

DÉVELOPPEMENTS RÉCENTS EN SPECTROSCOPIE DES CONTINUS ATOMIQUES ET DES RAIES AUTOIONISÉES

Par Jean KIEFFER et Nicole DAMANY-ASTOIN

(Laboratoire des Hautes Pressions C. N. R. S. Bellevue, Seine et Oise, France)

SOMMAIRE. — *Étude bibliographique des principales recherches expérimentales faites depuis dix ans sur les continus atomiques et l'autoionisation. On s'est limité aux groupes des alcalins, des alcalino-terreux et des gaz rares. Tous les travaux mentionnés, d'autre part, à l'exception d'un seul, portent sur les spectres d'absorption.*

On signale les relations avec la théorie et on donne les références théoriques les plus importantes.

ABSTRACT. — *Bibliographical study of the principal experimental research of the last ten years on atomic and autoionization continua. We have restricted ourselves to the alkaline, alkaline-ferrous and rare gas groups. Moreover, with one exception, all the work cited is concerned with absorption spectra.*

We indicate the connections with theory and give the most important of the theoretical references.

Резюме. — Библиографическое изучение главных экспериментальных исследований произведенных за 10 лет об атомных континуумах и автоионизации. Оно ограничено щелочными, щелочноземлистыми группами и редкими газами. Кроме того, все упомянутые труды. За исключением одного, относятся к спектрами поглощения.

Отмечены соотношения с теорией и приведены самые важные теоретические ссылки.

Les progrès techniques récents qui ont permis, entre autre, à l'astrophysicien de s'affranchir de l'absorption due à l'atmosphère terrestre et, par voie de conséquence, de photographier le spectre ultraviolet du Soleil et des étoiles, ont mis l'accent sur la nécessité de développer l'étude au laboratoire de certains spectres encore peu connus.

Le but du présent exposé est de présenter sous forme condensée un certain nombre de travaux relativement récents consacrés aux spectres continus atomiques dans l'ultraviolet lointain, et plus particulièrement aux phénomènes d'autoionisation. Cette région spectrale n'avait été que peu prospectée jusqu'à ces dernières années, notamment aux longueurs d'onde inférieures à 1500 Å, étant donné qu'il n'existait pas dans ce domaine de source continue d'un emploi commode pour étudier la structure des spectres d'absorption. Ce n'est que très récemment que MADDEN et CODLING [1] d'une part, en utilisant le rayonnement continu émis par le synchrotron à électrons de 180 MeV du N. B. S., et nous-mêmes [2] d'autre part, grâce au continu émis par une étincelle sous vide à trois électrodes et à montage coaxial à self très faible [3], avons pu obtenir des spectres d'absorption des gaz rares jusqu'à des longueurs d'onde inférieures à 150 Å.

Un certain nombre d'expériences sur l'absorption des vapeurs de métaux alcalins ont été effectuées dès 1929 et dans les années suivantes. DIRCHBURN, JUTSUM et MARR [4] ⁽¹⁾ ont complété ces recherches en publiant en 1953 leurs résultats sur le sodium et en présentant une discussion d'ensemble des observations déjà acquises, comparant en particulier, dans la mesure du possible, les données de l'expérience aux prévisions théoriques. Ces observations expérimentales se situent dans l'ensemble approximativement entre 3000 et 1500 Å.

La discussion porte essentiellement sur les points suivants: importance de l'absorption moléculaire, moyens de la séparer de l'absorption proprement atomique, valeur de la section efficace d'absorption continue à la limite de série, variation de la section efficace avec la longueur d'onde, existence d'un minimum d'absorption.

Un tableau réunit les diverses valeurs théoriques et expérimentales alors connues pour la section efficace à la limite de série. Les écarts entre expérience et théorie sont de manière générale assez sensibles, les causes principales de ce

⁽¹⁾ On trouvera dans ce travail les références des publications plus anciennes.

désaccord sont signalées ; en fin de compte le seul résultat réellement satisfaisant se trouve dans l'accord entre un calcul de SEATON [5] et les mesures des auteurs [4] sur la vapeur de sodium (respectivement 10 et $11,6 \pm 1,2$ en unités 10^{-20} cm^2).

En ce qui concerne l'existence d'un minimum d'absorption, la situation est la suivante : l'expérience décèle un minimum pour le sodium, le potassium et le césium. Dans le cas du rubidium l'existence d'un minimum paraît très probable, tandis que le domaine spectral exploré pour le lithium est trop étroit (de 2250 à 1800 Å) pour qu'on puisse conclure. — Après quelques hésitations, la théorie a pu justifier l'existence d'un minimum d'absorption [5] [6] [7] [8] en tenant compte de la polarisabilité des couches électroniques internes. Parfois, comme pour le sodium [5], elle a même assez correctement situé ce minimum dans l'échelle des longueurs d'onde. Pour la valeur de la section efficace d'absorption correspondante par contre, la situation est dans l'ensemble encore moins bonne qu'à la limite de série. Pour le sodium en particulier, pour lequel le résultat expérimental paraît le moins contestable, la théorie donne une valeur mille fois trop faible, résultat assez surprenant si l'on se rappelle que c'est précisément pour ce corps qu'expérience et théorie se sont trouvées être en assez bon accord tant pour la situation au minimum que pour la valeur de la section efficace à la limite de série.

En 1953 toujours, DITCHEBURN et MARR [9] d'une part, JURSUM [10] d'autre part, ont publié les résultats de leurs expériences sur l'absorption par les vapeurs de magnésium et de calcium au voisinage de la limite de série, soit approximativement de 1650 à 1450 Å pour le magnésium et de 2050 à 1950 Å pour le calcium. Ici, contrairement à ce qui se passait dans les vapeurs d'alcalins, l'absorption moléculaire était négligeable.

Dans le cas du magnésium la valeur de la section efficace d'absorption à la limite de série est de $1,18 \cdot 10^{-18} \text{ cm}^2$ et diminue ensuite assez rapidement vers les courtes longueurs d'onde. Une comparaison directe avec la théorie n'était pas possible. Mais en extrapolant la branche expérimentale vers les courtes longueurs d'onde et évaluant la force d'oscillateur correspondante pour le continu d'absorption dans sa totalité on est conduit à une valeur très inférieure à la valeur théorique. Les auteurs en concluent qu'il est donc possible que leurs données expérimentales soient trop faibles et qu'il est possible aussi que, comme pour les alcalins, il existe un minimum

d'absorption vers les courtes longueurs d'onde.

Dans le cas du calcium la valeur de la section efficace d'absorption à la limite de série est de $0,45 \cdot 10^{-18} \text{ cm}^2$. Ici la comparaison avec un calcul théorique de BATES et MASSEY [11] est possible ; ce dernier donne une valeur d'une cinquantaine de fois supérieure, qui cependant de l'avis même des calculateurs pêche par excès. Ici encore le calcul de la force d'oscillateur du continu par extrapolation de la branche expérimentale donne une valeur très inférieure à la valeur théorique, les raisons en étant vraisemblablement les mêmes que dans le cas du magnésium.

PO LEE et WEISSLER [12], [13] pour leur part, à partir de 1953, renouèrent avec des recherches déjà anciennes sur l'absorption continue dans les gaz rares de CUTHBERTSON [14] et de BEUTLER (1) en publiant leurs résultats sur le néon, l'hélium et l'argon.

L'absorption du néon est étudiée entre 800 et 230 Å. La section efficace d'absorption continue cesse soudainement d'avoir une valeur nulle à la longueur d'onde qui correspond à la première limite d'ionisation du néon (passage à Ne II dans l'état $2s^2 2p^5 \ ^2P_0$). On sait que Ne II possède les deux termes $^2P_{3/2}^0$ et $^2P_{1/2}^0$ séparés par 787 cm^{-1} . Les conditions expérimentales (source de raies) n'ont pas permis alors d'étudier en détail la structure du spectre entre les deux longueurs d'onde correspondantes (574,94 Å et 572,77 Å). Mais les auteurs signalent que l'existence de raies d'auto-ionisation dans ce domaine leur paraît très vraisemblable, apportant ainsi un nouvel argument en faveur de certaines considérations théoriques [15] [16] [17] [18] [19] et de certaines observations qualitatives [20] déjà anciennes. — En ce qui concerne la valeur de la section efficace d'absorption, elle paraît en excellent accord avec un calcul de SEATON [5] basé sur l'hypothèse de « longueur de dipole », tandis qu'un autre calcul du même basé sur l'hypothèse de « vitesse de dipôle » paraît beaucoup moins satisfaisant. A la limite de série les valeurs expérimentale et théorique (première hypothèse) sont respectivement : $5,4 \cdot 10^{-18}$ et $5,8 \cdot 10^{-18} \text{ cm}^2$. L'accord se maintient jusque vers 400 Å où s'arrête le calcul. La courbe expérimentale indique en ce point un maximum d'absorption, diminue ensuite progressivement jusqu'à 256 Å où elle subit un accroissement subit, un électron « s » étant excité vers un état « p » et un nouveau continu d'ionisation commençant à se

(1) On trouvera une analyse avec références de nombreux travaux de BEUTLER dans l'exposé général sur la spectroscopie UV publié par BOYCE en 1941. : *Rev Mod. Phys.*, 13, p. 1, 1941.

former sur $\text{Ne II } 2s2p^6 \ ^2S_{1/2}$. Ensuite la décroissance recommence jusqu'au seuil d'observation vers 230 Å. Dans cette région aucun effet d'auto-ionisation n'a été observé.

L'absorption de l'hélium a été étudiée entre 600 et 200 Å. L'absorption continue débute soudainement vers 504 Å (passage à He II dans l'état de résonance). L'évolution de la valeur de la section efficace d'absorption indiquée par l'expérience est comparée à des calculs théoriques de WHEELER [21] et de VINTI [22]. A la limite de série les résultats expérimentaux extrapolés sont en excellent accord avec la valeur prévue par WHEELER (respectivement 7,4 et 7,3 10^{-18} cm^2). Ensuite, progressant vers les courtes longueurs d'onde, l'expérience semble plus proche des données de VINTI.

L'absorption de l'argon enfin a été étudiée entre 800 et 300 Å approximativement. Trois continus d'absorption ont été mis en évidence, correspondant respectivement à l'ionisation de l'argon vers les états

$\text{A II } 3s^2 3p^5 \ ^2P_{3/2}^0$	commençant à 781,2 Å
$\text{A II } 3s^2 3p^5 \ ^2P_{1/2}^0$	commençant à 779,8 Å
$\text{A II } 3s 3p^6 \ ^2S_{1/2}$	commençant à 420 Å

DALGARNO [23] a évalué théoriquement la section efficace d'absorption au seuil du premier continu sans séparer les deux premiers états très rapprochés de l'ion A II . Il donne une valeur de $3 \cdot 10^{-17}$ cm^2 qui peut être comparée favorablement à la valeur expérimentale de $3,5 \cdot 10^{-17}$ cm^2 pour le seuil $\ ^2P_{1/2}^0$ puisqu'en ce point l'expérience « additionne » elle aussi sans plus l'apport des deux continus qui s'y superposent. Il a d'ailleurs été possible de déceler expérimentalement deux processus d'ionisation vers l'état $\ ^2P_{3/2}^0$; les sections efficaces ont des valeurs moitié moindres, ce qui montre que les contributions des deux premiers états de A II au continu sont au départ tout au moins sensiblement équivalentes. — Enfin les raies diffuses observées entre les deux limites de série indiquent nettement l'existence d'états auto-ionisés qui viennent superposer leurs raies au premier continu et confirmer les observations déjà anciennes de BEUTLER [20].

Allant vers les courtes longueurs d'onde la section efficace d'absorption diminue progressivement jusqu'à 420 Å où l'entrée en jeu du troisième continu lui fait subir un accroissement sensible et instantané, suivi d'une nouvelle diminution jusqu'à la plus courte longueur d'onde encore observée (moins de 300 Å).

Les auteurs signalent enfin, avant l'apparition du troisième continu et se trouvant répartis plus ou moins régulièrement entre 500 et 420 Å, un certain nombre de points isolés donnant des sections efficaces d'absorption particulièrement élevées. Ces points pourraient selon eux être dus à des états auto-ionisés, hypothèse dont l'expérience ultérieure vérifierait l'exactitude.

A la suite de ces divers travaux, et toujours en 1955, MARR [24] a rassemblé un certain nombre de valeurs expérimentales et théoriques qui étaient alors connues. Dans ce travail on trouvera notamment les références de quelques publications que nous n'avons pas eu l'occasion de mentionner. — L'auteur étudie la valeur que prend la section efficace d'absorption des atomes neutres à la limite de série du premier continu et tente de relier cette valeur à la structure électronique de la couche extérieure des éléments. Reliant à cet effet par une courbe les éléments de même structure périphérique, il constate que l'absorption connaît un minimum lorsque des électrons viennent se poser sur une nouvelle couche avant que les couches intérieures ne soient saturées (apparition d'électrons sur la couche $n = 4$ pour le potassium, le calcium, etc...).

Nous avons déjà eu l'occasion de mentionner le phénomène d'auto-ionisation à propos des travaux de PO LEE et WEISSLER. A mesure que la technique des sources dans l'ultraviolet se perfectionnait, ce problème des niveaux très excités des atomes superposés à un continu d'absorption allait se développer et connaître un regain d'intérêt chez les expérimentateurs. Les théoriciens pour leur part allaient renouer avec les préoccupations des années 30 (travaux cités ci-dessus); FANO [25] a donné en 1961 un exposé très complet de la question, discutant en particulier les profils des raies d'auto-ionisation qu'on pouvait s'attendre à observer tant en absorption qu'en émission. Nous allons passer brièvement en revue les principaux travaux des toutes dernières années consacrées à ce problème, au laboratoire, nous contentant de signaler dans quelle mesure ils ont confirmé la théorie de FANO. Tous ces travaux, à l'exception d'un seul ont été faits en absorption.

GARTON, PERRY et CODLING [26] ⁽¹⁾ ont exposé en détail quelques exemples frappants d'auto-ionisation et ont décrit leurs effets sur le continu sous-jacent, sur la dispersion et sur les probabilités de recombinaison. Leurs propres recherches expérimentales portent de manière générale sur des

⁽¹⁾ Cette publication donne d'autres références GARTON *et alii*.

éléments assez lourds (Ca, S, Ba ⁽¹⁾, Cu, Au, Yb) qui intéressent peu l'astrophysicien. Mais il faut mentionner un résultat assez surprenant de leurs recherches sur les gaz rares. On avait cru jusqu'alors que les propriétés de réfraction dans l'ultraviolet à quartz pouvaient s'expliquer en ajoutant à l'effet du continu celui des raies de BEUTLER. En estimant directement les forces d'oscillateur de ces dernières, GARTON *et ali.* ont montré qu'il n'en est rien, l'apport de ces dernières étant 20 fois trop faible.

GARTON [27], dans un article d'allure synthétique et récapitulative, est revenu sur l'intérêt que présente la connaissance des forces d'oscillateur des raies d'autoionisation, ainsi que celle des demi-largeurs et des profils de ces raies. Son travail résume un certain nombre de faits expérimentaux, donnant en particulier les références de quelques nouveaux travaux de l'équipe de DITCHEBURN et de la sienne ; ces résultats sont comparés à la théorie de FANO. L'auteur signale pour conclure les travaux en cours et l'intérêt de certaines recherches à effectuer, recherches qui dans l'ensemble portent sur des éléments lourds. GARTON signale cependant une transition dans l'hélium neutre ($1s^2 \ ^2S_0 - 1s1p \ ^1P_1^0$) que FANO [25] et SILVERMAN-LASSETTRE [28] avaient déjà située vers 200 Å et que MADDEN-CODLING n'allaient pas tarder à déceler spectroscopiquement.

Ainsi que nous l'avons signalé au début de cet article, MADDEN et CODLING [1] ont utilisé dans leurs recherches comme source le rayonnement continu émis par un synchrotron à électrons. Ils ont ainsi pu observer pour la première fois des raies d'autoionisation dans l'hélium et dans le néon, cependant que dans l'argon ils ont pu corroborer l'hypothèse de PO LEE et WEISSLER [13], entre temps reprise par certains autres [29] [30] [31] [32], sur l'existence d'états autoionisables de grande énergie.

Pour l'hélium certains états autoionisables avaient déjà pu être décelés par des expériences de diffusion d'électrons relativement anciennes [33] [34] et plus récentes [28]. Les théoriciens s'étaient efforcés d'évaluer leurs probabilités d'existence [25] [35] [36] [37] [38] ⁽²⁾. — MADDEN et CODLING ont pu mettre en évidence les raies d'autoionisation suivantes :

la raie He I $1s^2 \ ^1S_0 - 2s2p \ ^1P_1^0$ vers 206 Å, raie qui n'est autre que celle qu'on a mentionnée ;

⁽¹⁾ Étude détaillée du spectre Ba dans GARTON-CODLING, *Proc. Phys. Soc.* **75**, 1960, pp. 87-94.

⁽²⁾ D'autres références dans ces publications.

une raie vers 195 Å également signalée par SILVERMAN et LASSETTRE [28] ;

huit autres raies convergeant vers l'un ou l'autre des premiers états excités de l'ion He II ($2s \ ^2S_{1/2}$, $2p \ ^2P_{1/2}^0$ et $_{3/2}$). COOPER *et ali.* [39] ont donné une étude théorique de ces séries.

Dans l'ensemble toutes ces raies ont les profils prévus par FANO et les auteurs pensent utiliser leurs résultats pour faire une évaluation précise des forces d'oscillateur dans le spectre.

Neuf raies ont été observées dans le néon. Situées entre 280 et 250 Å, elles correspondent vraisemblablement à des transitions $2s^2 2p^6 \ ^1S_0 - 2s2p^6 np \ ^1P_1^0$ de l'atome Ne I allant converger vers un état excité de l'ion Ne II. Les profils de ces raies sont dans l'ensemble assez semblables à ceux des raies observées dans l'hélium. — Un nombre assez important d'autres raies n'avaient pas encore été identifiées au moment de la publication —.

Dans l'argon enfin les principales raies d'absorption qu'on a observées se trouvent entre 470 et 420 Å. Elles correspondent aux transitions de l'atome neutre A I. $3s^2 3p^6 \ ^1S_0 - 3s3p^6 np \ ^1P_1^0$ convergent vers l'état excité de l'ion A II $3s3p^6 np \ ^2S_{1/2}$ qui donne lieu au troisième continu d'absorption de l'argon et confirment, ainsi que nous l'avons dit, les vues de PO LEE et autres. Contrairement à ce qui se passait dans l'hélium et dans le néon, les raies observées dans l'argon ont un profil asymétrique très prononcé ; FANO avait théoriquement prévu l'existence de tels profils.

MADDEN et CODLING [40] toujours ont également mis en évidence des séries de raies d'autoionisation dans le krypton et dans le xénon. Le premier seuil d'ionisation pour ces substances se trouve respectivement à 885,6 et à 1022,1 Å. Les raies observées qui s'échelonnent entre 600 et 380 Å correspondent donc à des états relativement excités des atomes neutres. Ces raies sont pour le krypton :

celles d'une série Kr I $4s^2 4p^6 \ ^1S_0 - 4s4p^6 np \ ^1P_1^0$ correspondant donc à l'excitation d'un électron unique « s » et convergeant vers un état de l'ion excité Kr II $4s4p^6 \ ^2S$ à 450,6 Å ;

celles d'une série

$$\text{Kr I } 4s^2 4p^3 \ ^1S_0 - 4s^2 4p^4 5s np \ ^1P_1^0$$

correspondant donc à l'excitation simultanée de deux électrons « p » et convergeant vers un état de l'ion excité Kr II $4s^2 4p^4 5s \ ^2S$ à 386,5 Å ;

enfin un nombre important de raies non-identifiées au moment de la publication.

Dans le spectre particulièrement complexe du

xénon la seule série identifiée avec certitude au moment de la publication correspondait aux transitions Xe I $5s^25p^6 1S_0 - 5s5p^6np 1P_1^0$, mettant donc en jeu un seul électron « *s* » et convergeant à 529,9 Å sur un état excité de l'ion Xe II.

Peu après, des recherches faites par CODLING et MADDEN [41] d'une part, par nous-mêmes [2] d'autre part, sur le krypton et le xénon ont permis de déceler dans ces deux corps l'existence d'états autoionisables encore plus énergétiques. Les raies observées se situent en effet en-dessous de 200 Å. Elles sont dues à l'excitation d'un électron d'une couche interne de l'atome. De façon précise les raies observées paraissent pouvoir être classées pour le krypton, dans la série de transitions Kr I $3d^{10}4s^24p^6 1S_0 - 3d^94s^24p^6np 1P_1^0$, faisant donc passer un électron « *3d* » sur une orbite « *np* » et allant converger sur l'état excité de l'ion Kr II $3d^94s^24p^6 2D_{3/2}$ et $5/2$;

pour le xénon, dans la série de transitions Xe I $4d^{10}4s^25p^6 1S_0 - 4d^95s^25p^6np 1P_1^0$, faisant donc passer un électron « *4d* » sur une orbite « *np* », et allant converger sur l'état excité de l'ion Xe II $4d^95s^24p^6 2D_{3/2}$ et $5/2$.

Deux notes très récentes apportent de nouvelles précisions sur l'existence d'états autoionisables dans les gaz rares. SIMPSON MIELCZAREK et COOPER [42] ont utilisé la méthode de diffusion des électrons (90 à 100 eV). Ils ont pu confirmer ainsi l'existence dans les divers gaz rares d'un certain nombre d'états autoionisables déjà mis en évidence précédemment. Mais le résultat le plus frappant de leurs recherches est la découverte de tels états que les expériences de photoionisation ne pouvaient pas déceler, les transitions optiques vers ou à partir d'eux étant interdites. Un grand nombre de ces états sont identifiés. On fait remarquer enfin que l'intensité des électrons diffusés donne des « profils » conformes à la théorie de FANO.

SAMSON [43] ⁽¹⁾ a repris l'étude de l'argon et a présenté son spectre d'absorption complet entre 800 et 300 Å. L'existence des différents états discrets superposés aux continus est confirmée. L'auteur constate d'autre part qu'en-dessous de 400 Å le coefficient d'absorption du continu diminue avec une rapidité surprenante. Un calcul de la force d'oscillateur donne pour la couche M la valeur globale $f = 5,99$, alors que d'après la loi de THOMAS-KUHN on doit s'attendre à trouver une valeur de $f = 8$. Il semble donc que, dans la

mesure où l'absorption vers les courtes longueurs d'onde n'est pas surestimée dans ces expériences, les électrons « *s* » ne jouent qu'un rôle secondaire.

Nous terminerons ce travail par le rappel de résultats récemment publiés par TILFORD et WILKINSON [44]. Ils nous paraissent être d'un intérêt incontestable pour l'astrophysicien, puisqu'il s'agit d'un spectre d'émission, donc susceptible d'être observé directement.

On connaissait déjà des exemples de raies d'émission partant d'états autoionisables [45] [46] [47]. Toutes ces raies présentaient des profils parfaitement symétriques. TILFORD et WILKINSON, en étudiant les spectres d'émission de O II, O III et N III, ont pu observer pour la première fois en émission des profils asymétriques également prévus par FANO. Leur note donne des détails sur O III.

On signale d'abord une raie fortement asymétrique à 226,024 Å. Cette raie correspond à la transition $2s^22p^2 3P - 2s2p(4P) 4p 3D^0$. Les tables de MOORE donnent la première limite d'ionisation de O III en 225,64 Å. Il semble donc que la raie en question se trouve encore en-dessous de la limite d'ionisation. Mais les auteurs pensent qu'un abaissement de la limite d'une part, la largeur de la raie d'autre part, font de celle-ci une raie d'autoionisation.

Une autre raie, symétrique celle-là, se trouve en 225,200 Å. Elle est donc incontestablement superposée au continu et correspond à la transition

$$2s^2 2p^2 3P - 2s 2p^2(4P) 4p 3P^0.$$

Chacune de ces deux raies est la première d'une série :

la raie asymétrique donne la série de raies asymétriques,

$$2s^2 2p^2 3P - 2s 2p^2(5P) np 3D^0 ;$$

la raie symétrique donne la série de raies symétriques

$$2s^2 2p^2 3P - 2s 2p^2(4P) np 3P^0.$$

Les raies sont observées jusqu'en-dessous de 200 Å et finissent par se fondre les unes dans les autres, la symétrie de l'une des séries cachant alors l'asymétrie caractéristique de l'autre.

Manuscrit reçu le 4 novembre 1964.

⁽¹⁾ Cette note donne quelques références que nous n'avons pas eu l'occasion de mentionner dans notre texte.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] MADDEN R. P. et CODLING D., 1963, *Phys. Rev. Let.*, **10**, 516.
- [2] DAMANY-ASTOIN N., 1964, *C. R. Acad. Sci.*, **259**, 1493.
- [3] BALLOFFET G., ROMAND J. et KIEFFER J., 1962, *Spectrochim. Acta*, **18**, 791.
- [4] DITCHBURN R. W., JUTSUM P. J. et MARR G. V., 1953, *Proc. Roy. Soc.*, A **219**, 89.
- [5] SEATON M. J., 1951, *Proc. Roy. Soc.*, A **208**, 418.
- [6] PHILLIPS M., 1932, *Phys. Rev.*, **39**, 905.
- [7] BATES D. R., 1946, *Month. Not. Roy. Astron. Soc.*, **106**, 432.
- [8] MISHRA B., 1948, *Thèse*, Londres.
- [9] DITCHBURN R. W. et MARR G. V., 1953, *Proc. Phys. Soc.*, A **66**, 655.
- [10] JUTSUM P. J., 1954, *Proc. Phys. Soc.*, A **67**, 190.
- [11] BATES D. R. et MASSEY H. S. W., 1941, *Proc. Roy. Soc.*, A **177**, 329.
- [12] PO LEE-WEISSLER G. L., 1953, *Proc. Roy. Soc.*, A **220**, 71.
- [13] PO LEE-WEISSLER G. L., 1955, *Phys. Rev.*, **99**, 540.
- [14] CUTHBERTSON C., 1927, *Proc. Roy. Soc.*, A **114**, 650.
- [15] MAJORANA T., 1931, *Nuovo Cimento*, **8**, 107.
- [16] WHITE H. E., 1931, *Phys. Rev.*, **38**, 2016.
- [17] SHENSTONE A. G., 1931, *Phys. Rev.*, **38**, 873, 1932, *Phys. Rev.*, **39**, 63.
- [18] RICE O. K., 1933, *J. Chem. Phys.*, **1**, 375.
- [19] FANO U., 1935, *Nuovo Cimento*, **12**, 156.
- [20] BEUTLER H., 1935, *Zeits. f. Phys.*, **93**, 177.
- [21] WHEELER J. A., 1933, *Phys. Rev.*, **43**, 258.
- [22] VINTI J. P., 1933, *Phys. Rev.*, **44**, 524.
- [23] DALGARNO A., 1952, *Proc. Phys. Soc.*, A **65**, 666.
- [24] MARR G. V., 1955, *Proc. Phys. Soc.*, A **68**, 544.
- [25] FANO U., 1961, *Phys. Rev.*, **124**, 1866.
- [26] GARTON W. R. S., PERRY A. et CODLING K., 1959, *Proc. 4th. Internat. Conf. Ionisat. Phen. Gases. Upsala*, **1**, 209, North-Holland, Amsterdam.
- [27] GARTON W. R. S., 1962, *J. Quantit. Spectr. Radiat. Transf.*, **2**, 335.
- [28] SILVERMAN S. et LASSETTRE E. N., Rep. n° 9, R. F. Project 464, Ohio State Un.
- [29] DITCHBURN R. W., 1960, *Proc. Phys. Soc.*, A **75**, 461.
- [30] AXELROD N. N. et GIVENS M. P., 1959, *Phys. Rev.*, **115**, 97.
- [31] WAINFAN N., WALKER W. C. et WEISSLER G. L., 1955, *Phys. Rev.*, **99**, 542.
- [32] BAKER D. J., BEDO D. E. et TOMBOULIAN D. H., 1961, *Phys. Rev.*, **124**, 1471.
- [33] WHIDDINGTON R. et PRIESTLEY H., 1934, *Proc. Roy. Soc.*, A **145**, 462.
- [34] PRIESTLEY H. et WHIDDINGTON R., 1935-40, *Proc. Leeds Phil. Soc.*, **3**, 81.
- [35] TA YON WU, 1944, *Phys. Rev.*, **66**, 291.
- [36] BRANSDEN D. H. et DALGARNO A., 1953, *Proc. Phys. Soc.*, A **66**, 904.
- [37] BURKE P. G. et McVICAR D. D., 1963, *Phys. Rev. Let.*, **11**, 559.
- [38] BURKE P. G. et McVICAR D. D., 1964, *Proc. Phys. Soc.*, **83**, 397.
- [39] COOPER J., FANO U. et PRATS F., 1963, *Phys. Rev. Let.*, **10**, .
- [40] MADDEN R. P. et CODLING D., 1964, *JOSA*, **54**, 268.
- [41] CODLING D. et MADDEN R. P., 1964, *Phys. Rev. Let.*, **12**, 106.
- [42] SIMPSON J. A., MIELCZAREK S. R. et COOPER J., 1964, *JOSA*, **54**, 269.
- [43] SAMSON J. A. R., 1964, *JOSA*, **64**, 420.
- [44] TILFORD S. G. et WILKINSON P. G., 1964, *JOSA*, **54**, 322.
- [45] SHENSTONE A. G., 1947, *Phil. Trans. Roy. Soc.*, 1947, A **241**, 297.
- [46] SHENSTONE A. G., 1948, *Phys. Rev.*, **57**, 894.
- [47] EDLÉN B., 1963, *Handbuch der Physik*, **27**, 80.