Rapport BIPM-82/10

Détermination et reproductibilité de l'intervalle de fréquence ($^{129}I_2$,k) - ($^{127}I_2$,i)

par J.-M. Chartier

Résumé

On a étudié sur deux lasers à He-Ne (λ = 633 nm) asservis sur l'iode 129 la reproductibilité de la fréquence de la composante k de la transition 8-4, P(54)* ; on a utilisé la composante i de l'iode 127, transition 11-5, R(127)* comme référence de fréquence.

On donne comme valeur moyenne de l'intervalle :

($^{129}I_2$,$k_{4°C}$**) - ($^{127}I_2$,$i_{15°C}$**) la valeur (95,97 ± 0,04***)MHz.

Une cause perturbatrice de la fréquence de la composante k est proposée.

On suggère d'utiliser à la place de cette composante, deux autres composantes voisines, beaucoup moins perturbées, appartenant à la transition 6-3, P(33) de la molécule $^{127}I^{129}I$.

* Dans la suite du rapport, on désigne ces composantes respectivement par $^{129}I_2$,k et $^{127}I_2$,i.

** Les températures indiquées sont celles du point froid des cuves à iode.

*** Estimation de l'écart-type d'une mesure, c'est cette incertitude qui est aussi donnée dans la suite du rapport.

1 - Introduction

Les premiers articles publiés sur les lasers à He-Ne, à λ = 633 nm, asservis sur l'absorption saturée de l'iode [1 à 7] présentaient les résultats obtenus sur l'une ou plusieurs des trois combinaisons possibles de ce type de lasers ; à savoir :

He-^{20}Ne, $^{127}I_2$; He-^{20}Ne, $^{129}I_2$; He-^{22}Ne $^{129}I_2$; avec chacune de ces combinaisons, il était possible d'obtenir suivant la longueur de la cavité optique de 7 à 30 composantes (Fig. 1).

En 1973 [8], la composante i de $^{127}I_2$ (^{20}Ne) a été admise comme référence pour les lasers à λ = 633 nm ; les composantes k de $^{129}I_2$ (^{20}Ne) et B de $^{129}I_2$ (^{22}Ne) ont été utilisées comme les composantes "principales" de leur raie.

Il est apparu souhaitable que le BIPM qui avait entrepris dès 1971, la construction de lasers du type He-^{20}Ne, $^{127}I_2$, dispose aussi des deux autres types de lasers ; ceci afin de juger de la cohérence des différents résultats obtenus entre les laboratoires nationaux.

En 1973, le NBS donnait au BIPM un laser He-^{22}Ne, $^{129}I_2$, il est toujours en état de fonctionnement ; la combinaison He-^{20}Ne, $^{129}I_2$ fut réalisée au BIPM en 1976 grâce à des cuves à iode 129 en provenance soit du NBS, soit de la PTB.

Les premières mesures des intervalles de fréquence entre les trois composantes principales effectuées au BIPM [9, 10] montrèrent un désaccord de l'ordre de quelques 10^{-10} en valeur relative avec les mesures effectuées au NBS en 1973 [11]. Ce désaccord s'est ensuite confirmé avec d'autres laboratoires. Pour les toutes premières mesures, ce désaccord pouvait être en partie expliqué par des conditions expérimentales différentes ; pour les mesures récentes, il fallait chercher d'autres causes pour expliquer les écarts observés.

D'autre part, la nouvelle définition du Mètre, qui sera certainement proposée à la 17e CGPM, a indirectement donné une importance particulière à la valeur de l'intervalle de fréquence ($^{129}I_2$,k) - ($^{127}I_2$,i).

Avec cette nouvelle définition du Mètre, une liste de radiations recommandées avec leurs valeurs de fréquence et de longueur d'onde doit être établie. La radiation ($^{127}I_2$,i) y figure, et jusqu'à la /^{e} session du CCDM (1982), sa fréquence absolue n'était déterminée qu'à partir de mesures de rapport de longueur d'onde (λ_{CH_4}/λ_i ou $\lambda CO_2/\lambda_i$). Le rapport de longueur d'onde dont l'incertitude était la plus faible avait été obtenu au NBS [12], Il ne donnait que la valeur du λ_{CH_4}/λ_k (ou f_k/f_{CH_4}). Pour déterminer f_i, à partir de la fréquence connue de f_{CH_4}, il fallait donc connaître la valeur de l'intervalle ($^{129}I_2$,k) - ($^{127}I_2$,i).

L'importance de la valeur de cet intervalle a beaucoup diminué depuis que le NBS [13] a pu étendre les mesures absolues de fréquence au domaine visible ; cependant c'est encore un élément important pour confirmer la cohérence des diverses déterminations de fréquence et de longueur d'onde. Nous avons donc effectué au BIPM de nouvelles mesures et étudié certains paramètres qui n'avaient été jusqu'à présent que très peu considérés.

2 - Caractéristiques des lasers utilisés (voir Tableau I)

En 1977 et 1979, on avait utilisé respectivement les lasers BIPM5 et BIPM6 ; en 1982, deux autres lasers ont participé aux mesures : BIPM4'et BIPM5'. Le tableau I donne les différentes caractéristiques de ces lasers. Dans tous les cas, le laser de référence a été le laser BIPM2 muni d'une cuve à iode 127, les caractéristiques de ce laser ont déjà été décrites [14]. Tous les asservissements utilisaient la technique de la modulation sinusoïdale de la longueur de la cavité avec détection du troisième harmonique [3]. La fréquence de modulation pour tous les lasers était de 1 092 Hz et l'amplitude crête à creux de 6 MHz. La température des parois des cuves à iode, non compris leur point froid, était ≈ 293 K.

3 - Expérimentation et résultats

3-1 Rappel des résultats obtenus au BIPM avant 1982

$$1978,\ (\mathrm{BIPM5}_k,\ 8^\circ\mathrm{C}) - (\mathrm{BIPM2}_i,\ 8^\circ\mathrm{C}) = 95{,}76\ \mathrm{MHz}\ [10]$$
$$1980,\ (\mathrm{BIPM6}_k,\ 8^\circ\mathrm{C}) - (\mathrm{BIPM2}_i,\ 8^\circ\mathrm{C}) = 95{,}77\ \mathrm{MHz}\ [10]$$
$$1980,\ (\mathrm{BIPM5}_k,\ 8^\circ\mathrm{C}) - (\mathrm{BIPM2}_i,\ 8^\circ\mathrm{C}) = 95{,}76\ \mathrm{MHz}\ [10]$$

Lors de ces mesures aucune étude n'a été faite concernant les effets produits par les variations de pression dans la cuve à iode et par les variations de puissance des lasers.

3-2 Mesures effectuées en 1982

Le laser de référence BIPM2 est le plus souvent asservi sur la composante d au lieu de la composante de référence i. On a cependant présenté tous les résultats par rapport à cette composante i, en utilisant pour la valeur de l'intervalle

$$(i - d) = -\ (165{,}114 \pm 0{,}002)\ \mathrm{MHz}\ [15].$$

En plus de la composante k, l'étude a porté quelquefois sur les composantes l et m de la même transition et sur les composantes a et y" de la transition 6-3, P(33) de la molécule $^{127}I^{129}I$ (voir Fig. 2).

3-2-1 Etude de l'effet de l'amplitude de modulation

Le laser de référence BIPM2 était asservi sur la composante d et la température du point froid de la cuve à iode était 8 °C (≙ 9,0 Pa). Cette étude n'a été faite que pour une seule température des cuves à iode et pour une seule valeur de puissance des lasers, une étude plus

approfondie de l'influence éventuelle de ces deux paramètres serait nécessaire. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau II, les coefficients de variation de fréquence, sur chaque laser, sont très différents en ce qui concerne la composante k. Il faut toutefois remarquer que les puissances surfaciques des deux lasers, dont la valeur est calculée au milieu des cuves à iode, sont dans un rapport 1,7. La puissance surfacique est caractérisée par la puissance portée par l'un des faisceaux divisée par sa surface au milieu de la cuve à iode.

3-2-2 Etude de l'effet de puissance du laser

Les variations de puissance des lasers sont obtenues en modifiant le courant dans le tube amplificateur.

En fonctionnement normal, le tube amplificateur est traversé par le courant minimal permettant d'entretenir la décharge. Pour les deux lasers étudiés, la puissance minimale correspond au courant minimal.

Les résultats obtenus sur BIPM4' sont résumés dans le tableau III, et ceux sur BIPM5' dans le tableau IV.

Sur BIPM4', où la puissance maximale en fonctionnement monomode peut atteindre 300 μW ; nous avons relevé, surtout pour la composante k, des coefficients de variation de fréquence très différents et dont l'amplitude a atteint : ($\approx -0{,}8 \pm 0{,}07$) kHz/μW. Par contre, la valeur des coefficients des composantes a et y" semble être indépendante du laser utilisé et de l'intervalle dans lequel on a fait varier la puissance du laser.

Sur la figure 3, où sont représentés les résultats obtenus pour BIPM4' ; deux droites (mesures du 18 mars 1982) sur quatre confirment les résultats trouvés antérieurement au BIPM pour des conditions expérimentales très voisines. Pour une puissance surfacique d'environ 1×10^5 Wm^{-2} et lorsque le point froid des cuves à iode est à une température de 8 °C, on obtient $(^{129}I_2,k) - (^{127}I_2,i) = 95{,}77$ MHz.

3-2-3 Etude de l'effet de pression

Les variations de pression dans les cuves à iode sont réalisées en modifiant la température de leur point froid.

Les coefficients de variation moyens, calculés à partir des mesures, sont résumés dans les tableaux V et VI ; dans la deuxième colonne de ces tableaux, on a indiqué le domaine des variations de puissance des lasers provoquées par les variations de pression de l'iode.

Pour chaque laser, les résultats concernant la composante k sont là aussi assez incohérents, contrairement à ceux obtenus pour les composantes a et y".

3-2-4 Valeurs des intervalles de fréquence

Les valeurs des intervalles de fréquence sont données pour différentes températures des points froids des cuves à iode :

a) à 4 °C pour l'iode 129 et 15 °C pour l'iode 127
b) à 8 °C pour l'iode 129 et l'iode 127.

On a aussi, d'autre part, réduit les mesures à la puissance minimale pour chaque laser. Dans ces conditions la puissance surfacique au milieu de la cuve à iode sur un trajet de l'onde est :

$$\approx 4{,}8 \times 10^4 \ \mathrm{Wm}^{-2} \text{ pour BIPM5'}$$
$$\text{et} \approx 6{,}9 \times 10^4 \ \mathrm{Wm}^{-2} \text{ pour BIPM4'.}$$

Devant l'inhomogénéité des valeurs des coefficients de variation de fréquence en fonction de la puissance du laser et de la pression de l'iode, surtout ceux concernant la composante k ; chaque mesure d'intervalle de fréquence a été réduite en utilisant les coefficients déterminés au cours du même groupe de mesures ; les résultats sont les suivants :

$$(^{129}I_2, k_{4°C}) - (^{127}I_2, i_{15°C}) = (\ 95{,}97 \pm 0{,}04\ ) \text{ MHz}$$

$$(^{129}I^{127}I, a_{4°C}) - (^{127}I_2, i_{15°C}) = (190{,}97 \pm 0{,}01_5) \text{ MHz}$$

$$(^{129}I^{127}I, y''_{4°C}) - (^{127}I_2, i_{15°C}) = (256{,}69 \pm 0{,}01\ ) \text{ MHz.}$$

$$(^{129}I_2, k_{8°C}) - (^{127}I_2, i_{8°C}) = (\ 95{,}89 \pm 0{,}03) \text{ MHz}$$

$$(^{129}I^{127}I, a_{8°C}) - (^{127}I_2, i_{8°C}) = (190{,}88 \pm 0{,}02) \text{ MHz}$$

$$(^{129}I^{127}I, y''_{8°C}) - (^{127}I_2, i_{8°C}) = (256{,}62 \pm 0{,}01) \text{ MHz.}$$

Les figures 4 et 5 représentent les histogrammes de ces mesures. Il faut remarquer la répartition anormale des mesures concernant la composante k.

Sur le laser BIPM4', la cuve à iode se trouvait initialement du côté du miroir plan ; elle a été installée du côté du miroir courbe, ce qui a diminué la densité de puissance par un facteur 2,4. Sur les trois séries de mesures qui ont été faites dans ces conditions, les valeurs obtenues ne diffèrent pas de plus de 10 kHz ($\approx 2{,}1 \times 10^{-11}$) des valeurs moyennes pour les trois intervalles de fréquence déterminées précédemment.

4 - Discussion des résultats et conclusions

4-1 Ecart de fréquence entre les valeurs du BIPM, obtenues en 1982 et celles obtenues antérieurement.

Cet écart est de 130 kHz. Il ne semble pas qu'il provienne directement d'une contamination des cuves à iode 129 puisque l'une

d'elles est la même que précédemment. Il semble plutôt qu'il corresponde aux variations anormales de fréquence observées sur la composante k lorsque la puissance surfacique au milieu de la cuve passe de 12 à 6×10^4 Wm^{-2}. Les causes de cette anomalie restent à être élucidées.

Il est donc prudent, surtout pour la composante k et pour les basses pressions d'iode (< 9,0 Pa), de travailler avec des puissances surfaciques inférieures ou égales à 5×10^4 Wm^{-2}.

Les mesures antérieures à 1982, avaient été faites avec des puissances surfaciques élevées. On peut donc les considérer comme douteuses et utiliser de préférence celles déterminées en 1982.

4-2 Comparaisons des valeurs du BIPM avec celles obtenues récemment dans d'autres laboratoires nationaux

Un résumé de ces valeurs a été fait par W.R.C. Rowley (NPL) [16]. L'écart entre les valeurs du BIPM et celles du NPL est maintenant de l'ordre de 30 kHz lorsque les cuves à iode des lasers sont à 8 °C, mais cet écart est encore de 90 kHz lorsque les cuves à iode 129 et 127 sont respectivement à 4 °C et 15 °C. Il faut noter que dans ce document, il n'y a aucune indication concernant les puissances surfaciques.

Actuellement des mesures sont en cours au NBS (USA) et au CSIRO (Australie).

4-3 Recherche des causes possibles des fluctuations de fréquence de la composante k

La variation de la fréquence d'un laser en fonction de la puissance n'est pas un phénomène nouveau, mais dans le cas de la composante k le coefficient de variation est anormalement grand ; cela coïncide avec une mauvaise répétabilité des mesures.

Pour tenter de découvrir les causes possibles de ces anomalies, une étude théorique de l'emplacement des raies perturbatrices provenant des transitions interdites et des croisements de niveaux pour les deux isotopes de l'iode 127 et 129 a été faite au BIPM par M. Gläser [17]. Il ressort de cette étude que la composante k de $^{129}I_2$ semble peu perturbée par les raies parasites provenant des transitions 8-4, P(54) et 12-6, P(69) de $^{129}I_2$. Par contre, il y a apparemment, une superposition avec une raie provenant de la molécule mixte $^{127}I^{129}I$ [18], probablement une raie d'un croisement de niveaux de 6-3, P(33). Sur la figure 6, extraite de cette dernière référence, la perturbation est très visible lorsque le pourcentage d'iode 129 est égal à celui d'iode 129. On rappelle que généralement la proportion d'iode 127 dans l'iode 129 est ≈ 17 %. Les résultats que l'on obtient peuvent donc dépendre énormément du pourcentage d'iode 127.

La répartition en deux groupes assez distincts des mesures de fréquence de l'intervalle ($^{129}I_2$,k - $^{127}I_2$,i) semble confirmer la présence d'un doublet pour la composante k.

En conclusion, il est souhaitable pour l'avenir d'éviter l'emploi de la composante k, la composante a mais surtout la composante y" de la transition 6-3, P(33) de la molécule $^{127}I^{129}I$ nous semblent beaucoup moins perturbées.

Septembre 1982

Références

[1] HANES, G.R. and DAHLSTROM, C.E. Appl. Phys. Lett., 14, 1969, pp. 362-364.

[2] KNOX, J.D. and YOH-HAN PAO Appl. Phys. Lett., 16, No 3, 1970, pp. 129-131.

[3] WALLARD, A.J. J. PHYS. E, 5, 1972, pp. 926-930.

[4] SCHWEITZER, W.G., KESSLER, E.G., DESLATTES, R.D., LAYER, H.P. and WHETSTONE, J.R. Appl. Opt., 12, 1973, pp. 2927-2938.

[5] HELMCKE, J. and BAYER-HELMS, F. Metrologia, 10, 1974, pp. 69-71.

[6] CEREZ, P., BRILLET, A. and HARTMANN, F. IEEE TRANS. Instrum. Meas., IM23, No 4, 1974, pp. 526-528.

[7] Procès-Verbaux CIPM, 40, 1972, pp. 38-39 et 41, 1973, pp. 38-41.

[8] CCDM, 5e session, 1973, p. M15.

[9] Procès-Verbaux CIPM, 42, 1974, pp. 35-36.

[10] Procès-Verbaux CIPM, 46, 1978, pp. 32-33 et 48, 1980, pp. 36-37.

[11] CCDM, 5e session, 1973, p. M26.

[12] LAYER, H.P., DESLATTES, R.D. and SCHWEITZER, W.G. Appl. Opt., 15, No 3, 1976, pp. 734-743.

[13] POLLOCK, C.R., JENNINGS, D.A., PETERSEN, F.R., WELLS, J.S., DRULLINGER, R.E., BEATY, E.C. and EVENSSON, K.M. IEEE Trans. Instrum. Meas., CPEM 1982, à paraître.

[14] CHARTIER, J.-M., HELMCKE, J. and WALLARD, A.J. IEEE Trans. Instrum. Meas., IM25, No 4, 1976, pp. 450-453.

[15] Document CCDM/82-29.

[16] ROWLEY, W.R.C. Document CCDM/82-2.

[17] Document CCDM/82-31.

[18] MAGYAR, J. and BROWN, N., Metrologia, 16, 1980, pp. 63-68.

Tableau I

Caractéristiques des lasers

Lasers	Tubes amplificateurs	Cuves à iode 129 N°	Longueurs des cavités (m)	Miroirs Côté tube laser Rayons de courbure (m)	Miroirs Côté tube laser Trans. (%)	Miroirs Côté cuve à iode Rayons de courbure (m)	Miroirs Côté cuve à iode Trans. (%)	Diamètres des cols des faisceaux W (mm)
BIPM5	CW301	1	0,40	0,60	0,9	1,20	0,9	0,25
BIPM6	LT2	2	0,35	0,60	0,9	∞	0,9	0,24
BIPM4'	CW301	3	0,38	0,60	0,9	∞	0,9	0,24
BIPM5'	NEC	2	0,41	0,60	0,9	∞	0,9	0,24

Tableau II

Coefficients moyens de variation de fréquence par MHz de modulation crête à creux (entre 3 et 8 MHz)

Lasers	cuves à iode 129 N°	Temp. I_2 °C	Pression I_2 Pa	P/S $\times 10^4$ W•m^{-2}	Coefficients moyens de variation de fréquence pour k kHz par MHz	a kHz par MHz	y" kHz par MHz
BIPM4'	3	8	9,0	9,6	- 8,3 ± 0,7	- 6,7 ± 0,8	- 9,2 ± 0,8
BIPM5'	2	8	9,0	5,7	- 14,2 ± 1,0	- 9,1 ± 1,0	- 7,9 ± 0,6

Tableau III

Coefficients moyens de variation de fréquence en fonction de la puissance pour le laser BIPM4' entre 100 et 300 µW (≙ des puissances surfaciques, au milieu de la cuve à iode, comprises entre 5,7 et 17,8 × 10^4 Wm^{-2})

Date des mesures	Temp. I_2 °C	Pressions I_2 Pa	Coefficients moyens de variation de fréquence en kHz/µW pour k	a	y"
1982-03-17	5	6,8	- 0,80 ± 0,07	- 0,07 ± 0,04	
1982-05-06	5,2	6,9	+ 0,27 ± 0,02	+ 0,11 ± 0,04	- 0,08 ± 0,03
1982-04-30	7,4	8,5	- 0,43 ± 0,07	0,00 ± 0,03	- 0,26 ± 0,06
1982-03-17	8,0	9,0	- 0,10 ± 0,01		
1982-03-18	8,0	9,0	- 0,72 ± 0,03	0,00 ± 0,01	- 0,22 ± 0,02
1982-03-18	10	10,9	- 0,65 ± 0,03	- 0,03 ± 0,02	- 0,24 ± 0,02

Tableau IV

Coefficients moyens de variation de fréquence en fonction de la puissance pour le laser BIPM5' entre 80 et 140 µW (≙ des puissances surfaciques, au milieu de la cuve à iode, comprises entre 4,8 et 8,1 × 10^4 Wm^{-2})

Date des mesures	Temp. I_2 °C	Pressions I_2 Pa	Coefficients moyens de variation de fréquence en kHz/µW pour k	a	y"
1982-05-06	5,8	7,3	+ 0,02 ± 0,09	+ 0,06 ± 0,04	- 0,09 ± 0,06
1982-04-30	7,4	8,5	+ 0,07 ± 0,02	- 0,03 ± 0,04	- 0,19 ± 0,03
1982-05-06	8	9,0	+ 0,28 ± 0,19	+ 0,19 ± 0,05	- 0,16 ± 0,06

Tableau V

Coefficients moyens de variation de fréquence en fonction de la pression d'iode pour le laser BIPM4' entre 6 et 17,3 Pa
(≙ des températures comprises entre 3,8 et 15 °C)

Date des mesures	Domaines de variation de la puissance µW	Coefficients moyens de variation de fréquence en kHz/Pa pour k	l	m	a	y"
1982-03-17	110-250	+ 6,2 ± 1,4	- 19,3 ± 1,2	- 2,2 ± 4,2	- 9,3 ± 0,5	- 5,1 ± 0,3
1982-05-06	76-134	- 12,2 ± 0,8			- 8,6 ± 0,8	- 5,1 ± 0,7
"	146-210	- 12,0 ± 0,3			- 8,9 ± 0,5	- 5,6 ± 0,6
"	143-232	- 12,4 ± 0,6			- 10,2 ± 0,5	- 6,0 ± 0,5
"	159-253	- 12,9 ± 0,5			- 9,0 ± 0,2	- 5,9 ± 1,1
"	204-256	- 13,5 ± 0,6			- 11,1 ± 1,0	- 6,1 ± 0,6

Tableau VI

Coefficients moyens de variation de fréquence en fonction de la pression d'iode pour le laser BIPM5' entre 6 et 13 Pa
(≙ des températures comprises entre 3,8 et 12 °C)

Date des mesures	Domaines de variation de la puissance µW	Coefficients moyens de variation de fréquence en kHz/Pa pour k	l	m	a	y"
1982-03-11	50-120	- 2,3 ± 1,2	- 20,4 ± 1,4	- 5,4 ± 2,0	- 8,1 ± 0,4	- 5,5 ± 0,5
1982-05-06	80-110	- 6,3 ± 0,5			- 9,4 ± 0,1	- 4,6 ± 1,0
"	85-100	- 6,1 ± 1,9			- 9,5 ± 0,4	- 4,2 ± 0,5
"	100-140	- 5,5 ± 1,0			- 8,4 ± 0,4	- 5,4 ± 0,3

Légendes des figures

Fig. 1.- Correspondance entre les isotopes ^{20}Ne, ^{22}Ne et les raies de l'iode R(127), P(33) et P(69).

Fig. 2.- Enregistrement du spectre de l'iode 129 au voisinage de la composante k.

Fig. 3.- Variations de la fréquence des composantes k, a et y" avec la puissance du laser.
+ = mesures du 17 mars 1982, température de l'iode : 8 °C
× = mesures du 18 mars 1982, " " : 6 °C
● = mesures du 18 mars 1982, " " : 10 °C
Δ = mesures du 6 mai 1982, " " : 8 °C.

Fig. 4.- Histogramme des mesures pour les intervalles de fréquence : $(k_{4°C} - i_{15°C})$, $(a_{4°C} - i_{15°C})$ et $(y''_{4°C} - i_{15°C})$; la valeur moyenne ainsi que l'estimation de l'écart-type d'une mesure sont indiquées.
Zones hachurées → mesures avec BIPM5'
Zones non hachurées → mesures avec BIPM4'.

Fig. 5.- Histogramme des mesures pour les intervalles de fréquence : $(k_{8°C} - i_{8°C})$, $(a_{8°C} - i_{8°C})$ et $(y''_{8°C} - i_{8°C})$; la valeur moyenne ainsi que l'estimation de l'écart-type d'une mesure sont indiquées.
Zones hachurées → mesures avec BIPM5'
Zones non hachurées → mesures avec BIPM4'.

Fig. 6.- Enregistrements du spectre de l'iode 129 au voisinage de la composante k, d'après Magyar et Brown [18].
Enregistrement supérieur : $^{127}I_2$ → 83 %, $^{129}I_2$ → 17 %
Enregistrement inférieur : $^{127}I_2$ → 50 %, $^{129}I_2$ → 50 %.

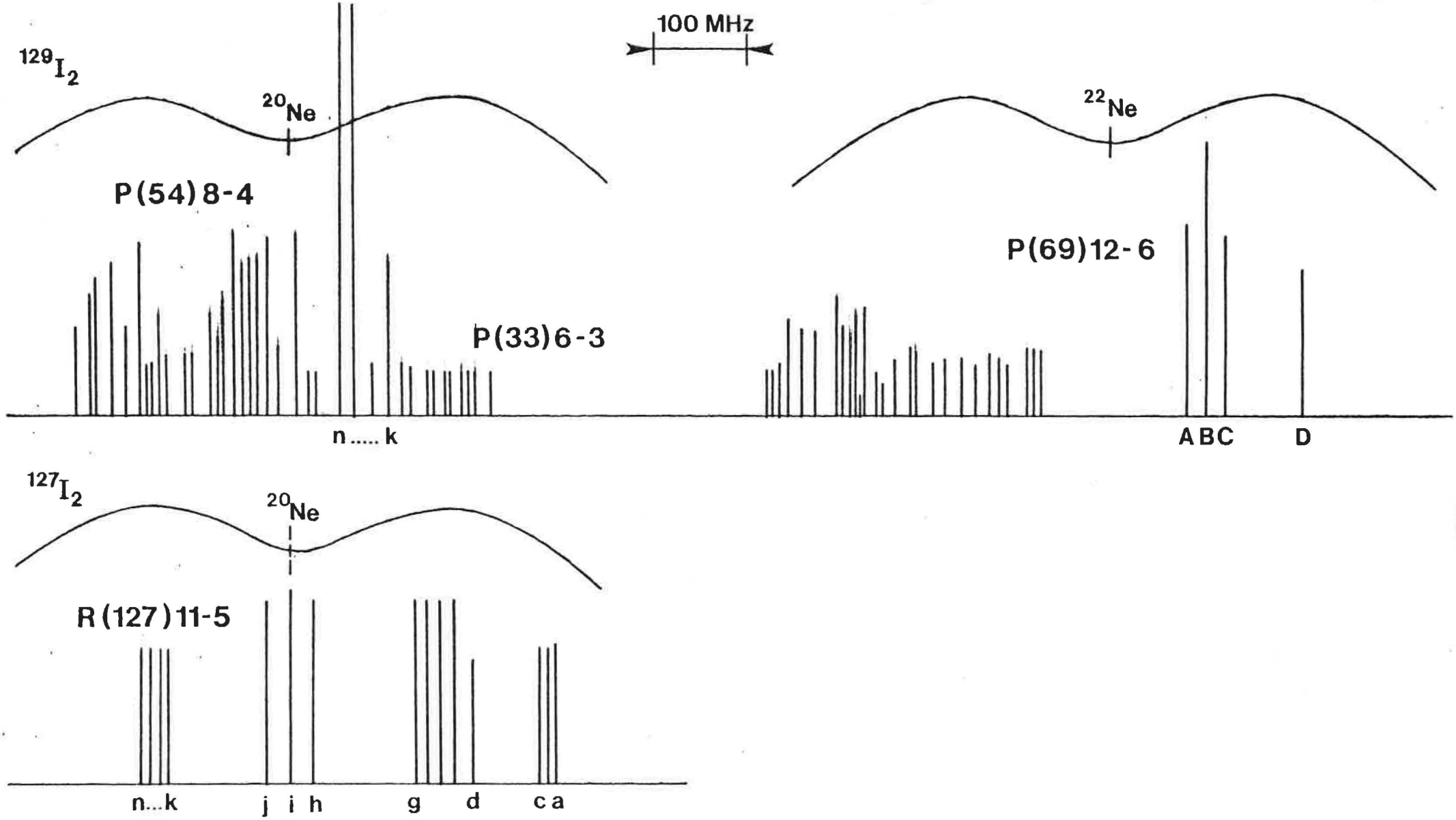

100 MHz
$^{129}I_2$
^{20}Ne
P(54) 8-4
P(33) 6-3
n ..... k
^{22}Ne
P(69) 12-6
A B C
D
$^{127}I_2$
^{20}Ne
R(127) 11-5
n...k
j i h
g
d
c a

Fig. 1

29 avril 1982 - Laser BIPM4'

θ_{I_2} = 8 °C, amplitude de modulation : 6 MHz crête à creux ;
P = 168 µW (haute tension : 1 590 V).

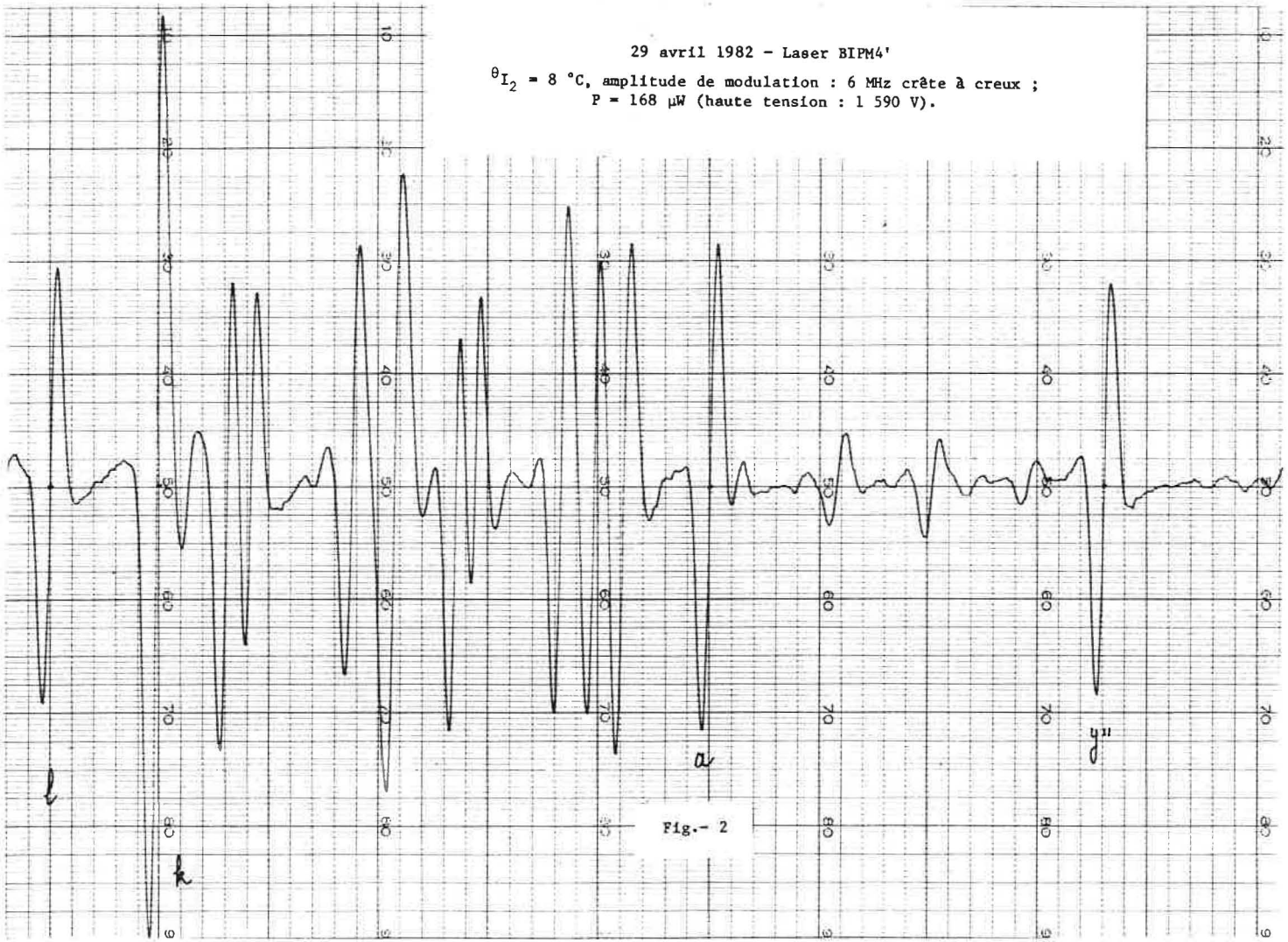
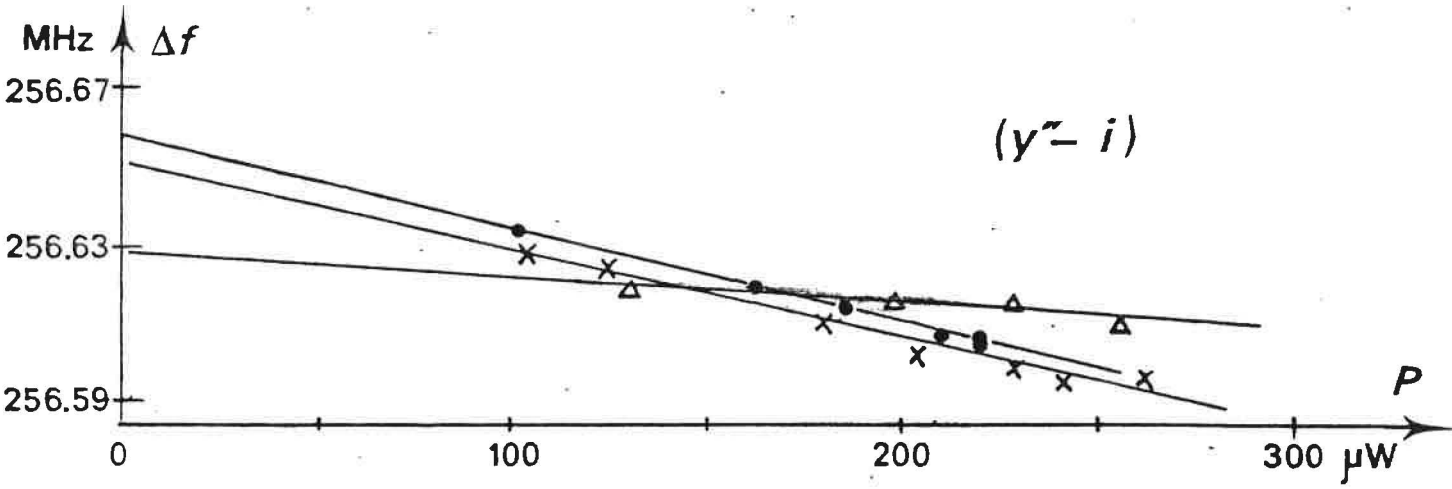
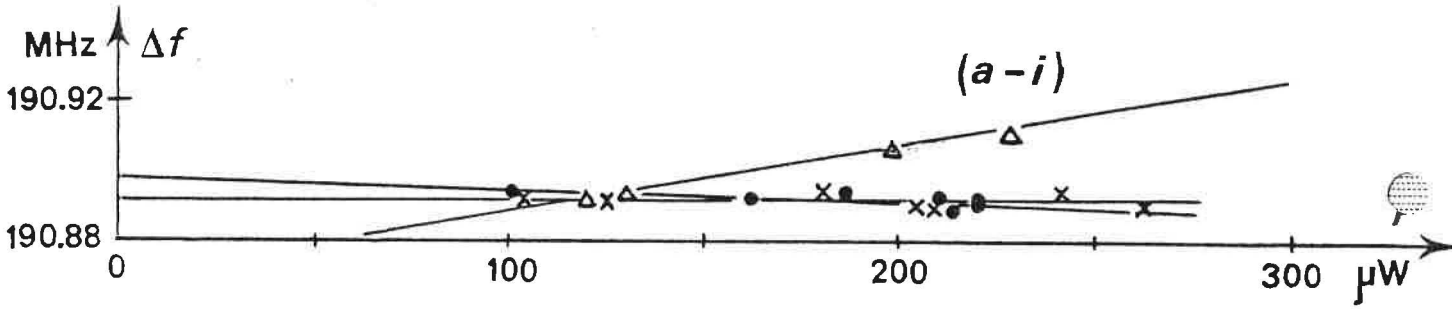


Fig.- 2


MHz
Δf
256.67
256.63
256.59
(y~ - i)
P
0
100
200
300 μW


MHz
Δf
190.92
190.88
(a - i)
0
100
200
300 μW

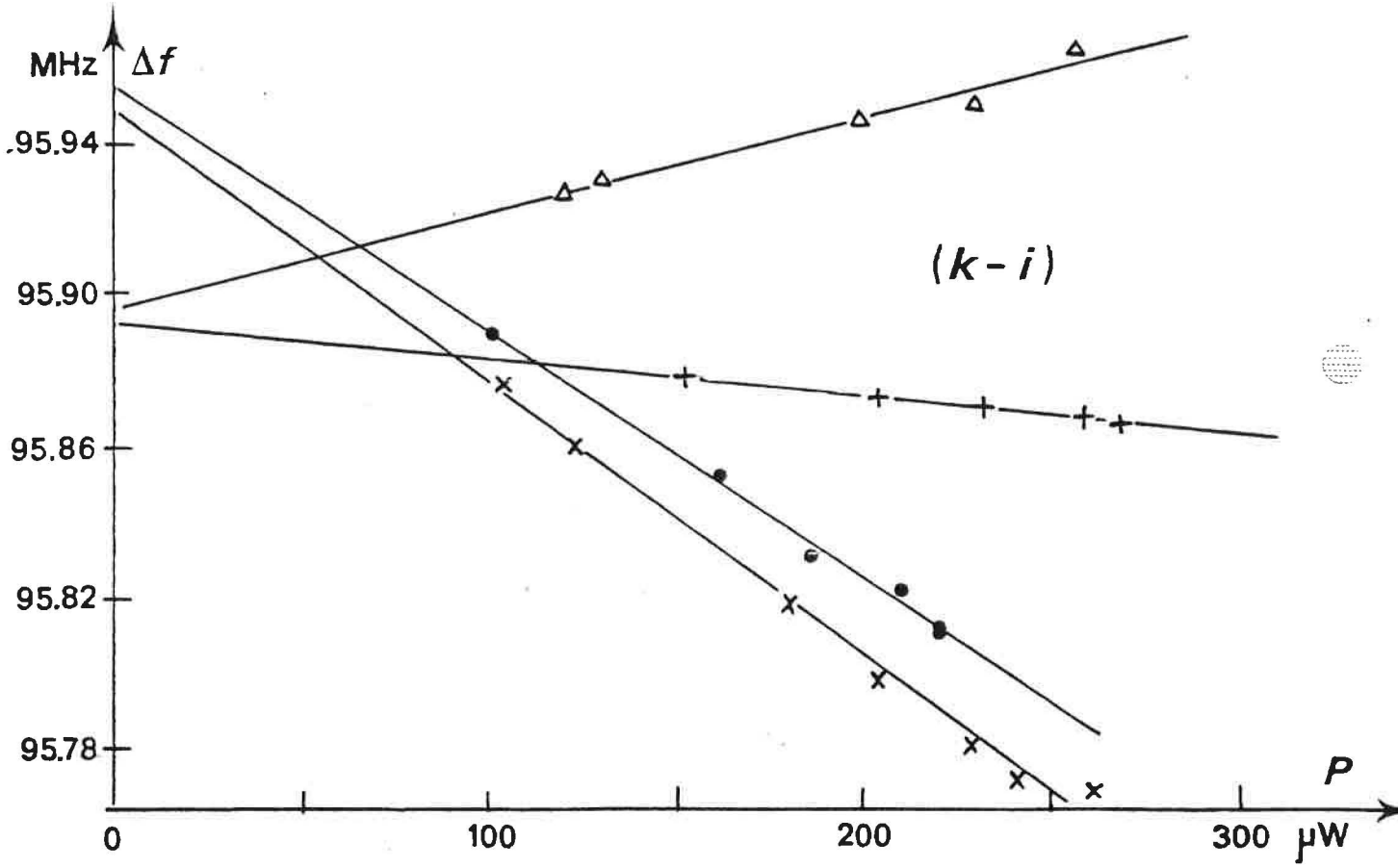

MHz
Δf
95.94
95.90
95.86
95.82
95.78
(k - i)
P
0
100
200
300 μW

Fig. 3

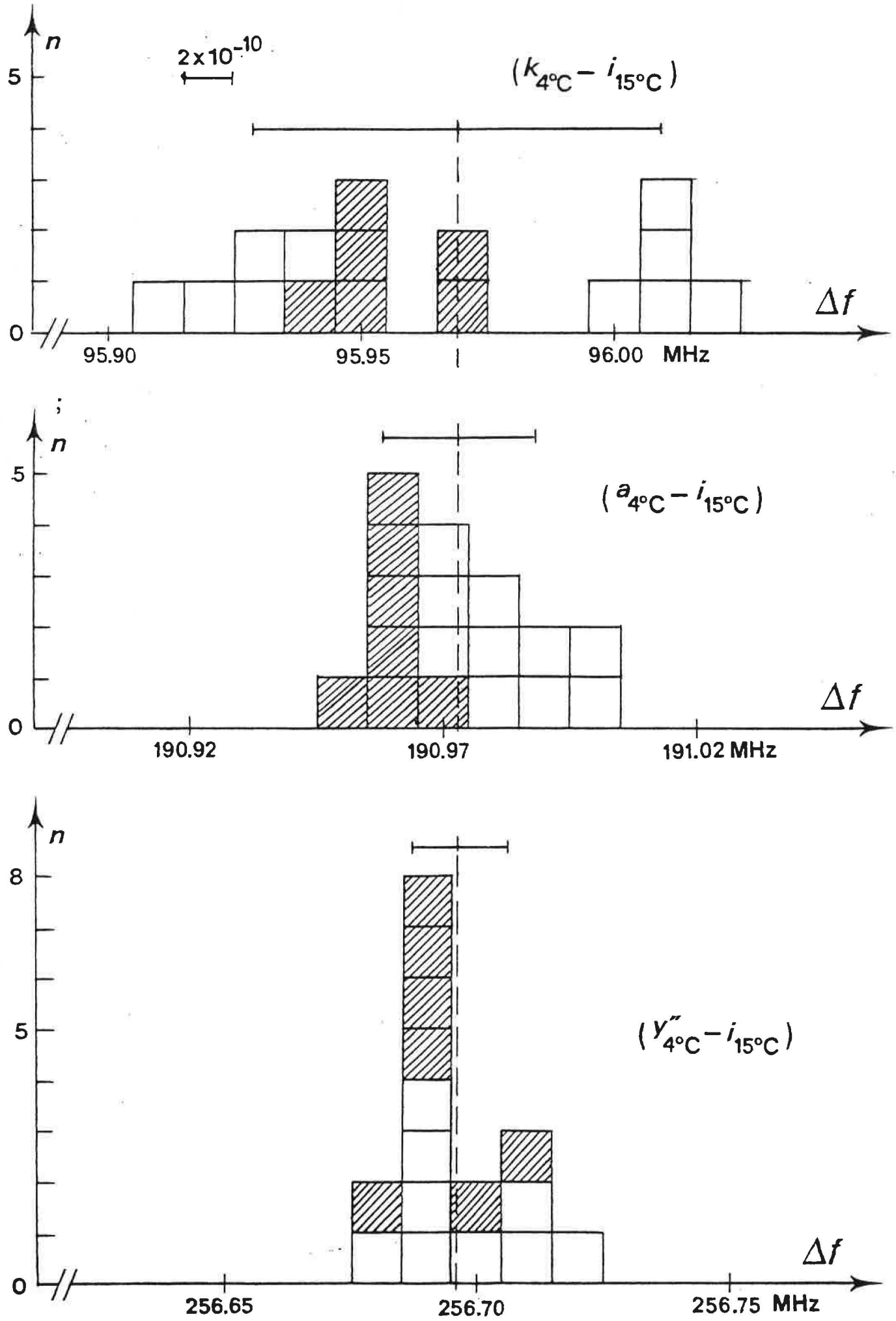

n
5
0
2x10^-10
(k4°C − i15°C)
Δf
95.90
95.95
96.00 MHz
n
5
0
(a4°C − i15°C)
Δf
190.92
190.97
191.02 MHz
n
8
5
0
(y''4°C − i15°C)
Δf
256.65
256.70
256.75 MHz

Fig. 4

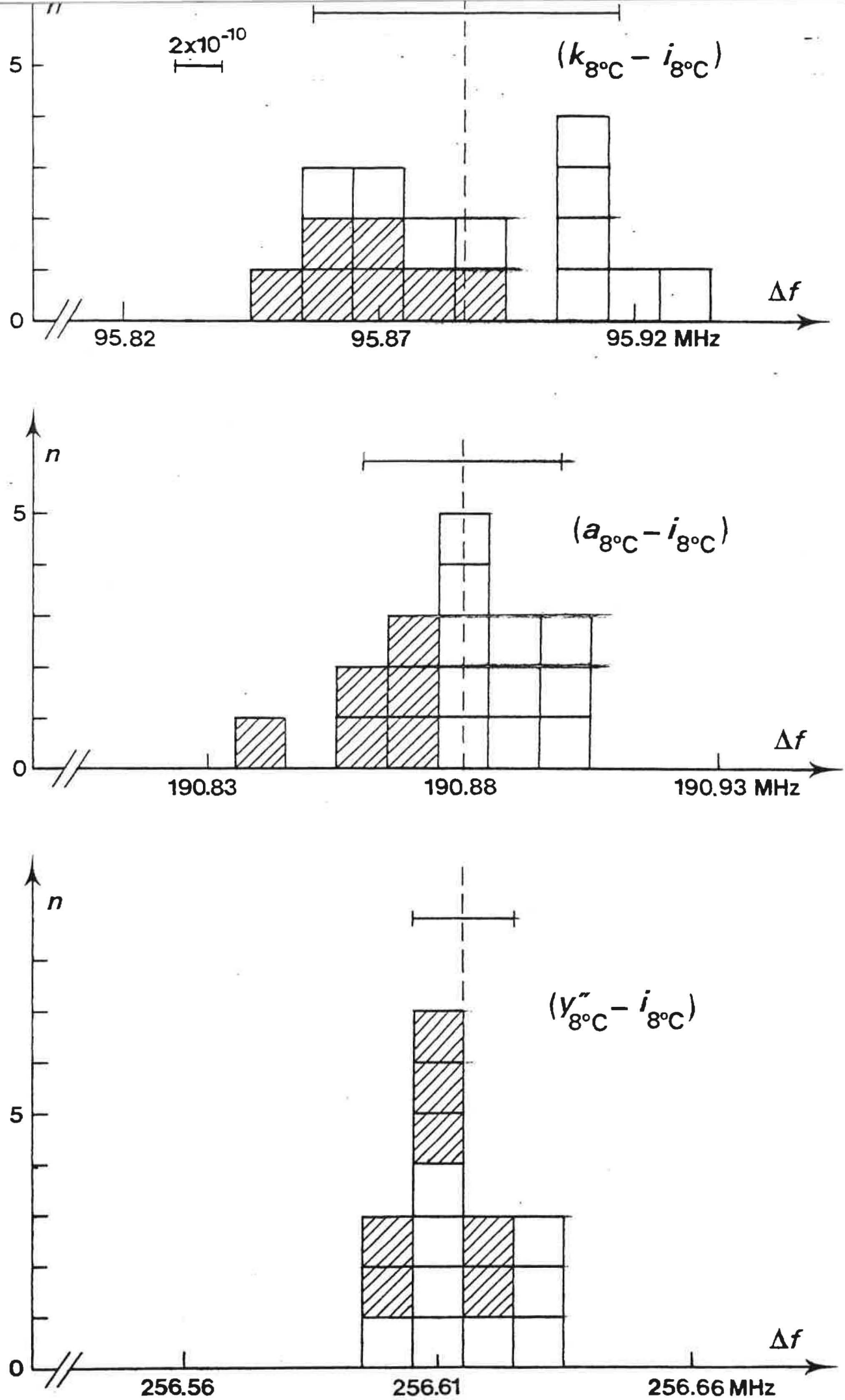

n
5
0
2x10^-10
(k8°C − i8°C)
Δf
95.82
95.87
95.92 MHz
n
5
0
(a8°C − i8°C)
Δf
190.83
190.88
190.93 MHz
n
5
0
(y''8°C − i8°C)
Δf
256.56
256.61
256.66 MHz

Fig. 5

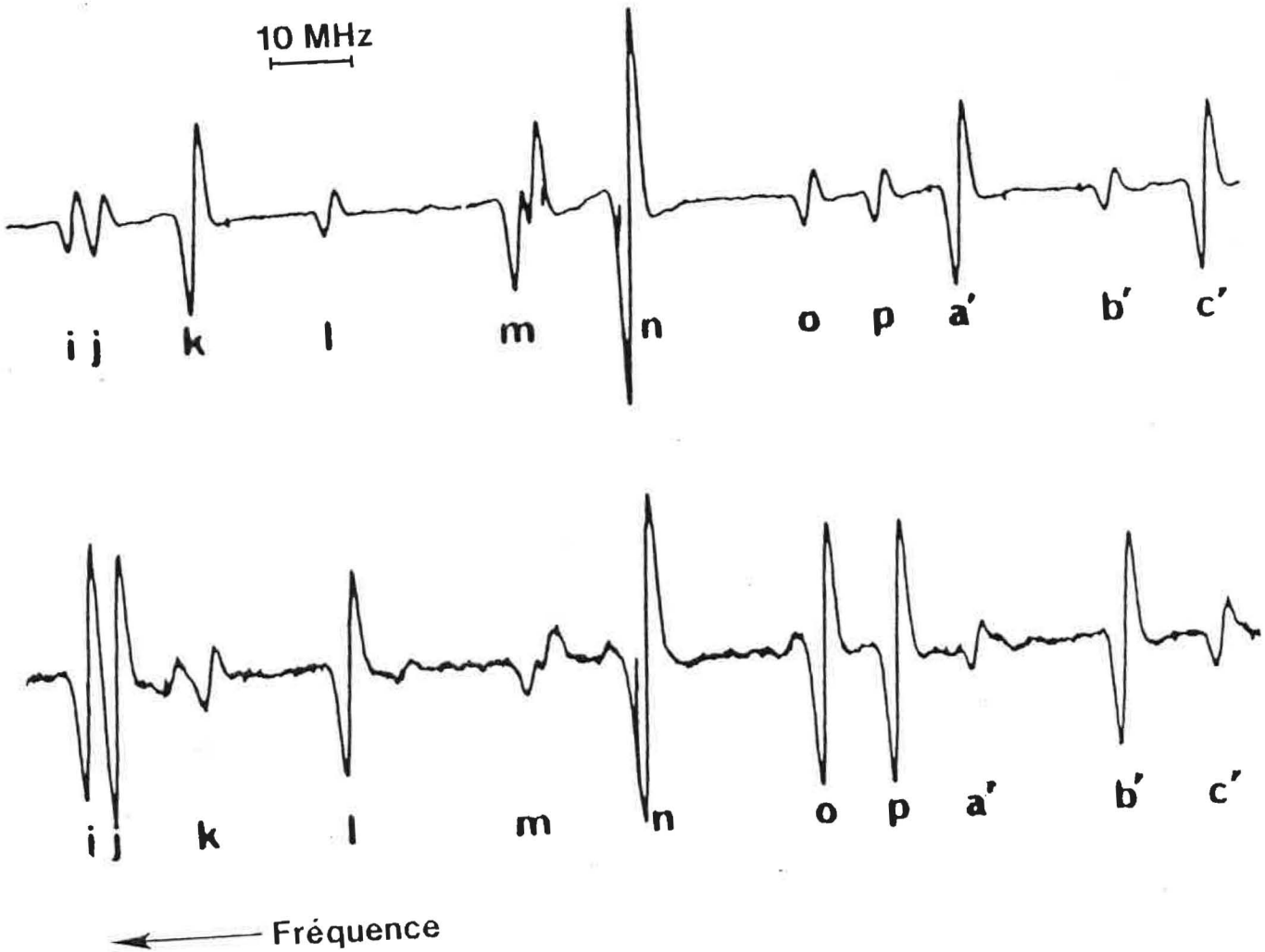


Fig. 6