

TRIBUNE DE DISCUSSION

QUELQUES RÉSULTATS APPAREMMENT NON EXPLIQUÉS

DANS LES EXPÉRIENCES D'EXCITATION ATOMIQUE

PAR COLLISION ÉLECTRONIQUE (DU TYPE FRANCK ET HERTZ)

I - Introduction

L'expérience de Franck et Hertz⁽¹⁾ est considérée comme l'une des expériences cruciales prouvant la validité du modèle des niveaux d'énergie atomiques proposé par Bohr, modèle d'ailleurs intégré dans la théorie quantique développée par la suite (voir par exemple le cours de Physique de Berkeley⁽²⁾, section 3.8, p. 100-101). Rappelons le principe de cette expérience : on envoie sur les atomes d'un gaz un faisceau d'électrons monocinétiques afin d'étudier les possibilités de transfert d'énergie de ces électrons aux atomes. D'après le modèle des niveaux, l'énergie de l'atome peut prendre seulement des valeurs discrètes, donc un transfert d'énergie peut en principe avoir lieu seulement si l'énergie de l'électron incident est supérieure ou égale aux énergies des différentes transitions possibles. En fait ce schéma peut être plus compliqué si l'on prend en considération la possibilité de formation d'ions négatifs métastables (voir par exemple l'article de revue de Schulz⁽³⁾), mais cette possibilité ne fut considérée historiquement que beaucoup plus tard.

Nous voulons présenter ici les éléments essentiels de l'histoire de la méthode des chocs électroniques entre 1914 et 1933 car elle révèle comment une théorie impose à l'expérimentateur un choix parmi ses résultats expérimentaux et comment des résultats inexplicables sont tout simplement abandonnés. Il nous a semblé intéressant de montrer qu'aujourd'hui encore, des résultats sont restés apparemment non expliqués dans des expériences aussi cruciales concernant la structure atomique.

toire dans

ZIN

OCHE

T

éral du
recteur

CAS
GNAN
PANGE
ARD

is extérieures :
NER

II - Des origines à 1926 : les résonances au dessus du premier niveau excité

Sommerfeld examine en détail cette histoire entre 1914 et 1921 dans la troisième édition allemande (1922) de *Atombau and Spektrallinien*⁽⁴⁾. On trouvera aussi une présentation détaillée des faits expérimentaux dans le livre de Léon Bloch⁽⁵⁾. Dans leurs expériences initiales, Franck et Hertz observent les variations du courant d'électrons passant à travers la vapeur de mercure en fonction du potentiel d'accélération des électrons. Ils observent au galvanomètre que le courant croît tout d'abord lentement, lorsque la tension augmente peu à peu, puis on constate une brusque limite qui marque les premiers chocs non élastiques, c'est-à-dire les chocs qui entraînent une variation dans la constitution de l'atome et qui nécessitent une perte d'énergie de la part de l'électron.

Pour l'atome de mercure, ils trouvent le premier choc non élastique à 4,9 volts. Franck et Hertz ont signalé la signification spectroscopique de ce nombre, en observant en effet pour cette tension la production de la raie d'émission $\lambda = 2537 \text{ \AA}$ et en montrant que le produit $h\nu$ qui y correspond est précisément égal à l'énergie correspondant à la tension d'accélération de 4,9 volts. Cette tension est appelée potentiel (tension) de résonance et la raie spectrale correspondante raie de résonance. On mit en évidence un potentiel d'ionisation correspondant à l'ionisation de l'atome.

Puis de nombreux expérimentateurs s'attachèrent à améliorer les conditions expérimentales, à montrer pour le néon, l'argon, l'hélium, l'hydrogène, le sodium, l'existence de potentiels de résonance et leur correspondance avec les observations spectroscopiques.

Avance prudente dans la jungle des constatations empiriques relatives aux schémas des séries spectrales, confortant progressivement la toute jeune théorie des quanta de Bohr-Sommerfeld.

En 1920, Franck et Einsporn⁽⁶⁾ publient des résultats très complets sur le mercure obtenus à la fois par la méthode originale de Franck et Hertz et par la méthode consistant à observer le courant produit sur une électrode photoélectrique sensible (protégée contre toute diffusion de particules chargées), par l'action soit du rayonnement émis par les atomes excités de faible durée de vie, soit des atomes excités métastables qui viennent transférer directement leur énergie à l'électrode (l'excitation des atomes

provenant des collisions avec les électrons), Ils observent des potentiels de résonance qui ne correspondent pas à des raies observables optiquement, vérifiant ainsi que le principe de sélection optique ne concerne pas les transitions produites par choc. Ils observent ainsi les potentiels de résonance à 4,68 et 5,47 volts qui correspondent à des transitions optiquement interdites, du niveau énergétique le plus bas au premier et au troisième niveaux. Le potentiel de 4,9 v. correspondait à la transition vers le deuxième niveau.

Le tableau I donne le schéma des niveaux d'énergie atomique (limité aux 19 premiers niveaux) et des termes énergétiques correspondant aux transitions entre les niveaux.

Dans le tableau II, on peut trouver entre autres les potentiels de résonance observés par Franck et Einsporn et pour un certain nombre d'entre eux leur correspondance avec des transitions d'excitation déduites du schéma des niveaux.

Remarquons que le potentiel 8,06 n'était pas interprété par ces auteurs alors qu'il correspond à la transition $0 \rightarrow 6$. Il était présent sur leurs courbes mais ne figurait plus dans leur tableau, ainsi que le remarquait Messenger⁽⁷⁾ en 1926 ! Fait plus intéressant, des potentiels de résonance apparaissent qui ne sont pas interprétables comme des excitations de l'atome à partir de son niveau le plus bas : 5,32, 5,76, 6,04, 6,30, 7,12, 7,46, 8,35. L'explication proposée par Franck et Einsporn fait intervenir l'existence d'atomes dans un état excité à durée de vie suffisamment longue (atome métastable) -ex. excitation au niveau 1- pour qu'une seconde excitation par choc électronique puisse se produire. Ainsi le potentiel de résonance de 5,76 v. correspond énergétiquement à l'ionisation de l'état excité au niveau 1 ($10,38 - 4,68 = 5,70$). Remarquons que les résonances à 6,30 et à 7,12 pourraient s'interpréter comme des transitions de l'état excité 1 vers des états d'autoionisation qui correspondent à des niveaux énergétiques au delà de la limite d'ionisation (nous noterons ces états 1', 2' ...). Les états d'autoionisation correspondent en fait à des *niveaux de l'ion positif*. Ainsi la résonance à 6,30 pourrait s'interpréter comme la transition $1 \rightarrow 1'$, et celle à 7,12 comme la transition $1 \rightarrow 3'$ ou $5'$.

Il semble par contre difficile de trouver une telle interprétation pour la résonance à 5,32 v. Une possibilité d'explication, non disponible à cette époque, est fournie cependant par le concept "d'ion négatif temporaire"⁽³⁾ (I.N.T.) ou "état compo-

sé"⁽⁸⁾ ou encore "résonance"⁽³⁾⁽⁸⁾. Pour éviter des confusions, nous utiliserons le terme "résonance I.N.T.". Il s'agit là d'états excités de l'ion négatif situés dans le continuum, donc états d'autoionisation de l'ion négatif.

Le tableau III donne les résonances INT actuellement connues pour le mercure et l'on voit l'existence d'une telle résonance pour 5,3 v. De même, la résonance de Franck et Einsporn à 8,35 v. pourrait correspondre à la résonance INT n° 7. Cela signifierait que dans les expériences, Franck, Hertz et Einsporn et al. interviendrait non seulement l'excitation de l'atome (l'électron incident cède de l'énergie mais n'est pas piégé) mais la formation d'ions négatifs instables.

Dans leur article de revue de 1926, Franck et Jordan⁽⁹⁾ rappellent les résultats de Franck et Einsporn⁽⁶⁾ mais n'ont pas de nouvelle explication à fournir.

Signalons pour conclure cette première partie de l'histoire, trois points intéressants :

a) en 1922, Sommerfeld⁽³⁾ alors qu'il commente en détail ces expériences, ne souffle mot des résonances inexpliquées de Franck et Einsporn.

b) plusieurs résonances présentes dans les courbes de Franck et Einsporn correspondent à des niveaux énergétiques qui n'étaient pas connus en 1920 à partir de travaux spectroscopiques. Mais dès 1923-1924, Hertz⁽⁸⁾ et Eldridge⁽⁹⁾ observent dans le spectre du mercure, de nouvelles raies optiques qui correspondent aux observations par choc électronique.

c) en 1926, Messenger reproduit les résultats de Franck et Einsporn en cherchant à identifier pour chaque résonance si les atomes excités rayonnent ou sont métastables. Elle montre que la plupart des résonances inexpliquées correspondent à la formation d'atomes métastables.

A ce stade, il faut souligner que tous les expérimentateurs se trouvent d'accord pour considérer que le problème des résonances inexpliquées est un problème scientifique et non un artefact expérimental. Ils pensent que la connaissance des niveaux de l'atome de mercure est encore insuffisante.

III - De 1926 à 1933 : les résonances au dessous du premier niveau excité

En 1926, paraît une petite note dans Physical Review où

Jarvis⁽¹⁰⁾, étudiant les potentiels critiques du mercure, trouve en plus des potentiels de Franck et Einsporn, six potentiels de résonance situés au dessous de 4,68 volts. Observations inexplicables. "The interpretation of these is much in doubt, as they imply that in normal mercury vapor the valence electron is in a higher energy level than that corresponding to the ground orbit of the valence electron. Perhaps they may be attributed to the molecule of mercury". Ces potentiels étant plus faibles que celui du premier niveau excité, on ne peut envisager que l'atome effectue une transition à partir d'un état excité, à moins de mettre en doute tout le schéma des niveaux.

Jarvis⁽¹¹⁾ publiera en 1927 des études analogues sur le gallium et l'indium, en rappelant les résultats étranges précédemment trouvés pour le mercure. Pour le gallium, il trouve aussi une résonance située au dessous de la première transition spectrale.

Mentionnons que, dans les travaux de Jarvis ainsi que dans ceux de Pavlov et Sueva indiqués ci-dessous, la méthode expérimentale est différente de celle utilisée par Franck et Einsporn et Messenger : au lieu de mesurer l'énergie transférée aux atomes, on mesure la quantité d'électrons ayant perdu leur énergie, essentiellement au moyen d'un potentiel électrostatique approprié : en effet, lors d'une résonance, le nombre d'électrons relâchés avec une vitesse quasi-nulle doit présenter un maximum marqué. Remarquons d'ailleurs que ce piégeage des électrons lents figure parmi les méthodes utilisées de nos jours pour l'étude des résonances I.N.T. (voir par exemple (3), section I.D.).

Durant cette même année 1926, deux autres travaux concernant le problème ont également paru, indépendamment de la note de Jarvis :

a) Pavlov⁽¹⁴⁾ trouve (toujours pour le mercure) des tensions critiques qui ne correspondent pas au système des niveaux d'énergie déduits des résultats spectroscopiques : plus précisément, deux tensions critiques (2,5 V et 3,5 V) situées *au-dessous* de la valeur (4,68 V) correspondant au premier état excité, et deux autres tensions critiques (12,6 et 15,7 V) situées *au-dessus* du potentiel d'ionisation, qui ne peuvent être interprétées comme des sommes d'énergie d'excitation (ce qui correspondrait à des chocs multiples d'un même électron successivement avec plusieurs atomes). Notons que, au-dessous de 4,68 V, Jarvis⁽¹¹⁾ avait trouvé (la même année, et donc certainement indépendamment) les valeurs : 1,23, 2,21, 2,80, 3,44, 3,80, 4,21 ; nous voyons que la valeur 2,5 pourrait correspondre au couple (2,21 ; 2,80) tandis

que 3,5 correspond parfaitement à 3,44.

b) Loyarte^(15a), intrigué lui aussi par les potentiels de résonance anormaux trouvés par Franck et Einsporn, entreprend à son tour des mesures. Malheureusement, il s'intéresse plutôt à des valeurs élevées du potentiel, notamment au-delà du potentiel d'ionisation (égal à 10,43 V), et les résultats obtenus dans cette région paraissent moins cruciaux que ceux concernant la région au-dessous du premier état excité (4,68 V). De plus, dès son premier article sur ce sujet^(15a), Loyarte tente de fournir une explication théorique aux potentiels "anormaux" (ceux de Franck et Einsporn, et les siens propres, au-delà du potentiel d'ionisation) : il propose que ces potentiels "anormaux" seraient obtenus à partir des potentiels "normaux" en ajoutant à ces derniers des multiples entiers de 1,4 V. Loyarte essaie donc de compléter le schéma des niveaux (en ajoutant des niveaux supplémentaires et, dans une série de publications ultérieures^(14b à 14)), il tente de justifier ces multiples de 1,4 V comme des énergies de rotation quantifiées de l'atome, et il essaie même de retrouver dans le spectre de l'atome de mercure des raies correspondant à son schéma contenant ces niveaux supplémentaires. Evidemment, l'introduction d'une "énergie de rotation quantifiée" supplémentaire dans le cas d'un atome n'était pas justifiable du point de vue d'un traitement quantique exact (exemple de l'atome d'hydrogène : le moment cinétique du vecteur $\vec{r} = \vec{r}_e - \vec{r}_p$ (\vec{r}_e : électron, \vec{r}_p : proton) est bien inclus dans le traitement conduisant au schéma des niveaux habituel). Nous verrons un peu plus bas ce qu'il advint de cette tentative de Loyarte.

En 1929, Pavlov et Sueva⁽¹⁶⁾ reprennent de nouveau des expériences concernant le mercure. Ils sont en effet intrigués, non seulement par les "potentiels anormaux" de Franck et Einsporn⁽⁶⁾ et de Loyarte^(14a) (supérieurs à 4,68 V), mais surtout par les potentiels anormaux inférieurs à 4,68 V trouvés par Jarvis⁽¹¹⁾ et Pavlov⁽¹³⁾ ; ils signalent d'ailleurs que des résultats du même type (potentiels inférieurs à la valeur correspondant au premier état excité) ont été obtenus antérieurement par Akesson (cité par Compton et Mohler⁽¹⁷⁾), mais ces résultats auraient été considérés à l'époque comme douteux (sans doute à cause de leur étrangeté). Quoiqu'il en soit, Pavlov et Sueva⁽¹⁶⁾ mettent en évidence pas moins de 17 résonances au-dessous de la valeur 4,68 V (première transition spectrale), et parmi elles se trouvent les six résonances obtenues par Jarvis⁽¹¹⁾. Tout comme ce dernier,

Pavlov et Sueva soulignent les difficultés que pose l'interprétation de tels résultats. Ils citent la proposition de Loyarte, mais sans la retenir, et ils remarquent que, si l'on admettait l'existence, dans la vapeur de mercure, d'atomes préalablement excités sur l'un des niveaux normaux, alors l'excitation à partir d'un tel niveau donnerait des valeurs situées dans le domaine des basses énergies qui est concerné ici ; mais l'énergie des électrons incidents est précisément trop faible pour créer ces états excités préalables !

A la suite de ce travail de Pavlov et Sueva, Loyarte⁽¹⁸⁾ étend son schéma explicatif aux potentiels critiques inférieurs à 4,68 V, (en proposant de retrancher, et non plus seulement ajouter, aux niveaux normaux des multiples de son nouveau "quantum" 1,4 V). Mais, en 1930, Loedel-Palumbo⁽¹⁹⁾ oppose à Loyarte une critique méthodologique dont la portée dépasse le cadre spécifique du problème en cause : il montre que, en ajoutant à la série des niveaux existant des multiples entiers d'un nombre quelconque, on peut obtenir des valeurs qui tombent très près des niveaux anormaux, mais on obtient aussi une infinité d'autres niveaux supplémentaires dont il faudrait établir la réalité, ce que ne faisait évidemment pas Loyarte. Du reste, après une esquisse de réponse non convaincante⁽²⁰⁾, Loyarte abandonne apparemment sa proposition d'une nouvelle énergie quantifiée (de rotation) de l'atome.

Indépendamment des vicissitudes des tentatives d'interprétation théorique, on aurait au moins pu s'attendre à un développement des travaux expérimentaux, afin de confirmer ou infirmer définitivement les observations antérieures, dont on pouvait sérieusement envisager qu'elles n'étaient pas des artefacts d'origine expérimentale. Mais à notre connaissance il n'en fut rien : en 1933, dans leur article de revue, De Groot et Penning⁽²¹⁾ rappellent seulement les résultats de Franck et Einsporn⁽⁶⁾ et Messenger⁽⁷⁾, en suggérant que leurs potentiels anormaux (donc ceux supérieurs à 4,68 V) seraient dus à des atomes autres que ceux de mercure : "Verschiedenen schwache Knicke sind wahrscheinlich nicht dem Hg-Atom zuzuschreiben, da ihnen keine Termwerte entsprechen" (réf.(21), section 25, p.55). L'interprétation proposée par Loyarte^(15a) est citée, mais seulement pour souligner son caractère irrecevable, et aucune mention n'est faite des résultats expérimentaux de Jarvis⁽¹¹⁾ et Pavlov et Sueva concernant les potentiels anormaux situés au-dessous du premier niveau

excité.

Pour ce qui est d'attribuer les résonances étranges à une espèce atomique ou moléculaire autre que l'atome de mercure, remarquons seulement que la molécule de mercure : Hg_2 n'est pas un candidat satisfaisant. En effet Hg_2 est un édifice moléculaire très peu stable (énergie de liaison 0,15 eV) du type complexe de Van der Waals⁽²²⁾, et de ce fait ses propriétés spectrales doivent différer fort peu de celles du mercure atomique. De plus les espèces moléculaires du type excimère : atome de mercure excité + atome de mercure, ou du type Hg_2^* ne peuvent apparaître que pour des énergies assez élevées des électrons incidents⁽²²⁾. Ainsi l'ion moléculaire Hg_2^+ n'apparaît qu'au dessus de 9,5 volts.

Pour éviter toute confusion, signalons ici qu'il existe dans le domaine des basses énergies un phénomène particulier bien connu sous le nom d'effet Ramsauer (voir par exemple⁽²³⁾). Mais il s'agit là d'un effet concernant les collisions élastiques et consistant en l'apparition de maxima pour la quantité d'électrons transmis sans déviation à travers un gaz pour certaines énergies des électrons incidents. Cet effet ne nous concerne pas ici, puisqu'il correspond à des variations de la diffusion angulaire sans changement d'énergie, alors que nous nous intéressons au contraire aux mécanismes impliquant des pertes (relatives) importantes d'énergie.

IV - Les résonances au-dessous du premier niveau excité existent-elles vraiment et peut-on les interpréter aujourd'hui ?

Nous avons déjà vu que certaines résonances de la courbe de Franck et Einsporn pouvaient s'interpréter comme des "résonances I.N.T." (états d'autoionisation de l'ion négatif). Ces résonances se trouvaient au voisinage d'états excités de l'atome neutre. Mais on a pu montrer théoriquement, l'existence de résonances situées au-dessous du premier état excité, certaines au voisinage ($\sim 0,5$ eV) de l'état excité mais certaines beaucoup plus bas se rapprochant de l'état fondamental (voir par exemple la revue⁽⁸⁾). Ce dernier type de résonance couramment mis en évidence pour les molécules⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾ n'a été que très rarement signalé pour les atomes. En fait, en 1975, on ne le signale que pour l'iode (Cf. (8) qui cite les travaux⁽²⁶⁾ et⁽²⁷⁾), mais des calculs théoriques prévoient de telles résonances pour les atomes en général (Cf. (8), section 2.2.3, p. 175). A ce propos, on peut souligner que, deux ans avant Popp⁽⁸⁾, Schulz⁽²³⁾ signale de telles résonances I.N.T. "basses"

pour toutes les molécules diatomiques étudiées, mais ne mentionne encore rien de tel pour les atomes⁽³⁾ : ceci révèle bien que la notion de résonance I.N.T. "basse" pour les atomes est relativement récente.

On peut alors valablement poser la question suivante : *Les résonances observées en dessous du premier niveau excité par Jarvis et Pavlov et Sueva ne sont-elles pas toutes des résonances I.N.T. ?*

Pour les deux premières : 4,40 et 4,15-4,21, elles sont proches des résonances I.N.T. connues 4,30 et 4,07 eV. Quant aux autres, de 3,85 eV à 0,45 eV elles pourraient être pour la plupart des résonances I.N.T. au-dessus de l'état fondamental, appelées "low lying shape resonance" dans la littérature spécialisée.

Ainsi la question est posée aux expérimentateurs de savoir si des résultats "étranges" trouvés en 1926-1927, peuvent être aujourd'hui confirmés et représenter un phénomène parfaitement interprétable dans le cadre des conceptions quantiques actuelles.

Remarquons que ces observations ont certainement souffert à l'époque d'absence de cadre théorique pour leur interprétation. La notion de "résonance" pour les atomes et les molécules est une notion relativement récente et l'étude expérimentale systématique du problème ne fait apparemment que commencer.

Il serait étonnant si Jarvis et Pavlov et Sueva avaient été des précurseurs oubliés, leurs résultats venant trop tôt dans le développement de la mécanique quantique. Nous posons la question aux expérimentateurs et aux théoriciens. Plus généralement, nous demandons à ceux qui auraient connaissance de situations analogues dans d'autres domaines de la microphysique de participer à cette tribune en nous envoyant leurs remarques.

La rédaction.

(Thème fourni par P. CLAVERIE et S. DINER)

RÉFÉRENCES

- (1) J. Franck et G. Hertz, Verhandl. d. Deutsch. Physik. Ges. 15 34 (1913)
- (2) E.H. Wichmann, "Quantum Physics" (Berkeley Physics course, volume 4), Mc Graw Hill, New York (1967, 1971). See chapter 3, section 3.8.9, page 101
- (3) G.J. Schulz, Rev. Mod. Phys. 45, 378 (1973)
- (4) A. Sommerfeld, Atombau und Spektrallinien, 3e édition (1922) traduction française : La Constitution de l'Atome et les Raies Spectrales, A. Blanchard (1923)
- (5) L. Bloch, Ionisation et résonance des gaz et des vapeurs, Presses Universitaires de France (1925)
- (6) J. Franck et E. Einsporn, Zeitschr. f. Phys. 2, 18 (1920)
- (7) H. Messenger, Phys. Rev. 28, 962 (1926)
- (8) H.P. Popp, Phys. Repts. (Phys. Letters C) 16C, 169 (1975)
- (9) J. Franck et P. Jordan, chap. 7, p. 641 dans Handbuch der Physik, vol XXIII "Anregung von Quanten Sprüngen durch Stösse" Julius Springer, Berlin, 1926)
- (10) G. Hertz, Naturwissenschaften, 11, 778 (1923)
- (11) J.A. Eldridge, Phys. Rev. 23, 685 (1924)
- (12) C.W. Jarvis, Phys. Rev. 27, 808 (1926)
- (13) C.W. Jarvis, Phys. Rev. 29, 442 (1927)
- (14) V. Pavlov, Journ. Russ. Phys.-Chem. Ges. 58, 369 (1926)
- (15) (a) R.G. Loyarte, Physik. Zeitschr. 27, 584 (1926)
(b) R.G. Loyarte et A.T. Williams, Physik. Zeitschr. 28, 383 (1927)
(c) R.G. Loyarte, Physik. Zeitschr. 28, 904 (1928)
- (16) V. Pavlov et N. Sueva, Zeitschr. f. Phys., 54, 236 (1929)
- (17) Compton et Mohler, "Critical Potentials", (1924)
- (18) R.G. Loyarte, Physik. Zeitschr. 30, 678 (1929)
- (19) E. Loedel-Palumbo, Physik. Zeitschr. 31, 926 (1930)
- (20) R.G. Loyarte, Physik. Zeitschr. 31, 929 (1930)
- (21) W. de Groot et F.M. Penning, chap. 2, p. 23 dans Handbuch der Physik, Vol. XXIII, 1ère partie : "Quanten hafte Ausstrahlung", Julius Springer, Berlin (1933)
- (22) F.L. Arnot et J.C. Milligan, Proc. Roy. Soc. (London) A153, 359 (1936)
- (23) C. Ramsauer et R. Kollath, Chap. 4, p. 243 dans Handbuch der Physik, Vol. XXII/2, "Der Wirkungsquerschnitt von Gasmoleküler gegenüber langsamen Elektronen und langsamen Ionen". Julius Springer, Berlin, 1933
- (24) G.J. Schulz, Rev. Mod. Phys. 45, 424 (1973)
- (25) I.C. Walker, Chem. Soc. Rev. 3, 467 (1974)
- (26) A. Mandl et H.A. Hyman, Phys. Rev. Lett. 31, 417 (1973)
- (27) M. Neiger, "Quantitative Untersuchung der Strahlung des negativen Jod-Ions", Thesis, Technische Universität München (1974).

Pavlov Sueva	Jarvis	Pavlov Sueva	Jarvis	Messenger	Frank Einsporn	Attributions
0,45		4,65	4,53	4,70	4,68	0+1
0,65		4,95	4,97	4,90	4,90	0+2 *
0,95		5,25	5,22	5,25	5,32	
1,20	1,23	5,45	5,37	5,40-5,45	5,47	0+3
1,40		5,75	5,70	5,75	5,76	1+∞
1,65		6,05	6,05	6,00	6,04	
1,80		6,30	6,46	6,30	6,30	1+1'
2,00		6,65	6,79	6,70	6,73	0+4
2,25	2,21	7,10	7,13	7,10	7,12	
2,45		7,45	7,41	7,45	7,46	0+5
2,60		7,70	7,74	7,75-7,80	7,73	0+6
2,85	2,80	8,05	8,02	8,00	8,1	
3,10		8,3	8,33	8,30	8,35	0+7
3,45		8,55	8,55	8,60	8,54	0+8
3,60	3,44	8,75	8,82	8,80	8,74	0+9
3,85		8,85				0+10.....15
4,15	3,80	9,00	8,82	8,80	8,86	0+16
4,40	4,21	9,45	9,33	9,15	9,21	0+17
			10,4	10,38	9,37-9,43	0+18
					10,30	0+19
						0+∞

TABLEAU II - Potentiels de résonance observés pour le mercure

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6p ³ P ₀ ⁰	6p ³ P ₁ ⁰	6p ³ P ₂ ⁰	6p ¹ P ₁ ⁰	7s ³ S ₁	7s ¹ S ₀	6p ³ P ₂ ⁰	7p ³ P ₀ ⁰	7p ³ P ₀ ⁰	7p ¹ P ₂ ⁰
0	4,66	4,88	5,45	6,70	7,72	7,92	8,53	8,61	8,63
1		0,22	0,79	2,03	3,06	3,26	3,87	3,95	3,97
2			0,57	1,82	2,84	3,04	3,65	3,73	3,75
3				1,24	2,27	2,46	3,08	3,15	3,17

11	12	13	14	15	16	17	18	19
7p ¹ P ₁ ⁰	6d ¹ D ₁	6d ³ D ₁	6d ³ D ₂	6d ³ D ₃	6p ³ D ₃ ⁰	8s ³ S ₁	8s ¹ S ₀	8p ³ P ₀ ⁰
0	8,83	8,84	8,84	8,84	8,85	9,06	9,16	9,47
1	4,17	4,17	4,17	4,19	4,39	4,49	4,55	4,81
2	3,95	3,95	3,95	3,97	4,18	4,28	4,33	4,59
3	3,38	3,38	3,38	3,39	3,60	3,70	3,76	4,01

TABLEAU I - Niveaux d'énergie et transitions du mercure (en eV)

Feature No. (Fig. 38)	Kuyatt <i>et al.</i> (1965) Transmission	Zapesochnyi and Shpenik (1966)				Fano and Cooper (1965) Designation
		6^3P_1 $\lambda = 2537 \text{ \AA}$ $E_2 = 4.89 \text{ eV}$	7^3S_1 5461 \AA 7.73 eV	6^3D 3650 \AA 8.9 eV	8^1S_0 4916 \AA 9.2 eV	
1	4.07	(6s6p ²) ⁴ P _{1/2} (6s6p ²) ⁴ P _{3/2} (6s6p ²) ⁴ P _{5/2}
2	4.30	...	...	...	...
3	4.89	5.0	...	...	...
	...	5.3				
	...	5.6				
4	7.81					
5	7.94					
6	8.14					
7	8.22	8.5	8.2	...	...
8	8.83	...	8.8	...	...
9	8.99	9.0	9.0	9.1	9.5	
10	9.75	9.7	9.6	9.8	10.2	
11	10.29	10.0	10.2	10.2	...	
12	10.58	10.4	...	...	...
13	10.88	...	...	...	...
	...	11.2	11.1	11.1	11.4	
	...	...	11.9	11.7	11.9
	...	...	...	~12.2	12.4
	...	12.5	~12.5	12.6		

TABLEAU III - Résonances INT du mercure (d'après Schulz (3))