



HAL
open science

Détermination de la structure fine des états doublement excités $1s\ 2s\ 2p\ 4P^\circ$ et $1s\ 2p^2\ 4P$ et de la durée de vie du niveau $1s\ 2p^2\ 4P_{1/2}$ de Al XI

J.P. Buchet, M.C. Buchet-Poulizac, A. Denis, J. Desesquelles, M. Druetta, S. Martin, J.P. Grandin, D. Hennecart, X. Husson, D. Lecler

► To cite this version:

J.P. Buchet, M.C. Buchet-Poulizac, A. Denis, J. Desesquelles, M. Druetta, et al.. Détermination de la structure fine des états doublement excités $1s\ 2s\ 2p\ 4P^\circ$ et $1s\ 2p^2\ 4P$ et de la durée de vie du niveau $1s\ 2p^2\ 4P_{1/2}$ de Al XI. Journal de Physique Lettres, 1984, 45 (8), pp.361-366. 10.1051/jphyslet:01984004508036100 . jpa-00232355

HAL Id: jpa-00232355

<https://hal.science/jpa-00232355>

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

32.30J — 32.70F — 34.50H

Détermination de la structure fine des états doublement excités $1s\ 2s\ 2p\ ^4P^o$ et $1s\ 2p^2\ ^4P$ et de la durée de vie du niveau $1s\ 2p^2\ ^4P_{1/2}$ de Al XI

J. P. Buchet, M. C. Buchet-Poulizac, A. Denis, J. Desesquelles, M. Druetta, S. Martin

Laboratoire de Spectrométrie Ionique et Moléculaire (*), Université de Lyon 1, Campus de la Doua, 69622 Villeurbanne Cedex, France

J. P. Grandin, D. Hennecart, X. Husson et D. Lecler

Laboratoire de Spectroscopie Atomique (**), Université de Caen, 14032 Caen Cedex, France

(Reçu le 5 décembre 1983, accepté le 21 février 1984)

Résumé. — Nous avons mesuré les longueurs d'onde de structure fine des transitions $1s\ 2s\ 2p\ ^4P^o$ - $1s\ 2p^2\ ^4P$ et la durée de vie de l'état $1s\ 2p^2\ ^4P_{1/2}$ de Al XI par spectroscopie d'un faisceau d'ions accélérés à 1,16 MeV/nucléon et excités dans une feuille mince de carbone. Nous comparons nos résultats aux valeurs obtenues par divers calculs Hartree-Fock et Dirac-Fock multiconfigurationnel.

Abstract. — Using the beam-foil technique with an aluminium ion beam at 1.16 MeV/amu we have measured the fine structure of the $1s\ 2s\ 2p\ ^4P^o$ and $1s\ 2p^2\ ^4P$ terms in lithium-like Al XI, the wavelengths of transitions between them, and the lifetime of the $1s\ 2p^2\ ^4P_{1/2}$ level. Our results are compared with the Hartree-Fock and the multiconfiguration Dirac-Fock calculations.

L'interaction faisceau d'ions accélérés-cible solide mince est très efficace pour peupler les configurations multiexcitées [1, 2] qui posent des problèmes particulièrement intéressants de corrélation électronique et de théorie de la structure atomique. Les résultats ainsi obtenus depuis plus de dix ans comptent parmi les plus belles réussites de la physique atomique sur faisceaux d'ions rapides puisqu'il n'existe pas d'autres méthodes permettant d'obtenir des informations aussi fines sur les structures et la dynamique de ces niveaux.

Les états quadruplets, doublement excités, des systèmes à trois électrons représentent le cas le plus simple où le spin total est différent de celui des états à un seul électron excité (doublets). Ils sont métastables vis-à-vis de l'autoionisation coulombienne et des transitions de dipôle électrique vers les états simplement excités. Les transitions entre quadruplets peuvent donc être observées dans des faisceaux d'ions excités par une cible solide mince. Les résultats obtenus dans l'u.v. sont plus précis que les données de spectroscopie X ou d'électron Auger.

Rappelons tout d'abord qu'il existe deux méthodes principales pour mesurer une structure fine sur faisceaux rapides.

(*) Associé au CNRS N° 171.

(**) Associé au CNRS N° 19.

— La première, mesure directe de longueur d'onde par balayage du spectre est applicable lorsque la structure est suffisamment séparée.

— La deuxième consistant à observer les battements quantiques est mise en œuvre pour des structures plus serrées.

Cette deuxième méthode a pu être utilisée dans notre laboratoire (LA 171) par Gaupp *et al.* [3] pour la détermination de la structure fine et hyperfine d'états quadruplets du lithium neutre.

Mais dès que l'on a affaire à des systèmes ionisés, cette technique s'avère impraticable, car, la charge nucléaire Z augmentant, les structures éclatent de plus en plus. La mesure directe, par contre, devient possible.

Les premières mesures de structures fines des termes $1s\ 2s\ 2p\ ^4P^0$ et $1s\ 2p^2\ ^4P$ dans les ions multi-chargés sont le fait de Livingston et Berry [4], dans C IV, N V, O VI. A leur suite, Cheng *et al.* [5] ont effectué des calculs M.C.D.F. (Dirac-Fock Multiconfigurationnel) dont les résultats, ainsi que ceux, plus anciens, de Goldsmith [6] ne sont pas en bon accord avec l'expérience. Plus récemment, Träbert *et al.* [7] ont mesuré avec précision (3 %) les intervalles de structure fine de ces niveaux quadruplets dans Mg^{9+} .

Pour des ions plus lourds, ces expériences sont cependant rendues de plus en plus difficiles par la brièveté des durées de vie, en particulier du niveau $1s\ 2p^2\ ^4P_{5/2}$. En effet, son taux d'auto-ionisation augmente rapidement avec Z à cause des interactions avec les doublets, comme le montrent les calculs relativistes de Chen *et al.* [8].

Pour compléter l'ensemble des résultats expérimentaux déjà obtenus dans la séquence $1s\ 2s\ 2p\ ^4P^0$ - $1s\ 2p^2\ ^4P$ et l'étendre vers les charges nucléaires plus élevées, nous avons entrepris

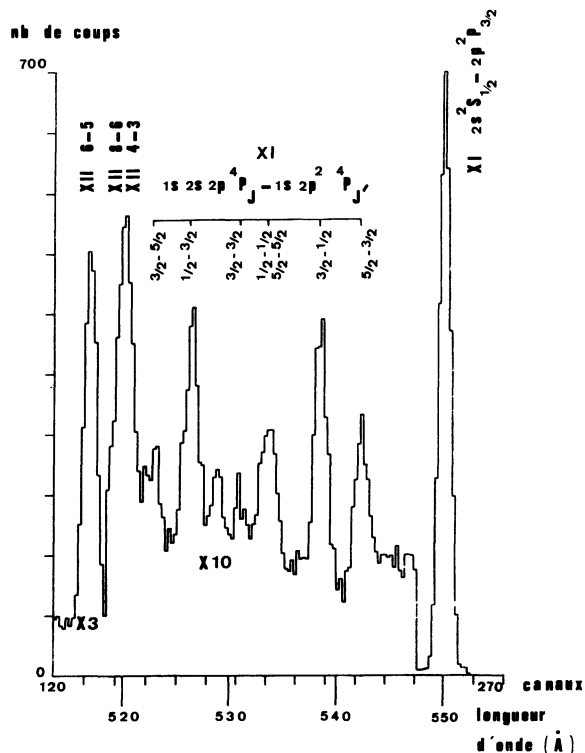


Fig. 1. — Raies de structure fine entre les états doublement excités $1s\ 2s\ 2p\ ^4P_J^0$ et $1s\ 2p^2\ ^4P_J$, de Al XI. [Fine structure wavelength spectrum between doubly excited states $1s\ 2s\ 2p\ ^4P_J^0$ and $1s\ 2p^2\ ^4P_J$, of Al XI.]

l'étude des ions aluminium et silicium à trois électrons. Nous présentons ici nos premiers résultats sur Al XI**.

Les ions lithuimoides de charge nucléaire $Z = 10-15$ sont produits, avec une bonne efficacité, par épluchage électronique des ions accélérés à 1,16 MeV/nucléon par le linéaire à ions lourds de l'IPN d'Orsay. La charge moyenne des ions aluminium à l'équilibre ($\approx 20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) est $\bar{c} \approx 9,7$ [9]. Les ions plus abondants ont donc pour charge 9^+ (Al X) ou 10^+ (Al XI).

Par extrapolation des résultats connus pour des ions de charge nucléaire plus faible, on peut prévoir que les raies du multiplet $1s 2s 2p^4 P^0 - 1s 2p^2 4P$ apparaissent dans la région des longueurs d'onde 520-550 Å légèrement inférieures à celles de la raie de résonance $1s^2 2s^2 S_{1/2} - 1s^2 2p^2 P_{3/2}^0$ de Al XI. Nous avons donc analysé le spectre dans ce domaine de l'u.v. lointain à l'aide d'un monochromateur Mc Pherson à incidence rasante, fixée à 83° , équipé d'un réseau à 600 traits/mm. La détection du signal se fait par comptage de photons à l'aide d'un channeltron Bendix. L'axe optique de détection fait un angle d'environ 90° avec l'axe du faisceau d'ions. La résolution spectrale, de l'ordre de 1,2 Å, obtenue pour une ouverture de fente de 150 μm , est suffisante pour séparer les composantes du multiplet qui ne se superposent pas par élargissement Doppler dû à l'angle solide d'ouverture du monochromateur ($\pm 0,56^\circ$).

Le spectre doublement excité est encadré par la raie de résonance $1s^2 2s^2 S_{1/2} - 1s^2 2p^2 P_{3/2}^0$ et la raie 5-6 de l'ion lithuimuide Al XI, qui toutes deux pourraient servir de raies de référence (Fig. 1). La longueur d'onde de la transition de résonance est calculée à $\lambda = 547,1$ Å par Cheng *et al.* [10] (M.C.D.F.). Plusieurs résultats expérimentaux obtenus par observation du rayonnement d'un plasma chaud [11] ou du soleil [12] ainsi qu'un ajustement dans la séquence isoélectronique sont utilisés par Edlen [13] pour proposer la valeur $\lambda = 550,04 \pm 0,01$ Å. C'est cette valeur que nous adoptons. Le signal observé vers 517 Å est dû aux transitions 5-6 de Al XII. Les composantes ne sont pas séparables. Le calcul du centroïde nécessite, en particulier, le choix d'une distribution de population et aboutit à une précision qui n'est pas meilleure que celle qui est associée à la transition lithuimuide $2s_{1/2} - 2p_{3/2}$ que nous choisirons donc comme raie de référence.

Tableau I. — *Spectre de l'aluminium à 1,16 MeV/nucléon entre 517 et 550 Å.*

[Aluminium spectrum between 517 and 550 Å at $E = 1.16$ MeV/amu.]

longueur d'onde	Identification
517,55 ± 0,08	XII 5-6
520,60 ± 0,04	{ XII 6-8 XII 3-4 (4e ordre)
523,02 ± 0,20	XI $4P_{3/2}^0 - 4P_{5/2}$
526,66 ± 0,06	XI $4P_{1/2}^0 - 4P_{3/2}$
529,8 ± 0,10	X $2p3p^1 D_2 - 2p4d^1 F_3$ (3e ordre)
531,08 ± 0,10	XI $4P_{3/2}^0 - 4P_{3/2}$
533,61 ± 0,06	{ XI $4P_{1/2}^0 - 4P_{1/2}$ et $4P_{5/2} - 4P_{5/2}$ X $2s3d^3 D_3 - 2s4f^3 F_4^0$ (3e ordre)
538,46 ± 0,04	XI $4P_{3/2}^0 - 4P_{1/2}$
542,31 ± 0,06	XI $4P_{5/2}^0 - 4P_{3/2}$
550,04 ± 0,01	XI $2s^2 S_{1/2} - 2p^2 P_{3/2}^0$ (raie de référence)

Tableau II. — Al XI**. *Structure fine des niveaux doublement excités* $2p^2\ ^4P_j$ *et* $2s\ 2p\ ^4P_j^0$ *et séparation des termes* $E\ (\text{cm}^{-1})$, $\lambda\ (\text{Å})$.[Fine structure and term separation of the doubly excited states $2p^2\ ^4P_j$ and $2s\ 2p\ ^4P_j^0$ of Al XI.]

	Goldsmith ^a	Cheng et al. ^b	Vainstein et Safronova ^c	Chen et al. ^d	Hata et Grant ^e	nos résultats
$2p^2$						
5/2 - 3/2	1008	2864 ^f	2865±200	2939	2943 ^f	2884±60
3/2 - 1/2	1847	2626 ^f	2707	2616	2629 ^f	2588±60
5/2 - 1/2	2855	5490	5572	5555	5572	5472±40
$2s2p$						
5/2 - 3/2	3768	3896 ^f	3975±200	3907	3937 ^f	3900±40
3/2 - 1/2	1048	1470 ^f	1430	1519	1540 ^f	1584±40
5/2 - 1/2	4806	5366	5405	5426	5477	5484±20
$E(2p^2-2s2p)$	186475	190840	187578 ^g	190878	187860	187580
$\lambda_{c.d.g.}$	536,2	≈524 ^f	533,1	523,9	532,3	533,1

^a Réf. [6];^b Réf. [5];^c Réf. [16];^d Réf. [8];^e Réf. [15];^f Valeurs obtenues par extrapolation;^g Valeur obtenue à partir des raies satellites de la référence [16] et de la valeur expérimentale pour la raie de résonance $2s_{1/2}-2p_{3/2}$ de Al XI.

Il est également nécessaire de connaître avec précision la courbe de dispersion du spectromètre. Celle-ci est déterminée par un étalonnage préalable effectué *in situ*. Pour ce faire, nous enregistrons le spectre émis en présence d'hélium ou de néon à faible pression (10^{-4} torr), par une jauge Penning placée dans la cellule d'expérience.

Les résultats du pointage des raies observées de 517 à 550 Å sont présentés dans le tableau I. Les barres d'erreur tiennent compte de l'incertitude sur la longueur d'onde théorique du pic de référence ($\pm 0,01$ Å), sur la position du centroïde du pic (résultat de deux spectres pris successivement dans des conditions voisines) et de l'effet de durée de vie sur le déplacement Doppler [14]. Ce dernier effet peut être important pour les transitions de durées de vie très courtes comparative-ment au temps de passage des ions dans la fenêtre d'observation. Les transitions issues du niveau $1s\ 2p^2\ ^4P_{5/2}$ ($\tau < 5$ ps) [8] sont les plus menacées de ce déplacement dans notre expérience où la fenêtre d'observation (≈ 1 mm) correspond à un transit de l'ordre de 80 ps. Des superpositions de raies d'ordres supérieurs viennent aussi perturber les mesures et expliquent en particulier la largeur du pic observé à 533,6 Å. Elles sont repérées dans des ordres inférieurs dans le spectre de longueurs d'onde plus courtes que nous avons aussi enregistré et dont l'analyse fera l'objet d'un article à venir.

De ces mesures, nous avons déduit la position relative des centres de gravité des deux multiplets $^4P^0$ et 4P et les écarts de structure fine. De la comparaison avec les valeurs théoriques [5-6-8-15-16] (Tableau II) il apparaît que l'accord est en général meilleur pour les structures fines que pour la position des centres de gravité. Cependant les valeurs récemment calculées par Hata et Grant [15] sont les plus proches des valeurs expérimentales, à la fois pour la structure et pour la longueur d'onde moyenne, indiquant qu'un calcul rigoureux des effets relativistes est nécessaire.

Nous avons pu aussi mesurer la durée de vie du niveau $1s\ 2p^2\ ^4P_{1/2}$ par analyse du déclin radiatif de la transition $1s\ 2s\ 2p\ ^4P_{3/2}^0-1s\ 2p^2\ ^4P_{1/2}$, la plus intense du spectre de structure fine. De la courbe

de déclin nous avons soustrait un bruit de fond relativement faible. La statistique ne permet pas de mettre en évidence des effets de cascades (Fig. 2). La durée de vie mesurée $\tau = 73 \pm 8$ ps, approchée à mieux que 10 % par le calcul de Chen *et al.* [8], est aussi une preuve intéressante d'une identification correcte des composantes du multiplet $1s 2s 2p^4 P^0 - 1s 2p^2 4P$.

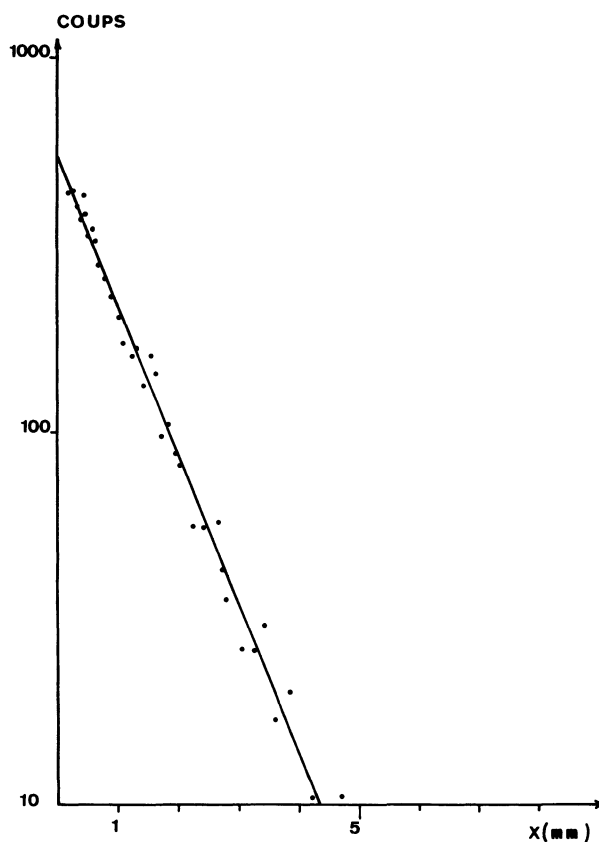


Fig. 2. — Courbe de déclin du niveau $1s 2p^2 4P_{1/2}$ vers le niveau $1s 2s 2p^4 P^0_{3/2}$ à 538,46 Å.

[Decay curve of the $1s 2p^2 4P_{1/2}$ level at 538.46 Å.]

Bibliographie

- [1] BERRY, H. G., *Phys. Scr.* **12** (1975) 5.
- [2] Fast Ion Spectroscopy, *J. Physique Colloq.* (1979) C1, Comptes rendus de la 5^e Conférence Internationale sur la « Beam-foil Spectroscopy », Lyon 1978 ;
Fast Ion Spectroscopy, *Nucl. Instrum. Meth.* (1982) 202, Comptes rendus de la 6^e Conférence Internationale sur la « Beam-foil Spectroscopy », Québec 1981.
- [3] GAUPP, A., DUFAY, M. and SUBTIL, J. L., *J. Phys. B* **9** (1976) 2365.
- [4] LIVINGSTON, A. E., BERRY, H. G., *Phys. Rev. A* **17** (1978) 1966.
- [5] CHENG, K. T., DESCLAUX, J. P. and KIM, Y. K., *J. Phys. B* **11** (1978) L-359.
- [6] GOLDSMITH, S., *J. Phys. B* **7** (1974) 2315.
- [7] TRÄBERT, E., HELLMANN, H., HECKMANN, P. H., BASHKIN, S., KLEIN, H. A., SILVER, J. D., *Phys. Lett. A* **93** (1982) 76.

- [8] CHEN, M. H., CRASEMANN, B., MARK, H., *Phys. Rev. A* **26** (1982) 1441.
 - [9] BARON, E., Thèse IPN Orsay (1975), non publiée.
 - [10] CHENG, K. T., KIM, Y. K. and DESCLAUX, J. P., *At. Data Nucl. Data Tables* **24** (1974) 111.
 - [11] FAWCETT, B. C., *J. Phys. B* **3** (1970) 1152.
 - [12] DERE, K. P., *Astrophys. J* **221** (1978) 1062.
 - [13] ELDEN, B., *Phys. Scr.* **19** (1979) 255 et *Phys. Scr.* **28** (1983) 51.
 - [14] BUCHET, J. P., BUCHET-POULIZAC, M. C., DENIS, A., DESEQUELLES, J., DRUETTA, M., KNYSTAUTAS, E., LECLER, D., *Nucl. Instrum. Meth.* **202** (1982) 79.
 - [15] HATA, J., GRANT, I. P., *J. Phys. B* **16** (1983) 915.
 - [16] VAINSTEIN, L. A., SAFRONOVA, V. I., *At. Data Nucl. Data Tables* **21** (1978) 49.
-