



HAL
open science

Étude de la structure des niveaux de l'hélium par spectroscopie optique à très basse température

J. Brochard, R. Chabbal, H. Chantrel, P. Jacquinot

► **To cite this version:**

J. Brochard, R. Chabbal, H. Chantrel, P. Jacquinot. Étude de la structure des niveaux de l'hélium par spectroscopie optique à très basse température. *Journal de Physique et le Radium*, 1957, 18 (10), pp.596-602. 10.1051/jphysrad:019570018010059600 . jpa-00235713

HAL Id: jpa-00235713

<https://hal.science/jpa-00235713>

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.

ÉTUDE DE LA STRUCTURE DES NIVEAUX DE L'HÉLIUM PAR SPECTROSCOPIE OPTIQUE A TRÈS BASSE TEMPÉRATURE.

Par MM. J. BROCHARD, R. CHABBAL, H. CHANTREL et P. JACQUINOT,

Laboratoire Aimé-Cotton, C. N. R. S., Bellevue.

Dans un article de 1952 [1], nous avons déjà publié des résultats relatifs aux niveaux 2^3P , 3^3P , 3^3D de He_4 . Ces résultats avaient été obtenus en utilisant comme source une cathode creuse immergée dans l'hydrogène liquide.

Nous avons repris cette étude en l'étendant au niveau 4^3D et surtout à He_3 et en cherchant à améliorer la précision notamment par l'emploi d'une lampe à cathode creuse refroidie par un bain d'hélium liquide en dessous du point λ . Sauf en ce qui concerne les dispositifs expérimentaux qui sont à peu près les mêmes dans les deux cas, nous ne traiterons dans cet article que de He_4 . Les résultats relatifs à He_3 seront publiés dans un très prochain article.

La précision obtenue précédemment pour le niveau 2^3P avait déjà permis d'amener l'incertitude à une valeur inférieure à l'écart entre l'expérience et la théorie. Il nous a cependant paru utile de reprendre l'étude de ce niveau parce que la structure des niveaux D est obtenue non pas directement, mais par différence des écarts des niveaux P . Pour les autres niveaux la précision relative était beaucoup plus faible et il était nécessaire de chercher à l'améliorer.

Les niveaux de He_4 sont actuellement étudiés par radiofréquence avec une très grande précision par W. E. Lamb et T. H. Maiman [2]; une seule mesure a été jusqu'ici publiée par ces auteurs mais d'autres sont annoncées (Tableau III). Il sera intéressant de comparer les résultats obtenus par des voies très différentes et pour cela de pousser au maximum la précision optique; mais les expériences relatives à He_4 décrites ici étaient presque toutes terminées lorsque nous avons connu les expériences de Lamb et la précision que nous avons cherchée n'avait donc pas pour but la comparaison optique-radiofréquence.

Dispositif expérimental. — SOURCE. — La source est une lampe à cathode creuse présentant de grandes analogies avec celle qui a été utilisée pour les expériences précédentes (fig. 1). Ici encore nous avons cherché à provoquer une circulation de gaz par thermosiphon. La décharge chauffe dans le trou cathodique un volume faible de gaz sous très faible pression donc de très faible capacité calorifique. Pour que l'échauffement soit faible il faut donc une vitesse de circulation très grande et il

faut chercher à freiner le moins possible la circulation du gaz. Le gaz échauffé provenant du trou

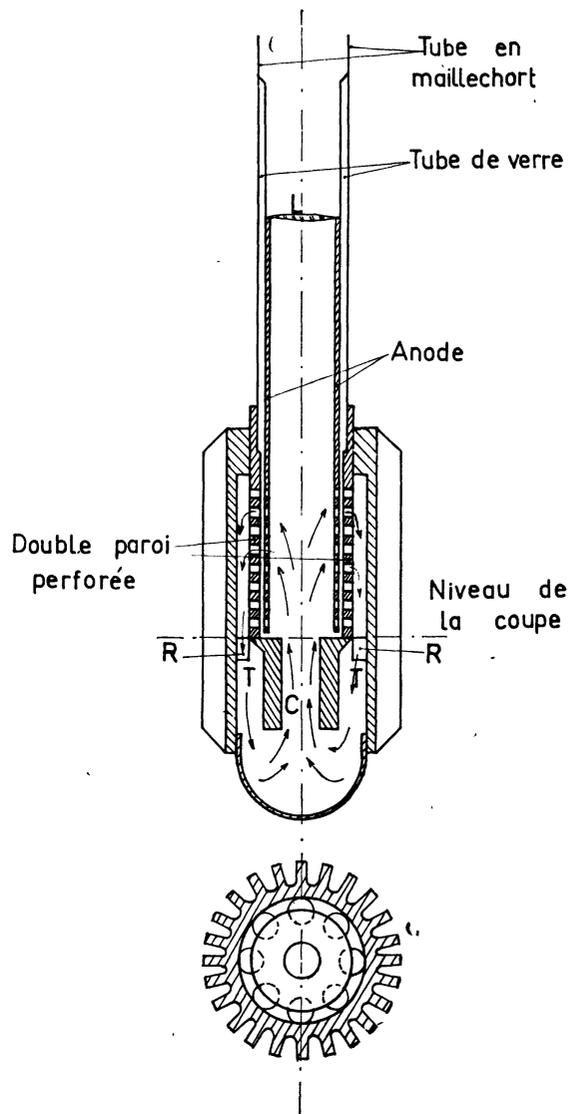


FIG. 1. — Lampe à cathode creuse.

- C : trou cathodique.
- R : rainure circulaire.
- T : trous d'écoulement du gaz froid, percés borgnes dans la rainure R.
- L : lentille collectrice reposant sur l'anode, qui est fendue en plusieurs points sur quelques mm suivant les génératrices pour faciliter le passage du gaz.

cathodique traverse l'anode perforée de nombreux trous de 2 mm de diamètre puis une double paroi également perforée. Cette paroi est très près de l'anode (1 mm) et joue le rôle d'écran : elle permet de donner au compartiment annulaire de refroidissement une plus grande dimension sans risquer que la décharge ne s'y produise. Le gaz pénètre

dans le compartiment annulaire (de grande surface latérale froide) s'y refroidit puis rejoint le bas du trou cathodique C, qui est sans fond, par 6 trous latéraux d'écoulement T offrant une faible impédance. Aux faibles courants la tache cathodique a un diamètre très petit. Afin de n'utiliser que cette tache — en ayant cependant une étendue de faisceau du moins égale à celle que l'interféromètre peut accepter — compte tenu de son diamètre et de la résolution adoptée — nous avons été amenés à placer à l'intérieur de la lampe une lentille collectrice L donnant de la tache cathodique une image sur la fenêtre de sortie. Le vase à hélium liquide a une contenance d'environ 1,5 litre ; la partie inférieure qui contient la source est rétrécie pour diminuer la quantité inutile d'hélium liquide. Dans le goulot, relativement large, sont placés horizontalement des écrans de rayonnement. Une plaque métallique, où sont soudées l'enveloppe extérieure de la lampe, un tube de pompage et un tube de remplissage, ferme hermétiquement le vase grâce à un joint torique s'appuyant sur un rodage plan. Un grand vase extérieur rempli d'azote liquide entoure entièrement le vase à hélium jusqu'à une dizaine de centimètres de la plaque de fermeture. Les deux vases sont munis de fenêtres claires permettant l'observation du niveau d'hélium. Le passage de l'hélium à l'état superfluide est obtenu après une dizaine de minutes de pompage. L'hélium liquide dont le niveau arrive à mi-hauteur se trouve alors dans de bonnes conditions d'isolement et pour les faibles courants employés (10 μ A) un seul remplissage peut assurer une dizaine d'heures de fonctionnement. La température du vase déduite de la pression de vapeur était de l'ordre de 1,8 °K. La lampe était alimentée à travers une très forte résistance ballast (de 1 à 50 M Ω) par une alimentation à tension stabilisée et réglable. On utilisait

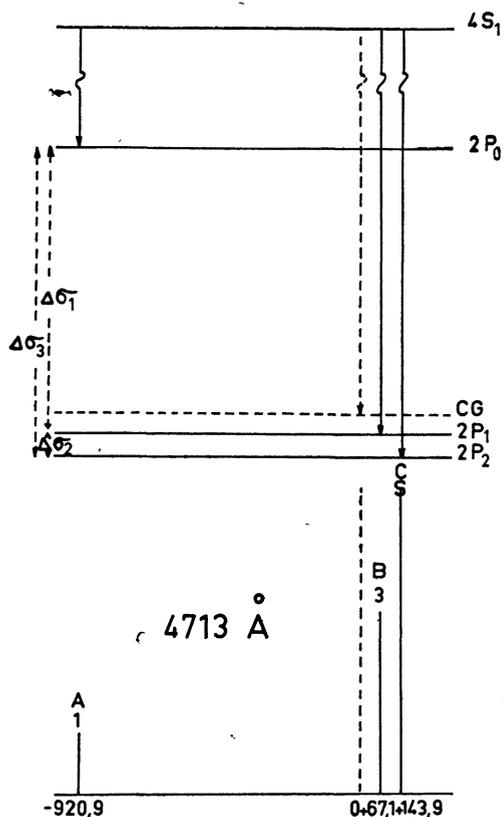


FIG. II-A. — Schéma de niveaux et de structure λ 4713.

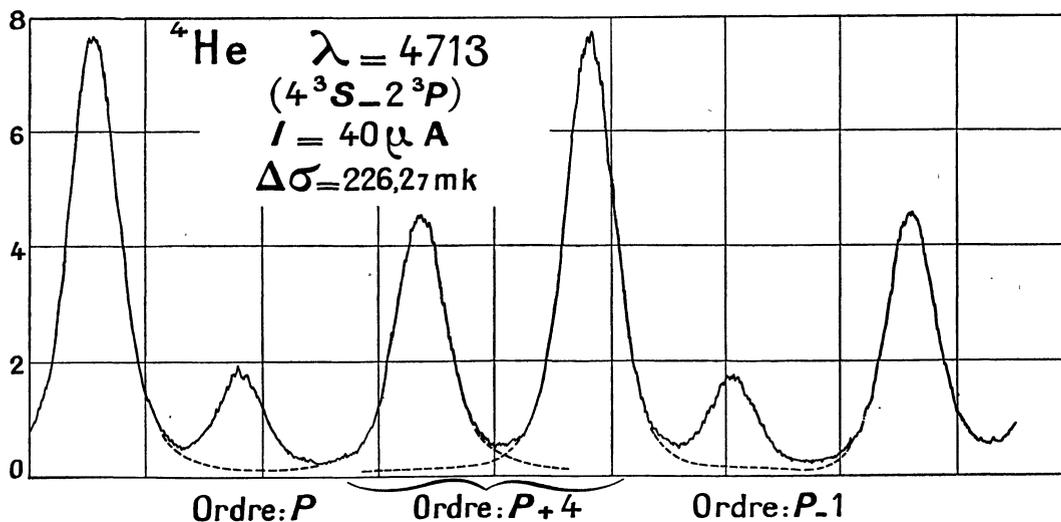


FIG. II-B. — Enregistrement λ 4713.

en général une tension totale de l'ordre de 1 000 volts pour une tension aux bornes de la lampe de l'ordre de 150 à 200 V.

La pression de l'hélium dans la lampe, de l'ordre de 100μ de Hg, a été réglée au mieux pour chaque expérience, sa valeur dépend du courant utilisé. Elle est plus faible dans le cas du bain d'hélium superfluide. Elle est toujours très critique : la brillance de la source présentant un maximum très aigu pour une pression bien déterminée au-dessous de laquelle la décharge passe d'ailleurs dans l'anode.

Interféromètre et dispositif d'enregistrement. —

Comme dans le travail antérieur, nous avons utilisé un spectrophotomètre Fabry-Perot à balayage par variation linéaire de pression. Le dispositif qui a été amélioré à divers points de vue sera décrit

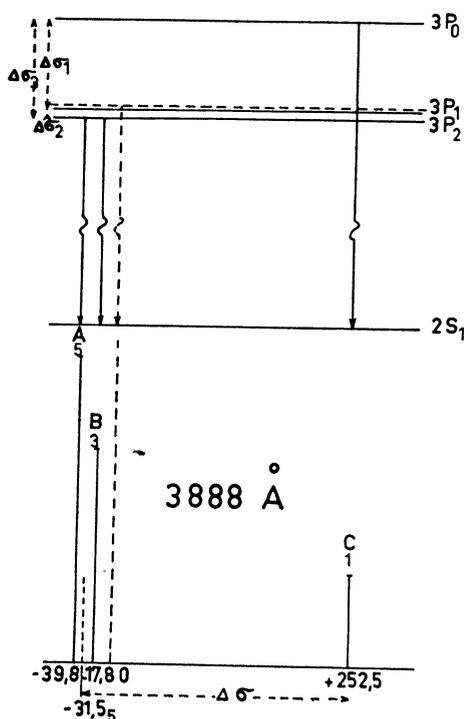


Fig. III-A. — Schémas de niveaux et de structure λ 3 889.

ailleurs. Dans le cas de He_3 , nous avons toujours utilisé un interféromètre à deux étalons associés.

Facteurs divers limitant la précision. — Deux causes fondamentales et liées limitent la précision : ce sont la finesse de raie et la luminosité. La finesse de raie intervient dans la précision de la détermination d'une raie isolée ; elle intervient surtout dans l'analyse des groupes de raies non entièrement résolues. La luminosité intervient par le rapport signal/bruit, proportionnel à la racine carrée du flux émergeant.

La luminosité et la résolution variant en sens inverse, il faut faire un compromis entre ces deux facteurs. Il est avantageux de tolérer un élargissement non négligeable par l'appareil afin de pouvoir ainsi disposer de plus d'étendue de faisceau et diminuer le courant dans la source, ce qui permet à celle-ci d'émettre des raies plus fines.

En outre, afin d'obtenir un rapport signal/bruit satisfaisant tout en utilisant un courant très faible dans la source, nous avons été amenés à enregistrer lentement (1/4 à 3/4 heure par ordre d'interférence)

Dans la plupart des cas la précision est essentiellement limitée par ces facteurs fondamentaux. Cependant la structure de la raie $4\ 713 \text{ \AA}$ a été obtenue parfaitement résolue avec des fluctuations très faibles.

D'autres facteurs non fondamentaux interviennent pour limiter la précision des mesures. Ils se traduisent surtout par des écarts à la linéarité de l'échelle des nombres d'ondes sur l'enregistrement et seuls des enregistrements présentant une excellente régularité des différents ordres d'interférence ont été retenus

Étude du niveau $2\ 3P$. — Ce niveau peut être étudié à l'aide des raies :

$2\ 3P \rightarrow 2\ 3S$	(10 380 Å)
$3\ 3S \rightarrow 2\ 3P$	(7 065 Å)
$4\ 3S \rightarrow 2\ 3P$	(4 713 Å)
$5\ 3S \rightarrow 2\ 3P$	(4 121 Å)

Nous avons utilisé uniquement la raie $4\ 713 \text{ \AA}$ qui est plus intense et moins sensible aux perturbations diverses que ses homologues supérieurs.

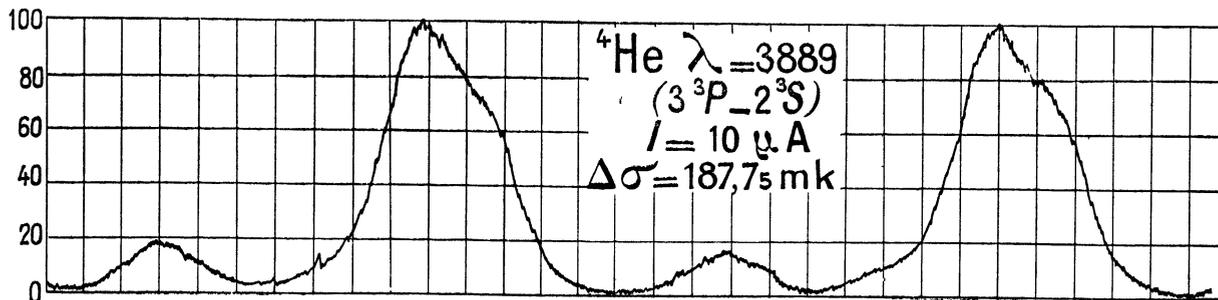


Fig. III-B. — Enregistrement λ 3 889.

TABLEAU I

COMPARAISON DES RÉSULTATS OBTENUS SUR LE NIVEAU $2\ ^3P$

	THÉORIE	LITTÉRATURE	B. C. C. J.
$\Delta\sigma_1 (2P_0 - 2P_1)$	560 [4] 730 [5] 974 [6] 840 [7] 940 [8]	992 990 [10] 996 [11] 991 \pm 3 [12] 988 \pm 1 [1]	988,0 \pm 0,4
$\Delta\sigma_2 (2P_1 - 2P_2)$	59 [4] 35 [5] 140 [6] -50 [7] 68 [8]	71 [9] 77 [10] 78 [11] 79 \pm 2 [12] 76,5 \pm 0,7 [1]	76,8 \pm 0,2
$\Delta\sigma_3 (2P_0 - 2P_2)$			1 064,8 \pm 0,4

TABLEAU II

ENREGISTREMENT BAIN D'HÉLIUM LIQUIDE	NOMBRE DE MESURES	POIDS	$\Delta\sigma_1$	$\Delta\sigma_2$	$\Delta\sigma_3$
A non pompé	6	6	987,9	76,75	1 064,65
B pompé	4	5	988,2	76,8	1 065,0
C pompé	2	2	988,0	76,9	1 064,9
D (enregistrement de qua- lité médiocre)	2	1	987,2	77,1	1 064,9
E non pompé (médiocre) ...	4	0,5	987,2	76,8	1 064
Moyenne			988	76,8	1 064,8

TABLEAU III

COMPARAISON DES RÉSULTATS OBTENUS SUR LE NIVEAU $3\ ^3P$

	THÉORIE	LITTÉRATURE	B. C. C. J.
$\Delta\sigma_1 (3P_0 \rightarrow 3P_1)$	218 [8]	270 [9]	270,3 \pm 1,5
$\Delta\sigma_2 (3P_1 \rightarrow 3P_2)$	17,6 [8]	265 \pm 20 [1] 20 [9] 25 \pm 10 [1] 21,95 \pm 0,03 [2]	22 \pm 1
$\Delta\sigma_3 (3P_0 \rightarrow 3P_2)$		290 [9]	292,3 \pm 0,7
$\Delta\sigma (3P_0 \rightarrow 3P_{1,2})$		286 [9] 287 \pm 4 [12]	284,0 \pm 0,5

TABLEAU IV

RAIE 5 875 Å

Intervalles mesurés :	$A - B = 942,7 \pm 0,6$
$B - (C + E) = 74,3 \pm 0,4$	$B - C = 73,8 \pm 0,5$
$A - (C + E) = 1 017,0 \pm 0,6$	$AC = 1 016,5 \pm 0,7$

Niveau $3\ ^3D$:	$\Delta\sigma_1 (3D_1 - 3D_2) = 45,3 \pm 1$
	$\Delta\sigma_2 (3D_2 - 3D_3) = 3,0 \pm 0,8$
	$\Delta\sigma_3 (3D_1 - 3D_3) = 48,3 \pm 1$

Par ailleurs nous ne possédons pas de cellule suffisamment sensible au rouge ou au proche infra-rouge pour étudier les raies 10 830 Å et 7 065 Å dans une source à faible intensité.

Pour cette raie, nous avons utilisé un étalon dont l'intervalle entre ordres était de 226,26 mK (à 1/2 atm.). La finesse réflectrice des lames était de l'ordre de 55, mais, compte tenu des défauts des lames, la largeur de raie propre à l'interféromètre était de l'ordre de 10 mK. Nous avons obtenu un excellent enregistrement à 80 μ A dans l'hélium non pompé et des enregistrements parfaitement résolus entre 50 μ A et 30 μ A dans l'hélium pompé.

Les résultats, exprimés en mK (10^{-3} cm^{-1}), sont donnés dans le tableau I (page 599) et comparés aux valeurs expérimentales trouvées dans la littérature et aux valeurs théoriques.

PRÉCISION. — La marge d'erreur indiquée a été appréciée en tenant compte à la fois de l'estimation des erreurs possibles et de la concordance entre les séries de mesures. À titre d'exemple nous donnons pour cette raie le tableau des résultats obtenus (Tableau II page 599).

Dans l'attribution des poids on a tenu compte non seulement du nombre de mesures mais aussi des qualités diverses, fluctuations, résolution, constance des ordres et des intensités. L'enregistrement E appartient à une première série plus ancienne.

Étude du niveau 3^3P . — Il a été atteint par la raie $3^3P \rightarrow 2^3S$ 3 889 Å dont la structure est donnée sur la figure III-A.

Les 2 composantes intenses ne sont pas résolues (fig. III-B).

Le niveau 2^3S étant métastable la raie est auto-absorbée même pour des courants très faibles. On constate que le rapport d'intensité $\frac{A+B}{C}$ tend

vers la valeur théorique $\frac{8}{1}$ à mesure qu'on abaisse

le courant. Pour un courant de 20 μ A cette valeur théorique est pratiquement atteinte et nous avons opéré avec un courant de 10 μ A pour nous ménager une certaine marge de sécurité. Pour analyser la structure, on commence par déterminer le centre de gravité de la configuration non résolue ($A+B$) et à mesurer sa distance à C . On reproduit ensuite A et B à partir du profil de la raie C à l'échelle des intensités théoriques et l'on recherche pour quelle position de ces reproductions de part et d'autre du centre de gravité l'on retrouve la configuration ($A+B$) enregistrée. On constate d'ailleurs que, même avec un courant de 10 μ A seulement, il subsiste au sommet de la configuration ($A+B$) un résidu d'auto-absorption de l'ordre de 2 %.

Nos résultats sont reproduits sur le tableau III et comparés à ceux d'autres auteurs.

Niveau 3^3D . — Il a été atteint à partir de la raie $3^3D \rightarrow 2^3P$ 5 876 Å. Le tableau IV, p. 599 et les figures IV-A et B donnent nos résultats, qui

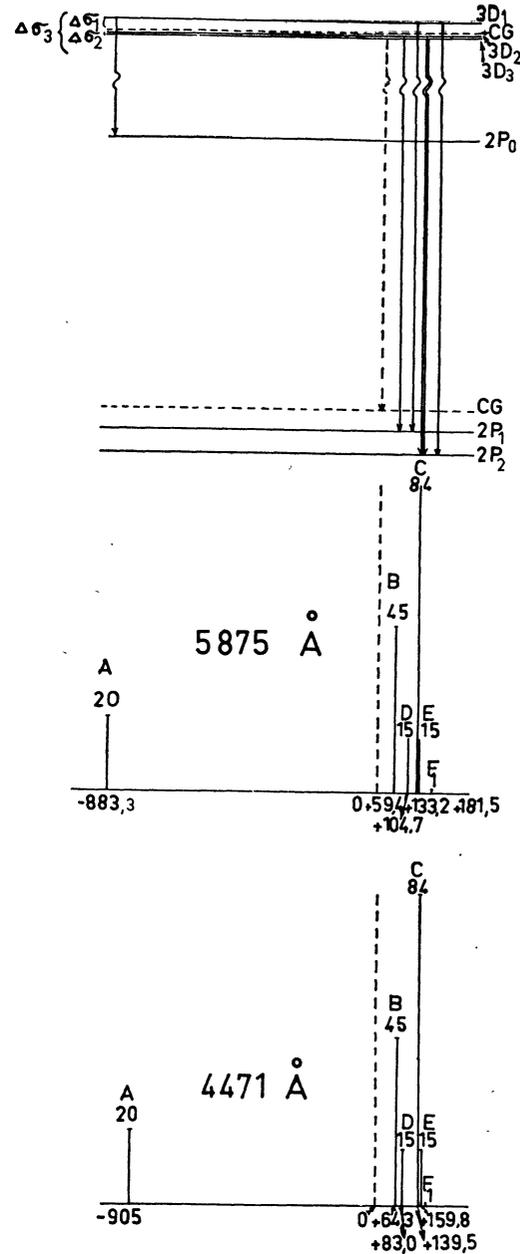


Fig. IV-A — Schéma de niveaux et structure des raies λ 5875 Å et λ 4471 Å.

Sur le schéma supérieur : De gauche à droite les transitions partent des niveaux 3^3D_1 , C. G. (transitions en pointillé), 3^3D_2 , 3^3D_1 , 3^3D_3 , 3^3D_2 , et 3^3D_1 .

Sur le schéma inférieur : Le nombre 159,8 en bas à droite se rapporte à la petite composante F_1 . Le nombre 139,5 concerne l'ensemble des raies C et E.

TABLEAU V

COMPARAISON DES RÉSULTATS OBTENUS SUR LE NIVEAU 3^3D

	THÉORIE	LITTÉRATURE	B. C. C. J.
$\Delta\sigma_1 (3D_1 - 3D_2)$	[42,6 [8]	42 ± 5 [10] $44,5 \pm 3,5$ [1]	$45,3 \pm 1$
$\Delta\sigma_2 (3D_2 - 3D_3)$	2,5 [8]	5 \pm 5 [10] 5 [12] 4 \pm 2 [1]	3,0 \pm 0,8
$\Delta\sigma_3 (3D_1 - 3D_3)$	45,1 [8]	47 [10] 54 [12] 48,5 \pm 3 [1]	48,3 \pm 1

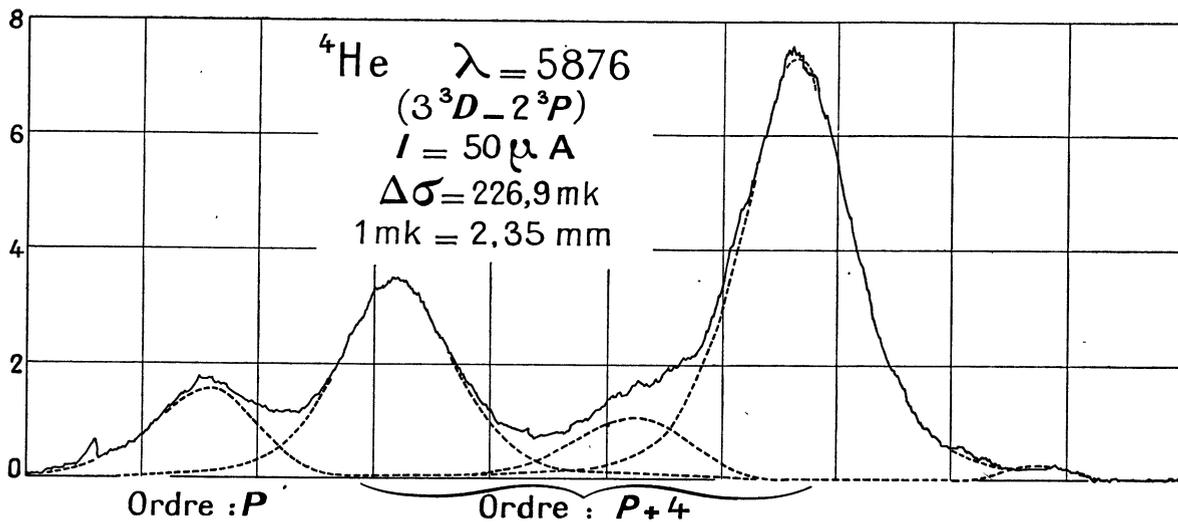


FIG. IV-B. — Enregistrement λ 5 875.

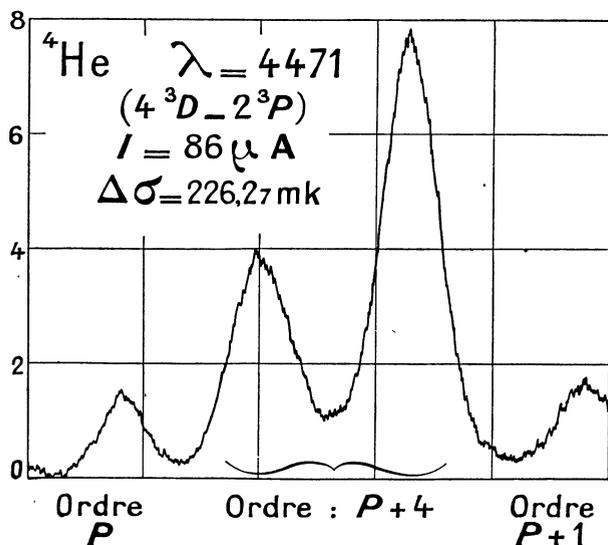


FIG. IV-C. — Enregistrement λ 4 471.

TABLEAU VI

RAIE 4 471 Å

Intervalles mesurés :

$$\begin{aligned}
 A - (B + D) &= 973,5 \pm 1 & A - B &= 969,3 \pm 0,8 \\
 (B + D) - C &= 71,1 \pm 0,8 & B - C &= 75,3 \pm 0,6 \\
 A - (C + E) &= 1\ 044,6 \pm 0,8
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Niveau } 4^3D : \Delta\sigma_1 &= 18,7 \pm 1 \\
 \Delta\sigma_2 &= 1,8 \pm 1 \\
 \Delta\sigma_3 &= 20,5 \pm 1,5
 \end{aligned}$$

TABLEAU VII

COMPARAISON DES RÉSULTATS OBTENUS SUR LES NIVEAU 4^3D

	THÉORIE	LITTÉRATURE	B. C. C. J.
$(4D_1 - 4D_2)$			18,7 \pm 1
$(4D_2 - 4D_3)$			1,8 \pm 1
$(4D_1 - 4D_3)$	19 [8]	16 [10]	20,5 \pm 1

sont comparés tableau V, p. 601 aux résultats antérieurs.

Niveau 4^3D . — Le niveau 4^3D a été déduit de l'analyse de la raie $4^3D \rightarrow 2^3P$, λ 471 Å dont la structure est reproduite figure IV-A à partir de nos valeurs dont les tableaux VI et VII, p. 601 donnent l'exposé détaillé.

Les auteurs remercient M. Spöndlin, Ingénieur au Laboratoire Aimé-Cotton, pour le concours qu'il leur a apporté dans l'utilisation de l'hélium liquide.

Manuscrit reçu le 23 juillet 1957.

Note ajoutée à la correction des épreuves.

Depuis le dépôt du manuscrit, nous avons eu connaissance de résultats obtenus en radiofréquences — évidemment beaucoup plus précis — relatifs aux niveaux : 2^3P et 3^3P et publiés par I. WIEDER et W. E. LAMB, *Phys. Rev.*, 1957, **107** (1), 125-134.

Avec les marges d'incertitude que nous avons indiquées, il y a compatibilité pour les écarts $3^3P_1 - 3^3P_0$ et $3^3P_2 - 3^3P_1$, mais il y a pour $2^3P_2 - 2^3P_1$ un désaccord de 0,15 mK entre notre valeur extrême et celle de I. Wieder et W. E. Lamb. Il ne nous est pas possible à l'heure actuelle de préciser si ce désaccord est dû à une évaluation insuffisante de notre marge d'erreur (ce qui est cependant très peu probable), ou à une erreur systématique, ou à une cause plus profonde.

A la suite de ce désaccord, nous envisageons de reprendre une série de mesures sur le niveau 2^3P .

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BROCHARD (J.), CHABBAL (R.), CHANTREL (H.) et JACQUINOT (P.), *J. Physique Rad.*, 1952, **13**, 433.
 [2] LAMB (W. E.), *Phys. Rev.*, 1957, **105** (2), 559. LAMB (W. E.) et MAIMAN (T. H.), *Phys. Rev.*, 1957, **105** (2), 573.
 [3] BROCHARD (J.), CHABBAL (R.), CHANTREL (H.) et JACQUINOT (P.), *C. R. Acad. Sc.*, 1955, **241**, 935-937.
 [4] HEISENBERG (W.), *Z. Physik*, 1926, **39**, 499.
 [5] GAUNT (J. A.), *Proc. Roy. Soc.*, 1929, **122**, 513 ; *Trans. Roy. Soc.*, 1929, **223**, 151.
 [6] BREIT (G.), *Phys. Rev.*, 1929, **36**, 383 ; 1932, **39**, 616.
 [7] BETHE (H. A.), *Hand. Physik* (Berlin, 1933), 2^e édit., vol. **24**, 1, p. 378-383.
 [8] ARAKI (G.), *Proc. Phys. Math. Soc.*, Japan, 1937, **19**, 128.
 [9] HOUSTON (W. V.), *Phys. Rev.*, 1927, (A) **29**, 749 ; *Proc. Nat. Soc.*, 1927, **13**, 91.
 [10] HANSEN (G.), *Nature*, 1927, **119**, 237 ; *Verhandl. Deut. Physik Ges.*, 1929, **10**, 5.
 [11] MEGGERS (W. F.), *J. Research Nat. Bur. Standards*, 1935, **14**, 487.
 [12] FRED (M.), TOMKINS (F. S.), BRODY (J. K.) et HAMERMESH (M.), *Phys. Rev.*, 1951, **82** (3), 406.