

54191
(21)
= B =

Bibliothèque de l'Université
de Liège — PÉRIODIQUES

UNIVERSITÉ DE LIÈGE (Belgique)
INSTITUT D'ASTROPHYSIQUE

Extrait du « Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège » — Michels in 8.
N° 3, mars 1950.

16 VI 1950

Remarques concernant les spectrographes de haute luminosité

par P. SWINGS

Professeur à l'Université de Liège

RÉSUMÉ

Certaines combinaisons optiques (collimateurs et chambres de types nouveaux, trains de prismes interchangeables) sont décrites pour des spectrographes de haute luminosité à prismes en verre. De nouveaux types de spectrographes lumineux pour l'ultraviolet sont décrits; ils utilisent les cristaux synthétiques de KBr, LiF, et NaCl.

Les nombreuses applications industrielles de l'effet Raman, de la fluorescence et de la micro-spectrographie ont nécessité la construction de spectrographes de haute luminosité, semblables à ceux qui sont employés en Astrophysique pour l'étude des astres de faible luminosité. Les besoins des physiciens industriels qui utilisent l'effet Raman ou d'autres sources lumineuses faibles sont semblables à ceux des astronomes : la luminosité est le facteur primordial, mais il faut aussi pouvoir couvrir un domaine de longueurs d'onde suffisamment vaste et adapter la dispersion linéaire à l'application considérée. L'instrument idéal en spectrographie Raman appliquée semble bien être du type couramment adopté en Astrophysique pour l'observation au foyer coulé des grands télescopes. Il devrait comporter : comme système dispersif, un réseau plan d'environ 6×4 pouces, gravé en échellette, de façon à être lumineux dans le 1^{er} ordre du visible et le 2^{me} ordre de l'ultraviolet; comme collimateur, un miroir parabolique hors d'axe; comme chambres photographiques, des chambres de cameras de rapports



d'ouverture divers, allant d'une chambre de Schmidt (ou similaire) très rapide $f/1$ ou $f/2$ à un miroir sphérique en montage Schmidt (centre de courbure du miroir, au réseau) ouverte à $f/15$ ou $f/20$. A ma connaissance, il n'y a pas d'instrument de ce type sur le marché. La plupart des spectroscopistes emploient, comme appareils lumineux, des instruments à prismes. Il m'a paru utile de signaler certaines adaptations pouvant être faites à de tels instruments.

a) *Instrument à prismes de verre en vue de l'étude du domaine spectral allant du violet au rouge*

Le collimateur est habituellement un doublet plus ou moins achromatique, ayant une ouverture relative de l'ordre de $f/10$. Il peut être remplacé soit par un télescope Cassegrain, soit par un miroir parabolique hors d'axe, soit par un montage de Pfund. Les chambres sont habituellement des systèmes de lentilles; ceux-ci peuvent être avantageusement remplacés par des systèmes catadioptriques du type de Schmidt ou à ménisque correcteur. J'ai calculé un instrument dont le collimateur est un achromat $f/10$; le système dispersif un jeu de trois prismes de 60° en flint extra-dense (1); la chambre photographique $f/3$ ($f = 345$ mm), un miroir sphérique (de rayon $R = 736,66$ mm) dont l'aberration sphérique est corrigée par un ménisque d'ouverture 115 mm, dont les deux faces sont concentriques au miroir sphérique. Cet instrument a été réalisé par la firme Lane-Wells de Los Angeles, Calif., U.S.A. et est, à présent, employé dans des laboratoires industriels américains, notamment pour l'étude de produits pétroliers, par effet Raman. A titre d'exemple, les remarques suivantes sont adaptées au spectrographe Lane-Wells; mais il est clair qu'on peut les appliquer à d'autres types d'instruments.

(1) Indices de réfraction du verre employé : $n_b = 1.67300$; $n_p = 1.66895$; $n_c = 1.66712$; $n_d = 1.70095$.

Le ménisque du type symétrique est assez épais. Si, pour une raison quelconque [p.ex. pour réduire l'absorption (1)], on désire employer un correcteur plus mince, mais ayant encore des surfaces sphériques (2) on peut choisir un ménisque dont les centres des faces ne coïncident plus avec le centre du miroir. Des formules données par D.D. Maksutov (3) fournissent les valeurs numériques suivantes pour un crown borosilicate d'indice $n_b = 1.51700$ et de dispersion $V = 64.5$:

- rayon de la surface d'entrée 150.00 mm;
- rayon de la surface de sortie 157.05 mm;
- épaisseur 11.872 mm;
- distance entre la face arrière du ménisque et le miroir 461.11 mm;
- ouverture libre du ménisque 118.72 mm;
- distance du foyer au miroir 376.97 mm.

Un tel système donnerait une très bonne définition.

Cette chambre photographique, tout comme l'originale, est « sur l'axe ». La quantité de lumière interceptée par le châssis n'est pas très élevée. Mais si l'on voulait installer un châssis mobile ou des récepteurs électroniques nombreux, la perte de lumière deviendrait prohibitive. Dans un tel cas, une chambre « hors d'axe » serait toute indiquée; elle aurait une définition au moins aussi bonne que toute combinaison compliquée de lentilles (4). L'étude de chambres « hors d'axe » à ménisque (5),

(1) Ceci serait absolument requis pour un instrument couvrant l'ultraviolet. Un correcteur épais en quartz fondu serait plus difficilement réalisable qu'un ménisque mince.

(2) Si l'on admet des surfaces asphériques, une lame de Schmidt ferait bien l'affaire !

(3) J.O.S.A., 34, 270, 1944.

(4) Comme système de lentilles, on pourrait envisager avec fruit un doublet accompagné d'un ménisque « correcteur » de puissance nulle. On peut calculer un tel système donnant de $\lambda 4047$ à $\lambda 4861$ ($\lambda 4869$ étant sur l'axe) des raies de largeur inférieure à environ 100μ , ce qui suffit pour la plupart des spectres Raman.

(5) On pourrait évidemment employer une partie de lame de Schmidt hors d'axe.

par tracé de rayons est compliquée parce qu'elle implique le tracé de rayons ne rencontrant pas l'axe (« skew rays »). Voici le résultat d'une telle étude, applicable au même miroir sphérique que ci-dessus ($R = 736.66$ mm) : matière, crown borosilicate, d'indice $n_b = 1.51100$ et de dispersion $V = 63.4$; rayons de courbure du ménisque 187.7 et 202.1 mm; épaisseur sur l'axe 23.47 mm. Si le spectre est centré à $\lambda 4359$ Hg, les largeurs minima des raies seraient : 30μ à $\lambda 4359$; 25.5μ à $\lambda 4047$ et 35μ à $\lambda 4861$. Une définition analogue serait obtenue en centrant à $\lambda 5461$ Hg. La définition est donc entièrement suffisante, surtout pour la spectroscopie Raman où les raies sont rarement fines. Le champ serait courbe (rayon 444.6 mm), mais un aplanisseur de champ serait possible (lentille plan-convexe, de distance focale approximative 231 mm). Le spectre « sortirait » complètement du faisceau atteignant le miroir et serait donc d'accès commode.

Pour certaines substances à effet Raman très faible, une chambre d'ouverture relative très élevée serait désirable. On peut calculer un ménisque symétrique donnant une définition excellente (diamètre du cercle de confusion : 27μ) à l'ouverture relative $f : 1.25$. En voici les caractéristiques :

crown borosilicate $n_b = 1.5110$ ($n_{4861} = 1.51665$);
 ménisque : $R_1 = 91.57$, $R_2 = 102.38$, ouverture libre = 105,0;
 miroir : $R_3 = 276.94$, ouverture libre = 160 (couvrant sans vignettage $\lambda 4341 - \lambda 5893$);
 distance focale du système : 131.5 mm (courbure de la surface focale);
 ouverture relative $f : 1.25$ (ouverture effective $f : 1.41$);
 longueur du spectre de $\lambda 4000$ à $\lambda 6000 = 33$ mm;
 dispersion allant de 19.9 A./mm en $\lambda 4000$ à 124.9 A./mm en $\lambda 5500$.

Avec une telle chambre, une fente très large peut être employée (ordre de 200 μ ou plus).

L'instrument considéré jusqu'ici est bien adapté à l'excitation du spectre Raman au moyen des raies violettes du mercure : le verre des prismes est très transparent pour toutes les longueurs d'onde supérieures à $\lambda 4000$. Il peut arriver qu'il soit désirable d'employer des raies excitatrices de plus grande longueur d'onde, par exemple la raie verte ou les raies jaunes du mercure ou bien la raie D_3 de l'hélium; c'est le cas pour certaines substances colorées ou pour des liquides qui fluorescent sous l'action des raies violettes de Hg. Dans ce cas, il y a avantage à obtenir une dispersion linéaire plus élevée dans le domaine vert-jaune-rouge, quitte à ce que la matière des prismes soit opaque aux rayons violets. Il faut, d'ailleurs, remarquer que le facteur important en spectroscopie Raman est la dispersion en nombres d'onde (cm^{-1}) par mm de cliché. L'emploi d'une chambre photographique de plus grande distance focale réduirait la vitesse de l'instrument. On peut donc penser plutôt au remplacement du train de prismes par un autre train plus dispersif dans le vert-jaune. Dans l'instrument original, la dispersion varie de $143 \text{ cm}^{-1}/\text{mm}$ en $\lambda 4800$ à $478 \text{ cm}^{-1}/\text{mm}$ en $\lambda 5900$, c'est-à-dire d'environ 60 %. Il suffirait donc d'accroître la dispersion de 60 % dans le vert-jaune pour y disposer de la même dispersion en cm^{-1}/mm que dans l'appareil initial pour la région bleue. Le problème se posera différemment suivant que l'on peut, ou non, changer l'orientation et la position de la chambre.

Si la chambre peut être déplacée, il n'y a guère de difficulté à accroître considérablement la dispersion dans le vert-jaune; il suffira d'employer des prismes plus dispersifs. Toutefois, certaines limitations apparaissent immédiatement. A cause de la dispersion élevée, la base du second et, surtout celle du troisième prismes doivent être appréciablement plus grandes que celle du premier prisme.

Une autre limite est encore imposée par la direction du faisceau émergent : en employant trois prismes de 60° , on arrive aisément à ce que le faisceau sortant croise le collimateur, ne laissant pas de place pour la chambre, sauf en employant un



miroir plan ! Bien entendu, rien n'empêche d'utiliser trois prismes d'angle inférieur à 60° , ou bien encore deux prismes de 60° séparés par un prisme d'angle plus petit. On peut aisément accroître la dispersion de 70 % avec des verres denses normalement fabriqués; on peut atteindre un accroissement encore beaucoup plus élevé avec des verres spéciaux extrêmement denses.

Le problème pratique est beaucoup plus compliqué si l'on veut maintenir la chambre à sa position originale, lors du remplacement du train original de prismes par un autre train. Ce nouveau jeu de prismes serait placé au minimum de déviation pour une longueur d'onde du domaine vert-jaune ⁽¹⁾. Il est indispensable de choisir les angles des nouveaux prismes, de façon que la déviation totale à la longueur d'onde désirée au centre du cliché (p. ex. en λ 5893) soit égale à la déviation du train original au centre du spectre (p. ex. λ 4800). Un accroissement de dispersion allant jusqu'à environ 100 % est possible. Avec un verre d'indice $n_0 = 1.78654$ et de dispersion $V = 25.5$ ⁽²⁾ on peut associer deux prismes de 60° et un de $29^\circ 16'$: la position de la chambre reste la même et la dispersion est augmentée de 74 % par rapport au train initial de prismes. On peut remarquer que, dans ce cas, le prisme d'angle $29^\circ 16'$ est de dimension très réduite. La courbure du spectrogramme serait différente de la courbure initiale; il faudrait donc employer un châssis différent.

⁽¹⁾ La dispersion angulaire varie considérablement avec le choix de la longueur d'onde placée au minimum de déviation. C'est ainsi que si on place λ 5893 au minimum de déviation, on obtient une dispersion angulaire de λ 4359 à λ 5461, 60 % plus élevée que si on place λ 4047 au minimum de déviation (ceci dans le cas du train initial de prismes considéré ici). Mais le changement de position des prismes affecte la dimension requise pour ces prismes ainsi que la définition. Un compromis doit être adopté.

⁽²⁾ Autres indices : n (λ 6563) = 1.77806; n (λ 5461) = 1.79400; n (λ 4861) = 1.80892. Le problème se poserait de façon plus simple si l'on disposait de verres ayant une forte dispersion et un faible indice de réfraction; ces verres seraient, en quelque sorte, la contrepartie de certains verres nouveaux de haut indice et faible dispersion.

La dimension du spectre est : 13.67 mm de λ 5461 à λ 5893; 13.82 mm de λ 5893 à λ 6563.

b) *Instrument en vue de l'excitation de l'effet Raman dans l'ultraviolet*

La loi d'intensité en λ^{-4} et le fait que certaines lampes à vapeur de mercure fournissent une forte énergie pour la raie λ 2536 conduisent à considérer la construction de spectrographes très lumineux spéciaux pour l'ultraviolet. Il existe certains types excellents, comme celui d'Arnulf-Lyot ⁽¹⁾, utilisant des prismes et lentilles de quartz. On peut employer l'eau distillée au lieu du quartz; mais il est habituellement considéré qu'un spectrographe à prismes d'eau n'est pas pratique et sûr. Si l'emploi d'eau comme milieu dispersif n'était pas exclus, on pourrait envisager un instrument conçu comme suit :

- collimateur : miroir parabolique hors d'axe (angle hors d'axe : environ 15° ; distance focale 1035; ouverture 107.5), ou système de Pfund;
- prismes : deux prismes d'eau à fenêtres de quartz; hauteur 76; base du premier : 104.6, du second : 110.0; angle d'incidence en λ 2573 : $43^\circ 20'$;
- chambre : un système à ménisque en quartz fondu, p. ex. calculé suivant les formules de Maksutov : ménisque, $r_1 = 145.4$, $r_2 = 152.4$, épaisseur 11.5, ouverture 115; miroir sphérique, $r_3 = 713.5$, ouverture 200;
- distance entre face arrière du ménisque et miroir 446.66; distance du miroir au foyer 364.9.

Sans lentille d'aplanissement, ce système aurait une définition parfaite (diamètre du cercle de confusion 3.2 μ). Une lentille

⁽¹⁾ ARNULF et LYOT, Comptes Rendus, Paris, 201, 1 et 480, 1935; Réunions de l'Institut d'Optique, p. 31, 1936; A. ARNULF, Annales d'Astrophysique, 6, 21, 1943.



en quartz fondu aplanissant le champ, devrait être plan convexe (rayon de courbure 173.8). La dispersion serait de 20 Å/mm en λ 2500; le spectre mesurerait 16 mm de λ 2300 à λ 3000.

Mais une autre solution employant les cristaux de NaCl ou de KBr est maintenant possible; on sait, en effet, que des cristaux synthétiques d'excellente qualité optique peuvent être obtenus à des conditions raisonnables. Des deux cristaux, il semble bien que le KBr réserve les possibilités les plus intéressantes; ce sera le seul considéré ici (1).

Si on envisage un instrument ayant en λ 2500 une dispersion de 20 Å/mm (ou 320 cm⁻¹/mm (2)), on peut concevoir un instrument comme suit :

Collimateur : lentille en LiF, taillée de façon à réduire l'aberration sphérique au minimum (le LiF n'a pratiquement pas de dispersion dans le domaine considéré; une lentille simple joue donc le rôle d'un achromat) : ouverture = 33, $r_1 = 404.2$, $r_2 = 178.0$, épaisseur = 10.0, distance focale = 297, rapport d'ouverture = f/9; fente du côté le moins convexe de la lentille;

Prisme : un prisme de KBr de 60°, hauteur 23.3, base 46.4; Chambre : à ménisque hors d'axe (le châssis d'une chambre dans l'axe intercepterait trop — 35 % — de lumière), type symétrique, partie d'un f/1.6. Le ménisque pourrait être en silice fondue ou en LiF. Définition : 15 μ ou meilleure. Caractéristiques numériques pour un ménisque en silice

(1) Le NaCl ayant une dispersion plus faible exige un prisme et des lentilles beaucoup plus grands que le KBr (un peu plus du double). Dans le cas d'un spectrographe à prisme en NaCl, une chambre « sur axe » serait possible, car le cliché intercepterait seulement 8% du faisceau incident. Pour employer une chambre ayant à peu près la même distance focale que celle du spectrographe à prisme en KBr, il faudrait utiliser deux prismes de 60° en NaCl.

(2) Permettant une détermination des fréquences Raman avec une précision de l'ordre de 3 cm⁻¹.

fondue : $R_1 = 66.746$, $R_2 = 73.992$, R_3 (miroir) = 208.104, diamètre du ménisque = 38.0, diamètre du miroir = 50.7.

Comme toutes les surfaces sont sphériques, le système « hors d'axe » peut être poli « sur axe »; le ménisque et le miroir doivent alors être ajustés avec précision.

Lentille aplanissante : si désirable, une telle lentille est facile à obtenir (plan-convexe; rayon de courbure = 36.09 pour lentille quartz fondu, 31.77 pour lentille en LiF). Cette lentille devrait être découpée en rectangle (10 × 30.35) et placée près de la plaque, sa face plane dirigée vers la plaque.

Le spectre aurait une longueur de 30.35 mm de λ 2313 à λ 3082. La dispersion de KBr diminue rapidement vers les grandes longueurs d'onde; il suffirait d'accroître le châssis de huit millimètres pour couvrir le domaine jusque λ 4050. On remarquera le très petit encombrement de cet instrument lumineux.

Si on veut une dispersion plus élevée, par exemple 10 Å/mm en λ 2500, on peut soit employer deux prismes de 60° en KBr et garder la même chambre que dans l'exemple précédent, soit employer un prisme de dimension double et doubler les distances focales du collimateur et de la chambre.

Si on emploie deux prismes, le second devra être légèrement plus grand que le premier, la différence dépendant du domaine spectral désiré; il en résultera que la chambre devra aussi être légèrement plus grande que dans l'exemple précédent. Il faudra, en tout cas, encore employer une chambre hors d'axe, car le cliché intercepterait au moins 70 % du faisceau incident. A cause de la plus haute dispersion, le miroir devrait avoir un diamètre de 64 mm (au lieu de 51 dans l'exemple précédent).

Si l'on emploie seulement un prisme, on utilisera une chambre de distance focale double de celle de l'exemple précédent. Un système « sur axe » sera cette fois préférable. Si on emploie un ménisque de silice fondue, les caractéristiques du système (type Maksutov) seraient les suivantes :

ménisque : $R_1 = 83.41$; $R_2 = 87.29$, épaisseur = 6.6 ;

miroir : $R_3 = 409.47$;

distance entre le ménisque et le miroir = 256.3 ;

distance focale = 200 ;

ouverture du ménisque = 65.67 ;

ouverture du miroir, environ 95 (dépendant du domaine spectral).

Ce ménisque est mince. On obtiendrait d'aussi bons résultats avec un ménisque symétrique d'épaisseur 20.0 ($R_1 = 135.92$; $R_2 = 155.92$; $R_3 = 427.79$), mais il serait probablement plus difficile de réaliser un tel ménisque épais en silice fondue. Il n'y a aucune difficulté à calculer le ménisque en LiF qui pourrait remplacer celui en silice fondue. Bien entendu, les pièces optiques en KBr, LiF ou NaCl devraient être protégées de l'humidité.

Dans l'étude du second problème, j'ai eu le privilège de recevoir les suggestions et conseils précieux de Mr. le Professeur P. Pringsheim que je remercie ici bien cordialement.

Institut d'Astrophysique, février 1950.

54191 B.
(21)