du nickel par la spectroscopie d'ions rapides. *Journal de Physique*, 1984, 45 (10), pp.1607-1613. 10.1051/jphys:0198400450100160700 . jpa-00209902

**HAL Id: jpa-00209902**

**<https://hal.science/jpa-00209902>**

Submitted on 4 Feb 2008

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Classification  
Physics Abstracts  
32.20J

## Etude du fer, du cobalt et du nickel par la spectroscopie d'ions rapides

C. Jacques (\*), J.-P. Moreau et E. J. Knystautas

Laboratoire de l'accélérateur Van de Graaff, Département de Physique (CRAM),  
Université Laval, Québec, Canada G1K 7P4

(Reçu le 9 février 1984, accepté le 14 juin 1984)

**Résumé.** — Des faisceaux rapides d'ions de fer, de cobalt et de nickel ont été utilisés pour étudier les spectres d'émission de ces trois éléments dans l'uv lointain. A partir des raies d'émission de ces ions, seize vies moyennes ont pu être mesurées dans le Fe IV-VII, trois dans le Co VI-VIII et deux dans le Ni VII-VIII. Nous comparons quelques-uns de nos résultats avec d'autres travaux.

**Abstract.** — A beam-foil study in the far uv of iron, cobalt and nickel ions has yielded spectra and lifetime measurements for these elements. In particular, sixteen lifetimes were measured in Fe IV-VII, three in Co VI-VIII and two in Ni VII-VIII. Our results are compared with other work where there are data in common.

### 1. Introduction.

L'essentiel de la recherche sur les ions métalliques, Fe IV-VII, Co VI-VII et Ni VII-VIII, consiste en spectroscopie, longueurs d'ondes et niveaux d'énergie, et très peu en vies moyennes, probabilités de transition et forces d'oscillateurs si ce n'est quelques calculs qui n'ont pas encore été complétés par des mesures expérimentales [1]. La plus grande partie des mesures a été faite pour les ions faiblement et hautement chargés, mais très peu pour les ions moyennement chargés faisant l'objet de l'étude présente. C'est dans ce contexte que Dumont *et al.* [2] ont fait des mesures de vies moyennes dans le Fe V-VI entre 1 200 Å et 1 500 Å. Nous avons utilisé des faisceaux d'ions métalliques Fe<sup>+</sup>, Co<sup>+</sup> et Ni<sup>+</sup> à une énergie de 2 MeV. Plusieurs spectres ont été mesurés entre 175 et 300 Å pour les trois éléments et entre 1 200 et 1 600 Å pour le fer. C'est dans ces régions spectrales que nous avons mesuré vingt et une vies moyennes, seize pour le fer, trois pour le cobalt et deux pour le nickel.

Les mesures des forces d'oscillateurs d'un bon nombre d'éléments, incluant les métaux, sont très importantes dans l'évaluation de leurs abondances respectives dans les atmosphères stellaires. Les métaux du

groupe du fer sont impliqués directement dans la nucléosynthèse des éléments plus lourds. Ces abondances sont également très utiles pour le développement de bons modèles stellaires. Elles servent aussi à estimer les conditions physiques dans les supernovae.

Le fer et le nickel, de même que le chrome et le molybdène, font partie des principales impuretés qu'on retrouve dans le plasma du réacteur Tokamak. Les impuretés ont une influence non négligeable sur le comportement du plasma. En fait, les atomes des impuretés sont ionisés et excités par collisions à cause de la très haute température et ils émettent spontanément. Ils sont une des causes principales du refroidissement et de l'extinction du plasma. Les impuretés servent aussi aux diagnostics de température, de densité et de temps de confinement du plasma. Il convient donc de bien connaître les structures atomiques des impuretés, l'énergie des niveaux, les forces d'oscillateurs et les processus d'excitation, d'ionisation, de recombinaison.

### 2. Conditions expérimentales.

Les conditions expérimentales sont décrites en détail par Knystautas et Drouin [3]. Cependant, nous avons effectué quelques modifications pour obtenir les faisceaux d'ions à partir des éléments métalliques fer, cobalt et nickel.

(\*) Adresse actuelle : Etalons d'électricité et de temps, Division de Physique, Conseil national de recherches du Canada, Ottawa, Ontario, Canada K1A 0R6.

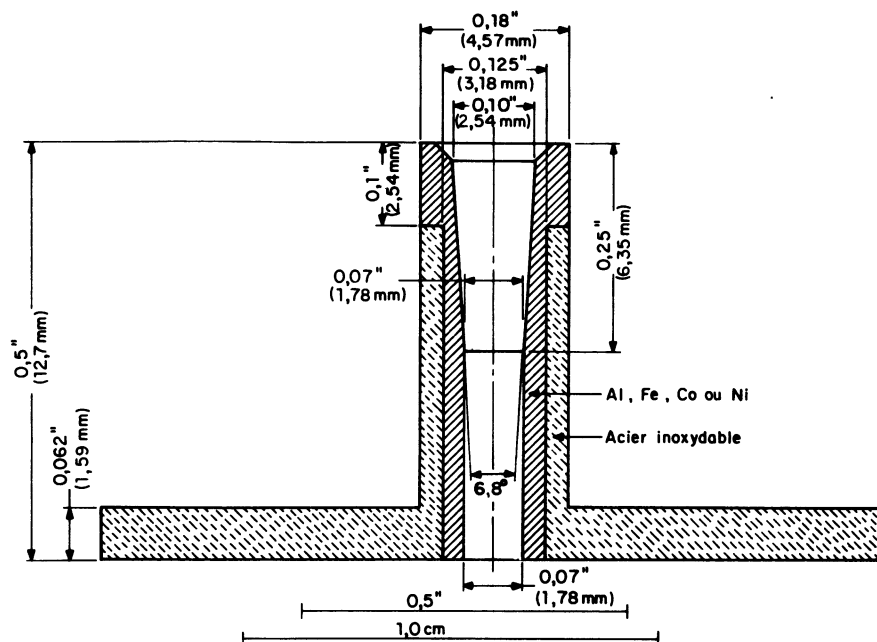


Fig. 1. — Canal de sortie de la source radiofréquence.

[Exit canal of the RF ion source.]

Les ions métalliques simplement chargés sont extraits du canal de sortie d'une source RF par pulvérisation cathodique au moyen d'une décharge dans du gaz  $\text{CO}_2$ . Le canal est fait de fer, de cobalt ou de nickel selon l'ion désiré. Le canal est en deux parties : (Fig. 1) une première moitié est un cône inversé avec un angle de  $6,8^\circ$  et la seconde est un cylindre. Cette configuration est le résultat de plusieurs essais en vue de la forme optimale donnant le meilleur courant [4], soit de 20 à 40 nA pour les trois types de faisceaux.

Nous avons utilisé des cibles de carbone dont l'épaisseur (10 à 20  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) est mesurée par la perte d'énergie des particules  $\alpha$  de 5,5 MeV.

Les photons émis par le faisceau de  $(\text{Fe}^{n+})^*$ , de  $(\text{Co}^{n+})^*$  ou de  $(\text{Ni}^{n+})^*$  sont dispersés par un monochromateur McPherson 247 à incidence rasante de 2,2 m et un réseau de 600  $\text{l mm}^{-1}$  dont l'angle des facettes est  $2^\circ 04'$  pour la région  $160 \text{ \AA} \leq \lambda \leq 350 \text{ \AA}$  et un autre monochromateur McPherson 235 à incidence normale et un réseau de 600  $\text{l mm}^{-1}$  dont l'angle des facettes est  $2^\circ 35'$  pour la région  $1260 \text{ \AA} \leq \lambda \leq 1700 \text{ \AA}$ . Nous avons utilisé deux détecteurs de type photomultiplicateur : un multiplicateur d'électrons commercialement appelé « Channeltron Electron Multiplier » fourni par Galileo Electro-Optics Corporation, U.S.A., dont la sensibilité s'étend de quelques Ångströms à environ 1200 Å, ainsi qu'un tube photomultiplicateur EMI-Gencom, modèle B-215 FV S/N 2138, dont la sensibilité couvre la région spectrale comprise entre 100 Å et 1800 Å.

### 3. Spectroscopie.

Même avec des courants de faisceaux élevés, la source « beam-foil » n'est pas très intense quoique spectroscopiquement pure.

Cela explique la qualité moyenne des spectres que nous présentons aux figures 2a, 3a, 4a et 5. Nous y avons fait les identifications à partir des niveaux d'énergie répertoriés par Corliss et Sugar pour le fer [5], pour le nickel [6] et pour le cobalt [7]. Pour le fer entre 1260 Å et 1700 Å, nous nous sommes servi des analyses de spectres de Ekberg et Edlén [8] pour le Fe IV, de Ekberg [9] pour le Fe V et le Fe VI [10] de Fawcett et Henrichs [11] pour le Fe V-VI et de Ekberg [12] pour le Fe VII.

La complexité de ces spectres, l'interaction des configurations et les incertitudes dues à une classification des transitions selon un couplage purement L-S rendent quelques identifications incertaines, essentiellement celles des raies particulières dont l'appartenance à tel ou tel multiplet demeure équivoque. En général, toutefois, l'emplacement des multiplets sur les spectres est bien connu et il est possible d'identifier les raies que nous mesurons.

A cet effet, nous avons préparé des spectres simulés des principales transitions du fer, du cobalt et du nickel entre 175 et 300 Å. Nous avons calculé les longueurs d'onde à partir des niveaux répertoriés par Corliss et Sugar [5-7] et nous avons évalué les positions des raies sur un spectre simulé. Nous avons supposé que l'intensité de chaque raie dans un multiplet obéit à la règle de proportionnalité aux poids statistiques des niveaux de la transition et que la raie d'intensité maximum avait la même intensité pour tous les multiplets. Ces suppositions simplistes ne sont évidemment pas toujours applicables, mais elles ont le mérite de permettre une simulation de spectre sans calcul compliqué. Nous avons lissé quarante fois le tracé des raies en utilisant la règle  $x_i = (x_{i-1} + 2x_i + x_{i+1})/4$ .

Cette dernière opération équivaut en fait à convoquer une fenêtre de détection correspondant à l'ouverture des fentes du monochromateur, 200  $\mu\text{m}$ , et donc à la résolution d'un spectre réel. Nous avons aligné les spectres simulés sous les spectres mesurés sur les figures 2b, 3b et 4b.

Nous avons dû utiliser de grandes ouvertures de fentes pour obtenir des raies d'une intensité convenable pour des mesures de vies moyennes. C'est à cause de l'ouverture des fentes que nous ne pouvons résoudre les multiplets du Fe VI  $3d^3\ 4F-3d^24p\ 4F^0$ ,  $4G^0$ , du Co VI  $3d^4\ 5D-3d^3(4F)4p\ 5F^0$ ,  $5D^0$ , du Co VIII  $3d^2\ 3F-3d4p\ 3F^0$ ,  $3D^0$  et du Ni VII  $3d^4\ 5D-3d^3(4F)4p\ 5F^0$ ,  $5D^0$ . Les multiplets du Co VII et du Ni VIII  $3d^3\ 4F-3d^24p\ 4D^0$ ,  $4F^0$  et  $4G^0$  ne sont pas résolus parce que les raies se chevauchent d'un multiplet à l'autre et que nous ne pouvons les séparer individuellement. Les simulations de spectres nous ont

permis d'identifier rapidement les spectres mesurés parce qu'elles sont suffisamment conformes à la réalité.

#### 4. Vies moyennes.

Nous avons mesuré les vies moyennes des niveaux supérieurs des transitions correspondant à la plupart des raies observées. Les courbes de déclin ont été analysées numériquement. La méthode [13] est basée sur l'analyse graphique faite en ajustant successivement des droites sur les graphiques semi-logarithmiques des points expérimentaux en commençant par les cascades dont la durée de vie est la plus grande et en soustrayant aussitôt leur contribution. L'ajustement numérique de ces droites est fait à partir d'une partition des points dans laquelle chaque sous-ensemble comprend un minimum de trois points.

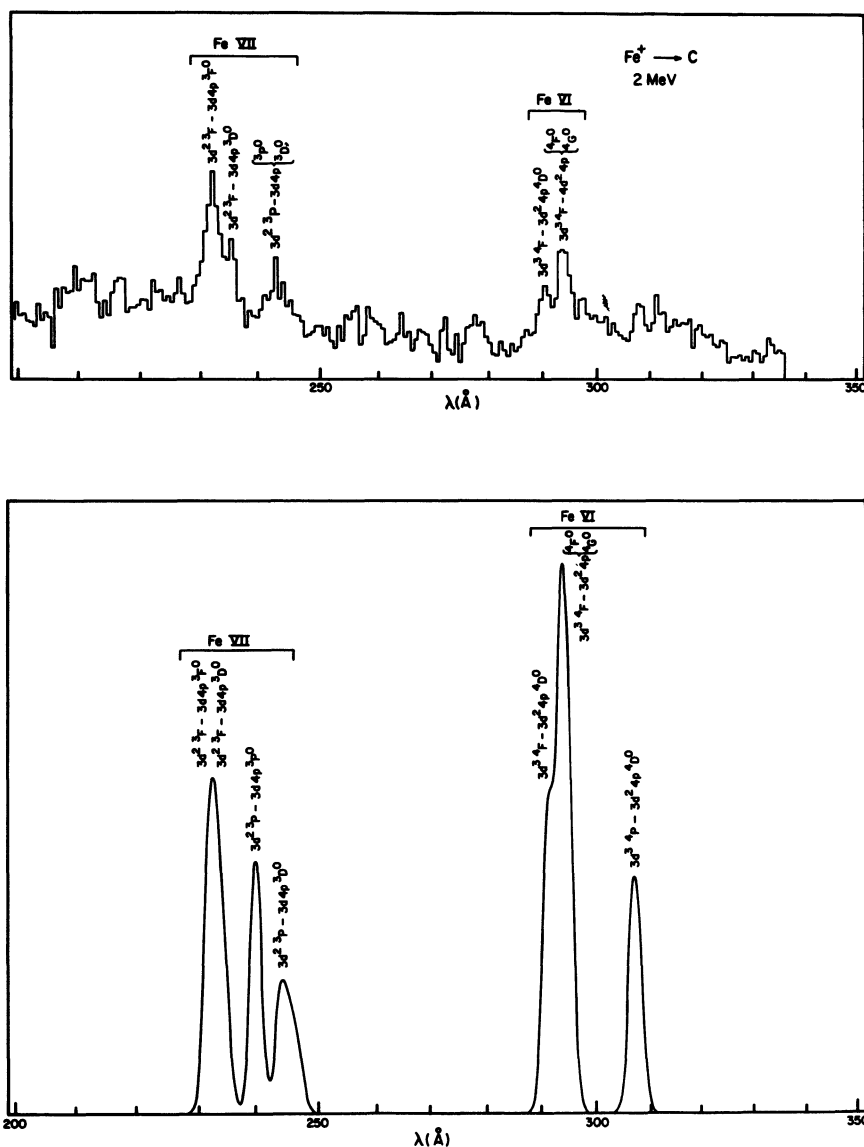


Fig. 2. — Spectre et simulation du spectre d'émission du fer entre 200 et 350  $\text{\AA}$ .

[Measured and simulated spectra for iron between 200 and 350  $\text{\AA}$ .]

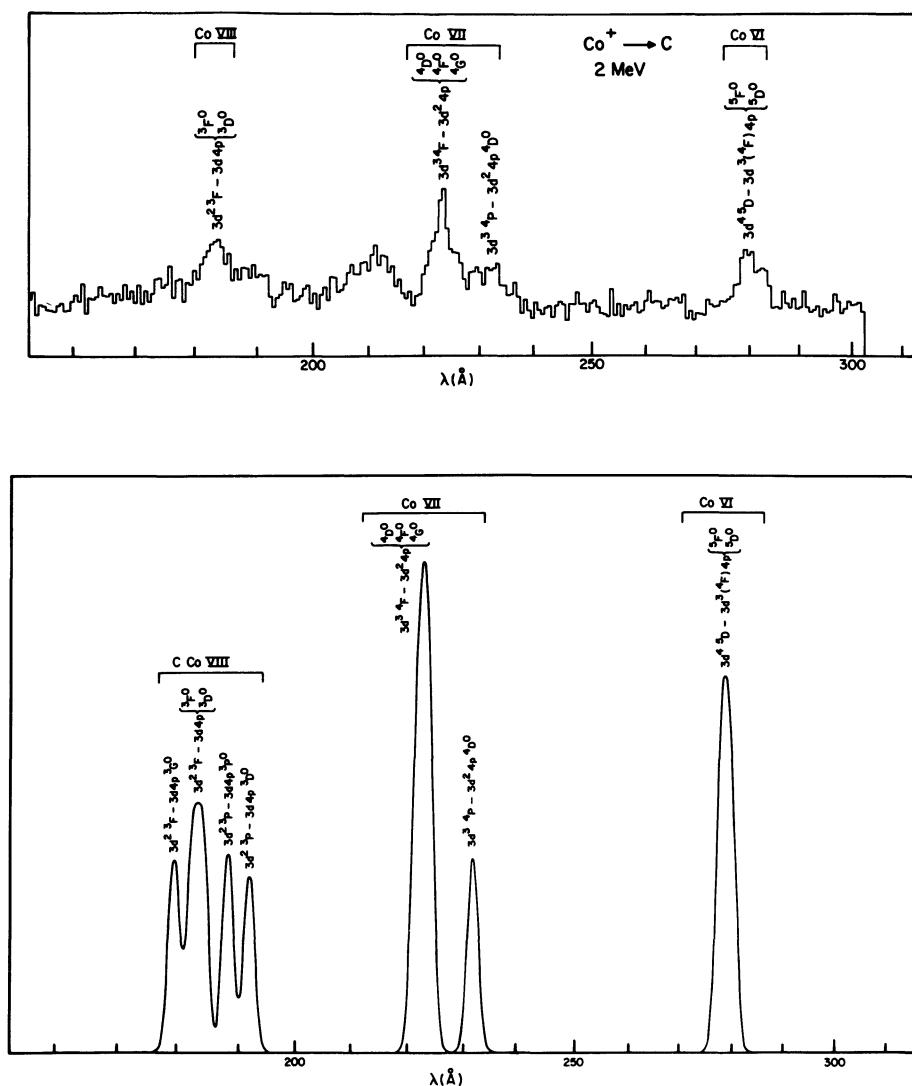


Fig. 3. — Spectre et simulation du spectre d'émission du cobalt entre 150 et 310 Å.

[Measured and simulated spectra for cobalt between 150 and 310 Å.]

Toutes les partitions possibles sont examinées et nous gardons les cinq donnant les plus faibles valeurs de  $\chi^2$ . Le programme permet de vérifier visuellement les cinq meilleurs ajustements. La méthode n'implique aucun problème de convergence tout en éliminant la subjectivité des analyses purement graphiques. Elle a l'avantage de montrer à quel point la vie moyenne principale change pour de petites variations du  $\chi^2$ , le cas échéant, permettant ainsi une évaluation plus réaliste de l'erreur statistique. Un inconvénient de la méthode est qu'elle ne permet pas l'analyse des mesures ayant une cascade « négative » (où le niveau en question est repeuplé par un niveau supérieur qui a une durée de vie plus courte), mais le cas ne s'est pas présenté pour cette étude-ci.

Nous présentons les résultats des mesures de vies moyennes dans tableaux I et II. Chaque résultat correspond à une moyenne de deux à trois mesures. Les erreurs qui y sont indiquées proviennent des erreurs

évaluées lors de l'analyse numérique et du calcul de la moyenne des deux ou trois mesures.

Les raies ayant servi aux mesures des vies moyennes n'étaient pas très intenses. Afin d'avoir une bonne statistique dans les courbes de déclin, nous devons accumuler longtemps les impulsions du détecteur. Toutefois, le temps d'accumulation était limité par l'usure de la cible, ce temps est d'environ une heure. Compte tenu de la qualité des courbes mesurées, nous ne pouvions mesurer de cascades, la statistique des courbes ne permettait pas de les mettre en évidence (Fig. 6).

Les tableaux I et II montrent une difficulté que nous avons rencontrée, celle des superpositions des multiplets. Ces superpositions sont causées par l'ouverture des fentes du monochromateur, compromettant ainsi la résolution au profit de l'intensité. Sans ce compromis, l'intensité des raies n'aurait pas permis la mesure de courbes de déclin. Dans le cas d'un mélange de

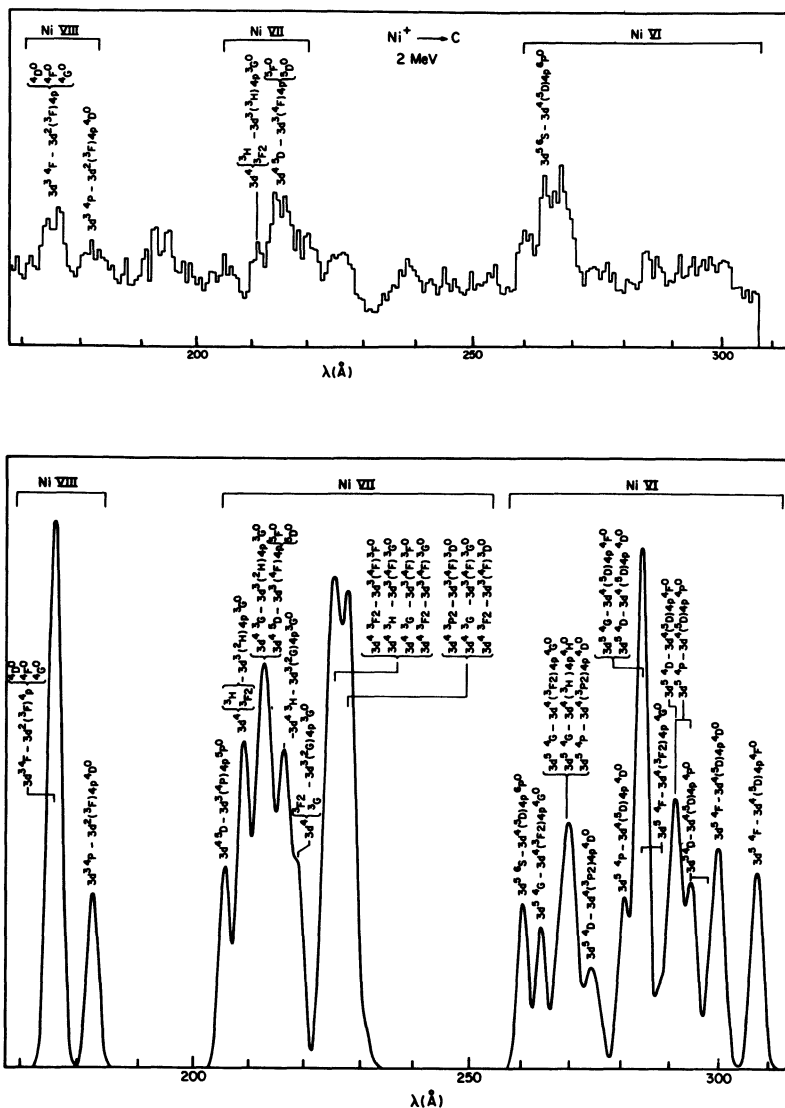


Fig. 4. — Spectre et simulation du spectre d'émission du nickel entre 180 et 310 Å.  
 [Measured and simulated spectra for nickel between 180 and 310 Å.]

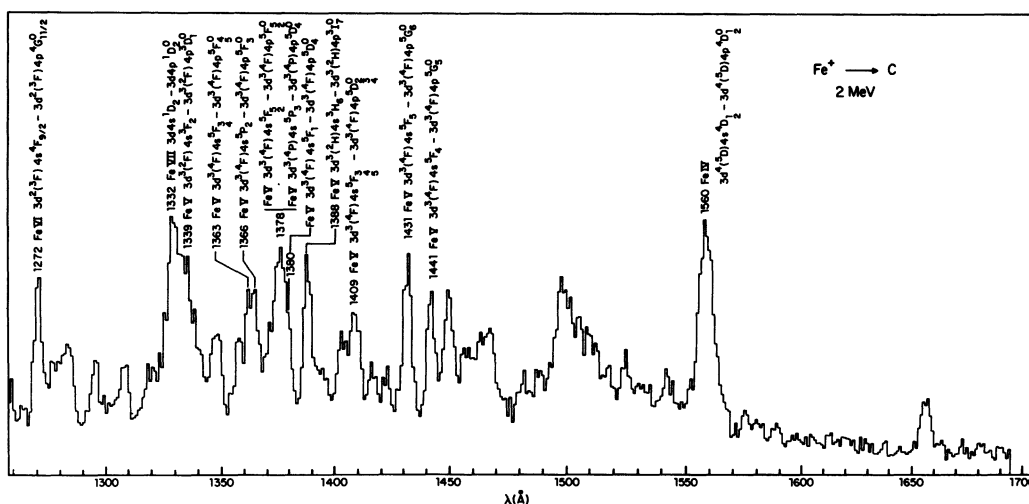


Fig. 5. — Spectre d'émission du fer entre 1 260 et 1 700 Å.  
 [Spectrum of iron ions in the range 1 260 to 1 700 Å.]

Tableau I. — *Vies moyennes du fer, du cobalt et du nickel entre 175 et 300 Å.*

[Lifetimes of iron, cobalt and nickel ions between 175 and 300 Å.]

$\lambda$ (Å)	Spectre	Transition	Vie moyenne (ps)
232,2	Fe VII	$3d^2\ ^3F-3d4p\ ^3F^0$	$400 \pm 70$
235,4	Fe VII	$3d^2\ ^3F-3d4p\ ^3D^0$	$560 \pm 130$
290,4	Fe VI	$3d^3\ ^4F-3d^24p\ ^4D^0$	$290 \pm 40$
294,0	Fe VI	$3d^3\ ^4F-3d^24p\ \left\{ \begin{array}{l} ^4F^0 \\ ^4G^0 \end{array} \right.$	$510 \pm 80$
-----			
183,5	Co VIII	$3d^2\ ^3F-3d4p\ \left\{ \begin{array}{l} ^3F^0 \\ ^3D^0 \end{array} \right.$	$180 \pm 40$
223,1	Co VII	$3d^3\ ^4F-3d^24p\ \left\{ \begin{array}{l} ^4D^0 \\ ^4F^0 \\ ^4G^0 \end{array} \right.$	$350 \pm 40 (*)$
279,2	Co VI	$3d^4\ ^5D-3d^3(^4F)4p\ \left\{ \begin{array}{l} ^5F^0 \\ ^5D^0 \end{array} \right.$	$150 \pm 20$
-----			
175,5	Ni VIII	$3d^3\ ^4F-3d^2(^3F)4p\ \left\{ \begin{array}{l} ^4D^0 \\ ^4F^0 \\ ^4G^0 \end{array} \right.$	$300 \pm 40 (*)$
213,0	Ni VII	$3d^4\ ^5D-3d^3(^4F)4p\ \left\{ \begin{array}{l} ^5F^0 \\ ^5D^0 \end{array} \right.$	$220 \pm 30$

(\*) Chevauchement des multiplets.

Tableau II. — *Vies moyennes du fer entre 1 200 et 1 600 Å.*

[Lifetimes of iron ions between 1 200 and 1 600 Å.]

$\lambda$ (Å)	Spectre	Transition	Vies moyennes (ps)	
			Ce travail	Dumont <i>et al.</i> (1979)
1 272	Fe VI	$3d^2(^3F)4s\ ^4F_{9/2}-3d^2(^3F)4p\ ^4G_{11/2}^0$	$880 \pm 80$	$810 \pm 60$
1 332	Fe VII	$3d4s\ ^1D_2-3d4p\ ^1D_2^0$	$920 \pm 70$	
1 339	Fe V	$3d^3(^2F)4s\ ^3F_2-3d^3(^2F)4p\ ^3D_1^0$	$790 \pm 100$	
1 363	Fe V	$\left\{ \begin{array}{l} 3d^3(^4F)4s\ ^5F_3-3d^3(^4F)4p\ ^5F_4^0 \\ 3d^3(^4F)4s\ ^5F_4-3d^3(^4F)4p\ ^5F_5^0 \end{array} \right.$	$530 \pm 90$	
1 366	Fe V	$3d^3(^4F)4s\ ^5F_2-3d^3(^4F)4p\ ^5F_3^0$	$570 \pm 150$	
1 378	Fe V	$\left\{ \begin{array}{l} 3d^3(^4F)4s\ ^5F_5-3d^3(^4F)4p\ ^5F_5^0 \\ 3d^3(^4F)4s\ ^5F_2-3d^3(^4F)4p\ ^5F_2^0 \end{array} \right.$	$580 \pm 50$	$540 \pm 20$
	Fe V	$3d^3(^4P)4s\ ^5P_3-3d^3(^4P)4p\ ^5D_4^0$		
1 380	Fe V	$3d^3(^4F)4s\ ^5F_1-3d^3(^4F)4p\ ^5D_1^0$	$550 \pm 60$	
1 388	Fe V	$3d^3(^2H)4s\ ^3H_6-3d^3(^2H)4p\ ^3I_7^0$	$990 \pm 80$	$900 \pm 200$
1 409	Fe V	$\left\{ \begin{array}{l} 3d^3(^4F)4s\ ^5F_3-3d^3(^4F)4p\ ^5D_2^0 \\ 3d^3(^4F)4s\ ^5F_4-3d^3(^4F)4p\ ^5D_3^0 \\ 3d^3(^4F)4s\ ^5F_5-3d^3(^4F)4p\ ^5D_4^0 \end{array} \right.$	$530 \pm 40$	$300 \pm 20$
1 431	Fe V	$3d^3(^4F)4s\ ^5F_5-3d^3(^4F)4p\ ^5G_6^0$	$1\ 590 \pm 190$	$1\ 400 \pm 200$
1 441	Fe V	$3d^3(^4F)4s\ ^5F_4-3d^3(^4F)4p\ ^5G_5^0$	$1\ 550 \pm 100$	$1\ 500 \pm 200$
1 560	Fe IV	$\left\{ \begin{array}{l} 3d^4(^5D)4s\ ^4D_1-3d^4(^5D)4p\ ^4D_1^0 \\ 3d^4(^5D)4s\ ^4D_2-3d^4(^5D)4p\ ^4D_2^0 \end{array} \right.$	$620 \pm 30$	

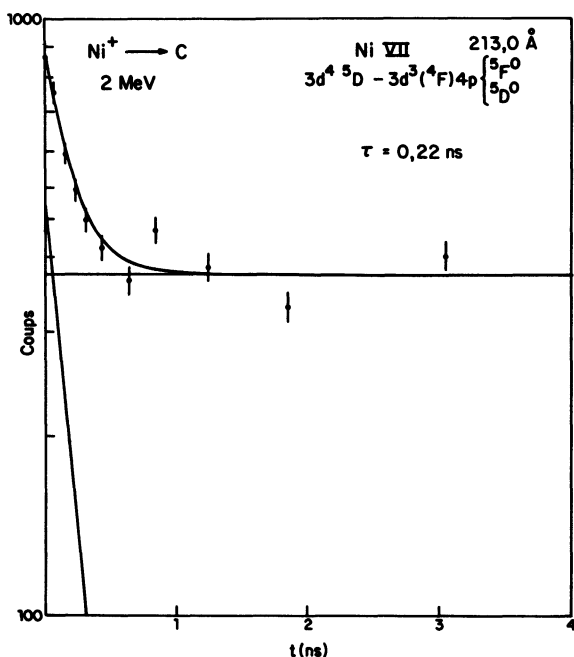


Fig. 6. — Analyse de la courbe de déclin de la transition du Ni VII à 213,0 Å.

[Analysis of the decay curve for the 213 Å transition in Ni VII.]

raies d'un même multiplet, nous avons supposé raisonnablement que les vies moyennes des différents niveaux supérieurs sont égales dans nos limites d'erreurs. De toutes façons, il était impossible à cause de la faible résolution de mesurer chaque raie et de vérifier notre hypothèse.

Dumont *et al.* [2] ont fait aussi des mesures de vies moyennes du fer entre 1 200 et 1 600 Å. Nous compa-

rons six de leurs mesures avec les nôtres dans le tableau II. L'accord est très bon pour cinq d'entre elles. Ce n'est pas le cas pour la vie moyenne mesurée à 1 409 Å; la valeur que nous indiquons est presque deux fois plus élevée, elle est en accord avec la vie moyenne mesurée à 1 380 Å sur une raie du même multiplet.

L'ensemble des calculs théoriques des forces d'oscillateurs et des probabilités de transition répertoriés par Fuhr *et al.* [1] ne peut se comparer à nos résultats. En ce qui concerne les transitions du tableau I qui sont de type  $3d^n-3d^{n-1} 4p$ , le niveau supérieur peut se désexciter par une transition de type  $3d^{n-1} 4s-3d^{n-1} 4p$  et aucun calcul n'a encore été publié sur ce type de transition que nous avons mesuré pour le fer (tableau II). Il faut tenir compte de la probabilité de transition  $3d^{n-1} 4s-3d^{n-1} 4p$  pour évaluer théoriquement la vie moyenne de  $3d^{n-1} 4p$ . C'est pourquoi il faut attendre que l'ensemble des calculs théoriques de probabilités de transition pour cette configuration soit complété pour comparer à nos résultats.

## 5. Conclusion.

Nous avons fait l'étude des ions métalliques du fer, du cobalt et du nickel par la spectroscopie d'ions rapides. Des faisceaux d'ions de quelques dizaines de nanoampères ont été obtenus par la pulvérisation cathodique du canal de sortie de la source radiofréquence dans le terminal d'un accélérateur Van de Graaff. Nous avons mesuré des spectres de fer, de cobalt et de nickel hautement ionisés dans l'ultraviolet lointain, de 150 à 310 Å et de 1 260 à 1 700 Å. Seize vies moyennes ont également été mesurées dans le Fe IV-VII, trois dans le Co VI-VIII et deux dans le Ni VII-VIII. Nous avons comparé nos résultats avec d'autres mesures.

## Bibliographie

- [1] FUHR, J.R., MARTIN, G.A., WIESE, W.L. et YOUNGER, S. M., *J. Phys. Chem. Ref. Data* **10** (1981) 305-565, *Atomic transition probabilities for iron, cobalt, and nickel (a critical data compilation of allowed lines)*.
- [2] DUMONT, P. D., BAUDINET-ROBINET, Y., GARNIR, H. P., BIÉMONT, E. et GREVESSE, N., *Phys. Rev. A* **20** (1979) 1347-51, *Beam-foil lifetime measurements in Fe V and Fe VI*.
- [3] KNYSTAUTAS, E. J. et DROUIN, R., *J. Phys.* **B 8** (1975) 2001-6, *New identifications and lifetime measurements of excited states in highly ionized oxygen*.
- [4] DRUETTA, M., JACQUES, C. et KNYSTAUTAS, E. J., *J. Phys.* **B 16** (1983) 167-76, *Etude des distributions des états de charge à l'équilibre dans le carbone, de la spectroscopie d'émission et des vies moyennes radiatives (Al VI-X) des ions d'aluminium*.
- [5] CORLISS, C. et SUGAR, J., *J. Phys. Chem. Ref. Data* **11** (1982) 135-241, *Energy levels of iron, Fe I through Fe XXVI*.
- [6] CORLISS, C. et SUGAR, J., *J. Phys. Chem. Ref. Data* **10** (1981) 197-289, *Energy levels of nickel, Ni I through Ni XXVIII*.
- [7] SUGAR, J. et CORLISS, C., *J. Phys. Chem. Ref. Data* **10** (1981) 1097-174, *Energy levels of cobalt, Co I through through Co XXVII*.
- [8] EKBERG, J. O. et EDLÉN, B., *Phys. Scr.* **18** (1978) 107-24, *Term analysis of Fe VI*.
- [9] EKBERG, J. O., *Phys. Scr.* **12** (1975) 42-57, *Term analysis of Fe V*.
- [10] EKBERG, J. O., *Phys. Scr.* **11** (1975) 23-30, *Term analysis of Fe VI*.
- [11] FAWCETT, B. C. et HENRICHS, H. F., *Astron. Astrophys. Suppl.* **18** (1974) 157-67, *An extended analysis of Fe V spectra and additional identifications of Fe VI*.
- [12] EKBERG, J. O., *Phys. Scr.* **23** (1981) 7-20, *Term analysis of Fe VII*.
- [13] JACQUES, C., KNYSTAUTAS, E. J., DROUIN, R. et BERRY, H. G., *Can. J. Phys.* **58** (1980) 1093-8, *Line identifications and lifetime measurements in singly and doubly excited C IV and C V*.