

SPECTROMÈTRE INTERFÉRENTIEL MULTIPLEX POUR MESURES INFRA-ROUGES SUR LES ÉTOILES

Par PETER FELLGETT,

The Observatories, University of Cambridge.

Résumé. — Cet interféromètre a été construit en vue de l'emploi au foyer coudé du télescope de 90 cm de l'Observatoire de Cambridge. Il utilise une lame séparatrice en fluorine, recouverte d'une couche $\lambda/4$ de ZnSe et des trièdres réfléchissants. Les faisceaux tombent sur les trièdres excentriquement et sont renvoyés en sens inverse selon la même direction avec un déplacement latéral un peu supérieur au diamètre du faisceau, de sorte que les deux faisceaux sortants sont tous deux utilisables. Ces deux faisceaux tombent sur les deux faces réfléchissantes d'un modulateur tournant, qui se comporte comme l'analogie optique d'un interrupteur inverseur, puis sur deux cellules au sulfure de plomb montées en opposition ; on mesure ainsi la quantité d'énergie transférée par les interférences d'un faisceau sur l'autre. L'un des trièdres possède des réglages micrométriques selon les trois coordonnées et l'autre est déplaçable au moyen d'une vis micrométrique et d'un levier à deux étages donnant un rapport de réduction de 100 fois. La vitesse de déplacement normale est de 60λ en 10 minutes. Au cours d'observations préliminaires une douzaine d'étoiles allant jusqu'aux magnitudes visuelles 4 ou 5 ont été mesurées avec un pouvoir de résolution de l'ordre de 60. Les transformations de Fourier ont été faites numériquement sur des bandes de Lipsom-Beevers. On montre quelques-uns des spectres obtenus.

Abstract. — The interferometer has been built for use at the coude focus of the 36 in reflecting telescope of the Cambridge University Observatories. The beam-splitter is a $\lambda/4$ layer of ZnSe on a fluorite substrate and the mirrors are replaced by cube-corner reflectors ; the beams enter the reflectors off-centre, and are returned along the reverse direction but with a lateral shift of just over the diameter of each beam, thus the two output beams are both accessible. These two beams are focussed into a double-sided reflecting chopper which acts as the optical analogue of a double-pole reversing switch. The two chopped beams fall on two PbS detectors, the combined outputs of which measure the amount of energy transferred by interference from one of the output beams of the interferometer to the other.

One cube-corner has micrometer adjustments in three coordinates and the second cube-corner is driven in path-difference by a massive 100 : 1 two-stage lever and a micrometer. Normally a driving speed of 60λ in 10 minutes is used.

In preliminary observations, some dozen stars down to fourth or fifth visual magnitude have been measured with a resolving power of about 60. The Fourier transforms have been carried out numerically on Lipsom-Beevers strips ; some of the obtained spectra are shown.

L'interféromètre qui va être décrit ici a été construit pour être employé au foyer coudé du télescope de 90 cm des Cambridge University Observatories. La théorie de l'instrument a été discutée dans ma première communication présentée au Colloque. En 1950 l'expérience suivante a été réalisée, en laboratoire, comme vérification préliminaire de la théorie. La lumière de la lampe L (fig. 1) est concentrée par le miroir M_1 en un point

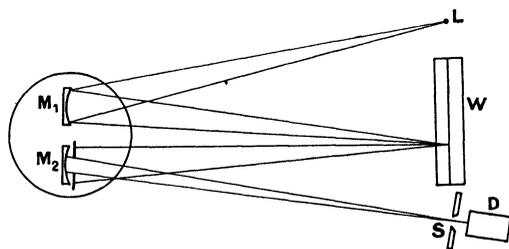


FIG. 1.

du coin d'air W formé par deux lames de verre planes. Ces lames ne sont pas argentées afin d'éviter autant que possible les réflexions multiples. Le miroir M_2 , dont l'ouverture est diaphragmée, focalise de nouveau le rayonnement

réfléchi par la lame d'air sur une fente S derrière laquelle est le détecteur D. La rotation de M_1 et M_2 fait balayer le coin W par l'image de L formée par M_1 . Après la deuxième réflexion sur M_2 on obtient une image stationnaire de L sur S, et les franges formées par le coin se déplacent à travers cette seconde image pendant que le support de M_1 et M_2 tourne. On mesure l'intensité en D en fonction de la différence de marche, qui est étalonnée en utilisant la lumière du sodium.

La figure 2 montre l'intensité mesurée de cette façon, ainsi que sa transformée de Fourier comparée avec le spectre de la source enregistrée par un spectromètre classique ; l'accord est satisfaisant. On a obtenu confirmation de l'augmentation attendue de sensibilité et une expérience analogue avec une source à mercure a confirmé la formule donnant le pouvoir de résolution.

L'appareil définitif a été récemment terminé. La figure 3 montre le principe du fonctionnement ; en réalité la disposition des faisceaux lumineux est à trois dimensions de sorte qu'il n'est pas facile de la présenter sur une figure. Le faisceau incident de lumière parallèle est partiellement réfléchi et partiellement transmis vers deux trièdres trirectangles

réfléchissants par une lame séparatrice. Les faisceaux pénètrent dans chaque trièdre en dehors de leur centre et sont renvoyés selon la même direction dans le sens opposé, avec un déplacement latéral un peu supérieur au diamètre de chaque faisceau. De cette façon la portion de la surface

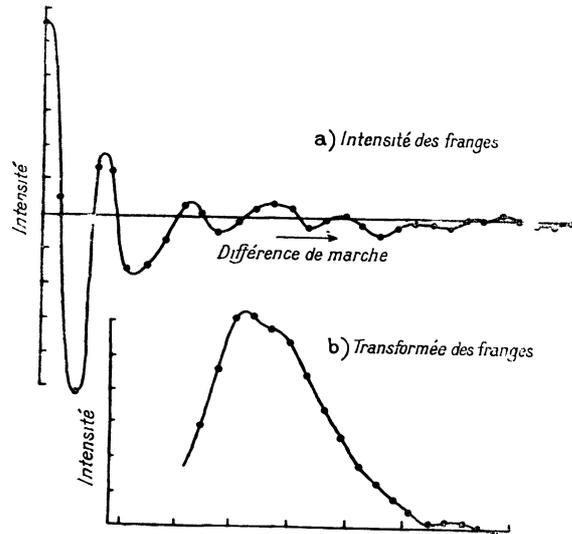


FIG. 2.

de la lame sur laquelle le mélange des deux faisceaux a lieu est séparée de celle sur laquelle se produit la division d'amplitude. Ceci est utilisé de deux façons différentes. La couche semi-réfléchissante est placée sur une face de la lame là où elle agit comme séparatrice, et sur l'autre là où elle est mélangeuse, de sorte que le retard et la dispersion dans la lame sont automatiquement annulés et qu'aucune lame compensatrice n'est nécessaire. De plus les deux faisceaux de sortie issus du mélange sont accessibles. On oublie quelquefois que tout interféromètre non absorbant donne naissance à deux faisceaux de sortie qui transportent entre eux la même quantité d'énergie que le faisceau entrant. Dans un interféromètre de Michelson l'un de ces faisceaux est dissimulé, et rendu inaccessible, parce qu'il retourne à la source selon un trajet qui coïncide avec celui du faisceau entrant. Dans l'appareil décrit ici les deux faisceaux sont focalisés sur le détecteur, dont la réponse correspond

ainsi à la différence de leurs énergies. On change la différence de marche en déplaçant l'un des trièdres au moyen d'un moteur synchrone relié par une boîte de vitesse à une vis micrométrique, qui déplace à son tour un levier massif dont le rapport de réduction est de 1/100. Le trièdre est placé sur une monture massive à ressorts parallèles, analogue à celle qui a été analysée par le Pr R. V. Jones.

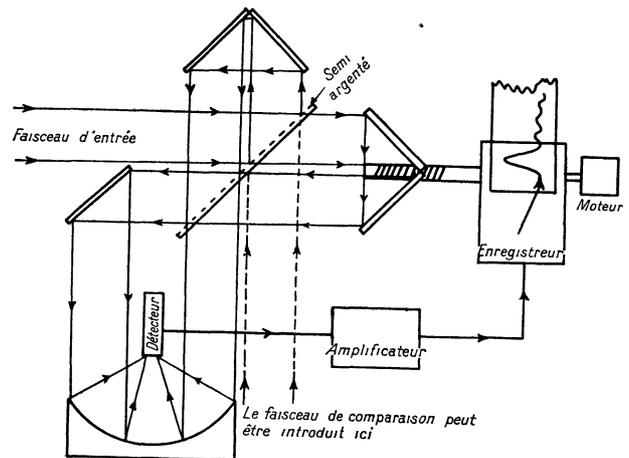


FIG. 3.

L'autre trièdre possède des réglages selon les trois coordonnées. Ceci permet d'obtenir la différence de marche zéro en une position convenable et permet aussi de placer les centres des deux trièdres en une position telle vis-à-vis des faisceaux incidents, que les interférences se produisent sans déplacement transversal des surfaces d'ondes. Ceci est nécessaire ; à défaut de cette condition l'instrument se comporterait comme l'interféromètre décrit par le Dr H. Hopkins et donnerait des figures d'interférences fonction des aberrations du système collimateur qui, en astronomie, comprend l'atmosphère. Avec la disposition que nous venons de décrire, l'interféromètre comprend trois pièces principales, les deux trièdres et la lame séparatrice ; chacune doit être travaillée à mieux qu'une longueur d'onde près, mais leur position relative n'a pas à être réglée avec une précision interférentielle. En particulier, les trièdres sont insensibles à une rotation. Ce montage a fonctionné de façon satisfaisante mais il semble, maintenant, que les interférences pourraient être obtenues au moyen d'un montage optique plus simple sans perdre aucun point essentiel.

On vérifie facilement que le rendement en énergie de la lame séparatrice vaut $4TR$, R et T étant respectivement les coefficients de réflexion et de transmission de l'intensité lumineuse. Pour une lame séparatrice parfaite on aurait

$$T = R = 0,5$$

et ceci pour les deux directions de polarisation

séparément. En pratique, le rendement reste élevé avec d'assez larges écarts à cette condition, pourvu que $T + R = 1$. Il y a encore une raison qui rend souhaitable une absorption aussi faible que possible : la théorie a été faite en supposant une perte de phase de 0 ou π lors des deux réflexions ou transmissions partielles. S'il y a absorption il devient énergétiquement possible qu'un changement de phase différent se produise, et par conséquent que la phase des interférences soit modifiée. Nous utilisons actuellement une couche $\lambda/4$ de sélénure de zinc déposée sur une base de cryolithe. Cette couche a été suggérée, puis exécutée par MM. Barr and Stroud, de Glasgow, et nous leur sommes très reconnaissants de leur aide. Des expériences précédentes avec des couches métalliques avaient montré que celles d'aluminium étaient parmi les meilleures, mais d'un rendement encore nettement inférieur, et sujettes à une perte de phase assez grande.

L'appareil est actuellement utilisé avec des détecteurs au sulfure de plomb dans la région de 1 à 3 microns. Le montage optique ne comprend que des réflexions, excepté dans la lame séparatrice elle-même, de sorte qu'il devrait être possible d'utiliser des cellules au tellure de plomb, au sélénure de plomb ou à l'antimoniure d'indium. L'extension à la région thermique, pour des études planétaires serait possible si l'on pouvait trouver le moyen de conserver une lame séparatrice de sel

gemme dans l'atmosphère d'une coupole astronomique.

L'utilisation d'un détecteur à sulfure de plomb exige que le signal soit modulé à une fréquence de quelques centaines de cycles par seconde afin d'obtenir le meilleur rapport signal sur bruit. En conséquence les deux faisceaux sortants, au lieu d'être envoyés directement sur le récepteur comme sur la figure 3, tombent ensemble sur les côtés opposés d'un disque modulateur réfléchissant sur les deux faces. Lorsque les deux faisceaux rencontrent un secteur réfléchissant du disque, ils sont renvoyés vers le détecteur ; lorsqu'ils rencontrent une ouverture du disque, ils le traversent et atteignent le détecteur de façon à produire un signal de signe contraire. Le détecteur comporte deux cellules au sulfure de plomb, de surface 1 mm^2 environ, et chacun des faisceaux sortant est toujours observé par l'une ou l'autre des cellules de sorte qu'il n'y a pas de temps mort. Chaque cellule est enfermée dans une cavité qui peut être refroidie et est reliée à un préamplificateur et à une source de tension continue à travers une résistance de charge de 10 à 50 M Ω . Le préamplificateur est à courant continu, ce qui permet de l'employer comme ohmètre à lampe pendant le réglage initial du montage optique en utilisant relativement beaucoup de lumière. Il est également très commode pour suivre les variations de température de la cellule. L'amplificateur principal comporte une

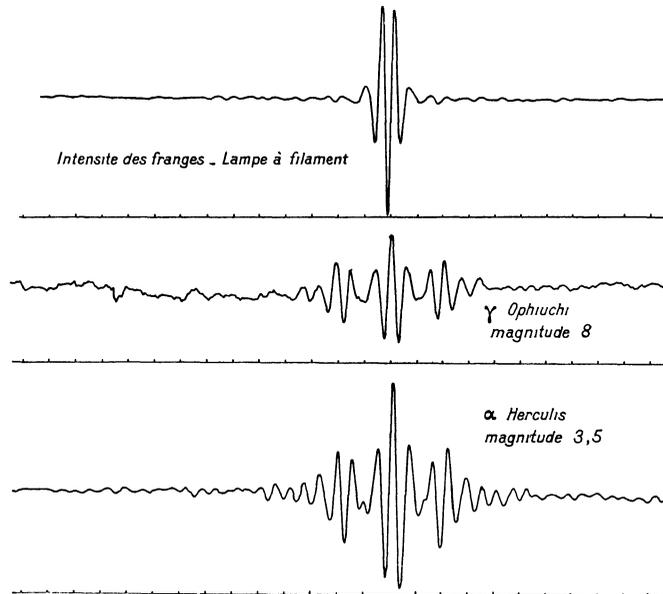


FIG. 4.

forte réaction à travers un réseau en T parallèle qui est réglé pour donner normalement une largeur de bande de quelques cycles par seconde à une fréquence de quelques centaines de cycles par seconde. Grâce à la réaction il se comporte comme

une source à impédance élevée, donc à courant constant. La sortie est envoyée à un redresseur synchrone diamod relié à un amplificateur à courant continu à terre virtuelle. Celui-ci à son tour alimente un filtre à plusieurs étages qui donne des

constantes de temps allant jusqu'à 30 s (on peut obtenir jusqu'à 240 s). Finalement le filtre est relié à travers des cathodes followers à un enregistreur potentiométrique à plume avec entraînement du papier par moteur synchrone. Lors des premières expériences la transformation de Fourier de l'enregistrement du potentiomètre était accomplie en utilisant les bandes de Lipsom-Beevers. La vitesse de déplacement était de 60λ en 10 minutes, et la largeur de bande finale pour un élément spectral après la transformation numérique était environ de 0,0008 cycles par seconde.

La figure 4 montre des enregistrements de l'intensité des franges obtenues avec des étoiles jusqu'à la 8^e magnitude, et la figure 5 montre 2 spectres

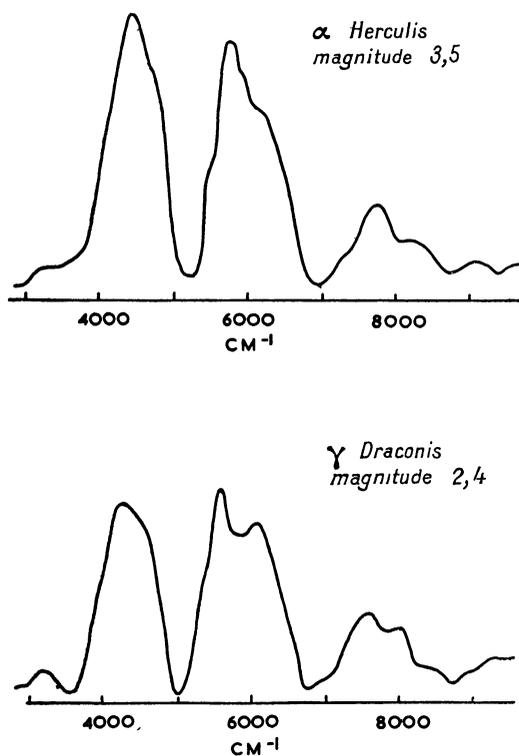


FIG. 5.

obtenus par transformation de l'intensité des franges. Une caractéristique qui impressionne considérablement l'observateur est l'énorme différence entre les rapports de luminosité existant dans le visible et dans l'infra-rouge. Par exemple χ Ophiuci (magnitude 8) est aussi brillante à 2μ que Véga (magnitude 0) !

Il y a trois défauts principaux dans les spectres obtenus jusqu'ici :

a) Ils sont fortement marqués par l'absorption de la vapeur d'eau. La seule chose à faire pour y remédier est d'attendre l'hiver.

b) La sensibilité s'est trouvée être supérieure à ce que nous attendions, spécialement pour les étoiles très rouges, et en conséquence les dispositifs de

guidage simplifiés qui avaient été construits se sont trouvés insuffisants. En fait une bonne partie du bruit vu sur les enregistrements de la figure 4 est due à un mauvais guidage. Le remède est évident.

c) La liaison assez indirecte qui existe entre l'enregistreur à plume et la commande de l'interféromètre ne s'est pas montrée assez précise. En conséquence la relation de phase correcte entre les signaux dus aux différents éléments spectraux est maintenue seulement pendant une durée limitée tandis que la différence de marche augmente à partir de la valeur 0. Cet effet est celui qui limite la résolution obtenue jusqu'ici. On avait eu l'intention à l'origine, de contrôler la différence de marche en utilisant les franges de la lumière du sodium, et l'on pense maintenant revenir à ce procédé.

DISCUSSIONS

P. Jacquinot. — Le gain de luminosité que vous obtenez en utilisant les deux faisceaux émergents semble illusoire, puisqu'il vous amène à n'utiliser que la moitié de l'ouverture de votre interféromètre.

P. Fellgett. — Ce serait vrai dans le cas d'une source étendue, mais je dois travailler avec des faisceaux d'origine stellaire, d'étendue limitée. Par contre, il est nécessaire d'utiliser un système à deux faisceaux pour compenser (au premier ordre) les variations d'intensité, y compris la scintillation, et les variations d'amplification.

J. Terrien. — Quelle est la qualité optique des miroirs trièdres que l'on peut obtenir ?

P. Fellgett. — Ils sont composés de glaces assemblées, réglées par de simples vis. Ceci est suffisant dans l'infra-rouge.

E. Ingelstam. — Est-ce que le montage n'est pas sensible aux variations de température ?

P. Fellgett. — Les différentes parties (miroirs trièdres, lames séparatrices) doivent être de qualité interférométriques, mais l'ensemble du montage ne nécessite pas une précision extraordinaire.

H. A. Gebbie. — Je signale que l'on commence à trouver aux États-Unis du fluorure de baryum, utilisable dans toute la région de transmission atmosphérique, en disques allant jusqu'à 9 cm de diamètre.

J. Ring. — Si la méthode par transformation de Fourier est utilisée dans l'infra-rouge, il serait avantageux d'employer un filtre interférentiel, pour limiter le domaine spectral. En plaçant ce filtre dans l'enceinte refroidie qui entoure la cellule, on réduit également le bruit dû aux échanges de rayonnement avec le milieu environnant.