

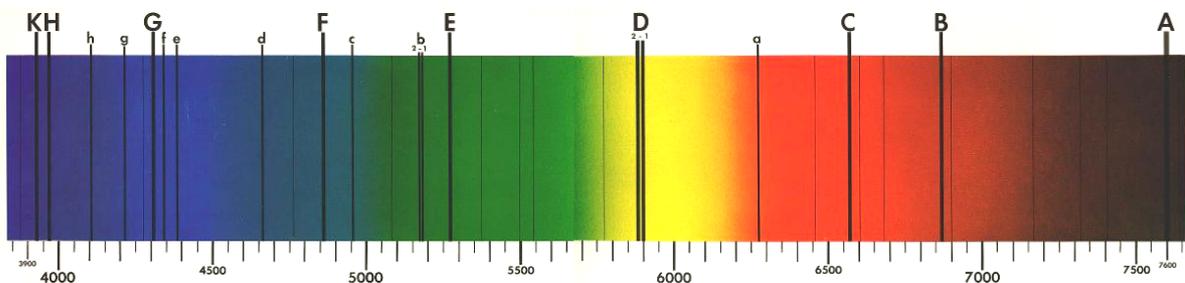
Les secrets de l'observation du Soleil en H-alpha

Depuis quelques années, les astronomes amateurs – dont ceux de la brillante équipe qui anime nos Diurnes – peuvent, comme des « pros », observer l'Astre du jour « en H-alpha ». La région du Soleil qui se révèle à cette longueur d'onde est la *chromosphère*¹, partie basse de ce qu'on peut appeler l'atmosphère solaire ; la température y est de plusieurs milliers de degrés et la pression y est très basse. Dans ces conditions, les atomes d'hydrogène absorbent et émettent continuellement des photons à des fréquences caractéristiques de cet élément, dont celle de la fameuse raie rouge H α – une des raies de la série de Balmer, de longueur d'onde égale à 656,3 nanomètres. La chromosphère peut être vue à l'œil nu lors des éclipses totales – c'est la mince couche de couleur rougeâtre qui entoure la partie du Soleil occultée par la Lune. Cette couleur – qui est aussi celle des protubérances qui se révèlent lors d'une éclipse – est essentiellement celle de la raie H α .

Le spectre du Soleil

Les raies du spectre solaire ont été découvertes par un opticien de génie, Joseph von Fraunhofer, en 1814, à l'aide d'un instrument de son invention, le spectroscope. Fraunhofer dénombra dans le spectre de notre étoile 574 raies sombres ; il attribua des lettres aux plus importantes, et une partie de sa nomenclature a survécu jusqu'aujourd'hui – tout comme le nom de « raies de Fraunhofer » qu'on donne encore aux raies solaires. Il faudra attendre 1859 pour que Kirchhoff et Bunsen remarquent que certaines de ces raies correspondaient à des éléments connus sur Terre – ce qui ouvrait la voie à l'analyse de la composition chimique de l'atmosphère solaire, un problème considéré jusque là comme insoluble. Ce n'est qu'avec l'avènement de la Mécanique quantique que l'origine microscopique de ces raies sera enfin comprise.

Parmi les raies les plus célèbres, retenons les quatre premières raies de l'hydrogène de la série de Balmer H α , H β , H γ et H δ , notées respectivement C, F, f et h par Fraunhofer ; la double raie D du sodium ; les raies E, c, d et e du fer ; et les raies H et K du calcium.



Les principales raies de Fraunhofer dans le spectre solaire ; l'échelle inférieure est graduée en angströms (10⁻¹⁰m). En-dessous d'environ 4 000 Å commence l'ultraviolet ; au-delà de 7 500 Å débute l'infrarouge.

¹ Pour un rappel schématisé de la structure des différentes couches qui constituent le Soleil, voir : *Le Soleil en deux mots...*, Galaxée n°52, p. 30.

La chromosphère surplombe la *photosphère*, région d'où provient l'essentiel de la lumière solaire que nous recevons. La photosphère a une température de 5 800 K, et la pression qui y règne est beaucoup plus élevée que dans la chromosphère ; dans ces conditions les atomes d'hydrogène interagissent constamment les uns avec les autres, et la lumière émise ne l'est plus à des fréquences précises : elle est caractérisée par un spectre continu – dans le domaine visible, on y trouve toutes les couleurs de l'arc-en-ciel – c'est le fameux rayonnement dit du *corps noir*.

Pour pouvoir observer la chromosphère, qui émet beaucoup moins de lumière que la photosphère, il faut d'abord se débarrasser de l'éblouissante lumière de cette dernière. Si on tente d'utiliser à cet effet un filtre ordinaire, non sélectif – par exemple un filtre en mylar aluminisé –, on va bien entendu réduire l'intensité lumineuse dans de fortes proportions, mais malheureusement à toutes les longueurs d'onde, et donc aussi à la longueur d'onde de la raie H-alpha, qui restera inobservable. Il faut donc trouver un moyen de diminuer l'intensité de la lumière, *sauf* à la longueur d'onde correspondant à la raie H-alpha. Cette mission délicate est confiée à un filtre interférentiel de type *Fabry-Pérot*.

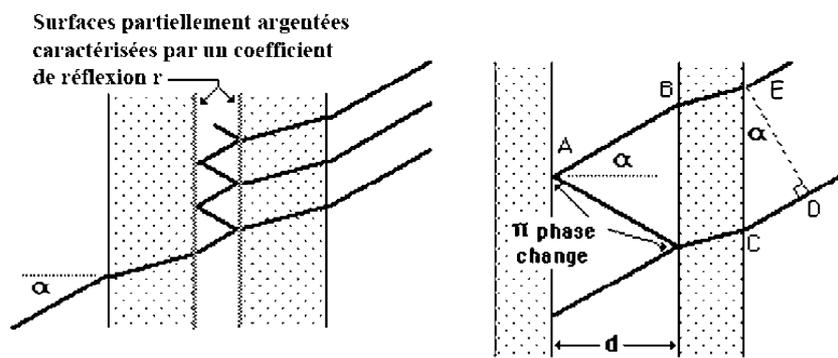
L'interféromètre de Fabry-Pérot

L'interféromètre de Fabry-Pérot constitue le cœur des instruments permettant d'observer le Soleil en H-alpha. Comme son nom l'indique, son fonctionnement est basé sur l'exploitation du phénomène d'interférences lumineuses.

L'interféromètre de Fabry-Pérot est essentiellement constitué de deux lames parallèles revêtues d'une couche de matériau très réfléchissant (*a* figure ci-dessus). Un rayon lumineux tombant sur la première lame subit donc une série de transmissions et de réflexions.

Il est facile, en faisant appel à des formules de trigonométrie élémentaire, de calculer la différence de phase entre deux rayons adjacents. La deuxième partie de la figure ci-dessous montre que la différence de trajet entre le premier rayon, qui émerge en *CD*, et le second rayon, qui émerge en *E*, est égale à deux fois la distance *AB*, qui vaut $d / \cos a$, moins la distance *CD*, c'est-à-dire, tous calculs

faits, à $2d \cos a$, où α est l'angle d'incidence et où d désigne l'épaisseur de la lame². L'intensité transmise sera maximale si cette différence est égale à un multiple de la longueur d'onde, soit :

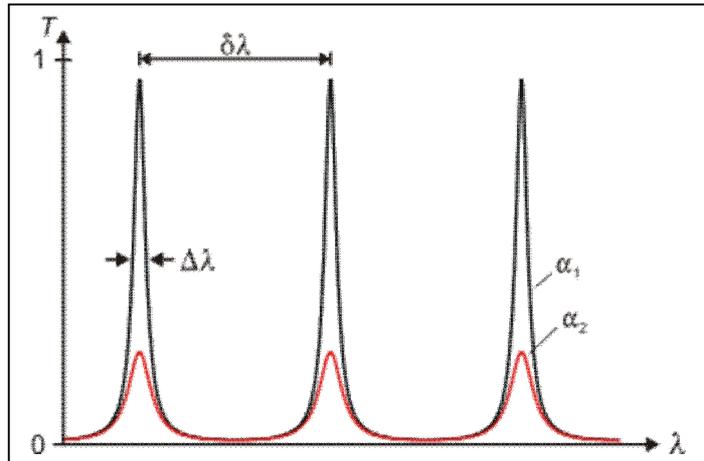


$$2d \cos a = ml, \tag{1}$$

² Pour les puristes : chaque réflexion introduit un déphasage de π ; mais comme il y a *deux* réflexions supplémentaires quand on passe d'un rayon au suivant, cet effet peut être ignoré dans le calcul.

où m est un entier. En particulier, dans le cas d'une incidence normale ($\alpha = 0$), la condition d'interférence constructive se réduit à $2d = m\lambda$.

Si par contre cette condition n'est *pas* satisfaite, les différents rayons transmis sont déphasés les uns par rapport aux autres et interfèrent destructivement ; et s'il y a un grand nombre de réflexions, l'intensité transmise reste très faible.



La figure ci-contre montre schématiquement l'évolution du coefficient de transmission du dispositif en fonction de la longueur d'onde ; on voit qu'il y a plusieurs longueurs d'onde transmises, correspondant aux différentes valeurs que peut prendre l'entier m dans la formule (1). Plus le revêtement des lames de l'appareil est réfléchissant, plus le nombre de réflexions contribuant au faisceau transmis est élevé, et plus la *finesse* de l'instrument, mesurée par le rapport $dI / \Delta I$ de la différence entre deux longueurs d'onde adjacentes transmises à la largeur des pics

transmis, est élevée. Les meilleurs filtres accessibles aux amateurs, comme le *Coronado Solarmax 90* , ont une bande passante inférieure au dixième de nanomètre !



Le filtre Coronado Solarmax 90.

Pour atteindre ces performances, les faces en verre du filtre doivent être d'une planéité parfaite ; la précision des filtres *Coronado* par exemple est de l'ordre du *centième* de la longueur d'onde de la lumière³, soit environ cinq *millièmes de micron* ! Il faut de plus que ces caractéristiques idéales ne soient pas altérées par les variations de température.

Il va sans dire que plus le filtre a un diamètre important et plus il est difficile d'obtenir cette précision sur toute sa surface ;

ceci explique la progression exponentielle du prix des filtres interférentiels avec le diamètre. Ainsi, si un filtre *Coronado Solarmax* de 40 millimètres coûte, avec ses accessoires, environ 1 500 euros, le prix passe à 3 500 euros pour un diamètre de 60 mm, et à 7 800 euros pour un diamètre de 90 mm ; quant au filtre mythique de 140 mm, qui n'est à notre connaissance pas encore importé en Belgique, son prix est voisin de... 18 000 euros ! Il faut noter que certains fondus de

³ ... c'est-à-dire bien meilleure que celle d'un très bon miroir de télescope taillé à $\lambda/10$!

l'observation solaire n'hésitent pas à coupler deux filtres de même diamètre afin d'obtenir une meilleure résolution...

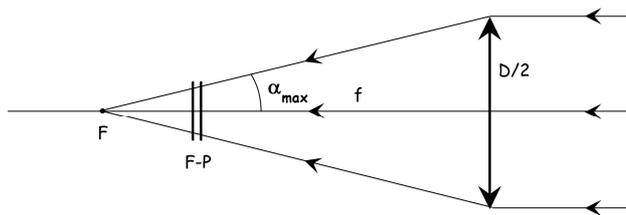
Le filtre bloquant

Pour pouvoir utiliser ce type de filtre pour l'observation en H-alpha, il faut bien entendu qu'une des longueurs d'onde sélectionnées par le filtre coïncide avec la longueur d'onde de la raie H α de l'hydrogène, soit 656,3 nanomètres. Mais ce n'est pas tout : il faut aussi éliminer les pics correspondant aux autres longueurs d'onde transmises ! On utilise à cet effet un **filtre bloquant**, qui ne laisse passer que les longueurs d'onde voisines de celle de la raie H α . Alors que le filtre interférentiel est placé devant l'objectif (la plupart du temps, d'une lunette), le filtre bloquant est généralement placé au niveau de l'oculaire.

Les contraintes sur le filtre bloquant sont moins sévères : il ne doit pas être aussi sélectif puisque l'essentiel du travail a déjà été accompli par le filtre interférentiel ; ce n'est donc pas la partie la plus coûteuse du dispositif.



Filtres bloquants Coronado (à gauche le bf30 qui, contrairement aux autres modèles, n'est pas inséré dans un renvoi coudé).



Dessin schématique d'une lunette de diamètre D dans laquelle on aurait placé l'interféromètre de Fabry-Perot (F-P) devant l'oculaire : les rayons périphériques abordent l'interféromètre sous un angle α_{max} (F : foyer ; f : distance focale).

diamètre, bien moins coûteux... Ce n'est pas si simple : en effet, après avoir traversé l'objectif, le faisceau lumineux n'est plus parallèle, mais il est devenu convergent ; si l'interféromètre est placé devant l'oculaire, les différents rayons qui composent le faisceau vont donc attaquer sa face avant avec des angles d'incidence différents, et les longueurs d'onde sélectionnées à différentes distances de l'axe optique seront donc différentes. Un calcul élémentaire montre que, si les rayons axiaux ont une incidence normale, les rayons périphériques tomberont sur la face avant de l'interféromètre avec un angle d'incidence α_{max} donné en radians par la formule :

$$a_{max} = \frac{D}{2f} \quad (2)$$

On peut se demander pourquoi on n'inverse pas les rôles de l'interféromètre de Fabry-Perot et du filtre bloquant : le diamètre du faisceau au niveau de l'oculaire est en effet nettement plus petit que celui de l'objectif, et cette solution nécessiterait un interféromètre de plus petit

où D est le diamètre de l'objectif et f la distance focale de l'instrument. Pour fixer les idées, pour $D = 90$ mm et $f = 1\,000$ mm, on obtient $\alpha = 0,045$ radian = 2,5 degrés ; et la formule (1) révèle que la différence des longueurs d'onde sélectionnées par l'interféromètre au niveau des rayons centraux et des rayons périphériques atteint près de 0,7 nanomètre, soit dix fois la résolution initiale de l'instrument, qui, rappelons-le, est inférieure au dixième de nanomètre ! Notons cependant que cette solution est envisageable si le rapport f/D de l'instrument utilisé est très grand (par exemple supérieur à 30). Une autre possibilité consiste à interposer entre l'objectif et l'interféromètre un système optique qui rend le faisceau parallèle... c'est la technique mise en œuvre dans le désormais célèbre Coronado PST.

Le « petit » Coronado PST

Les prix des filtres *Coronado Solarmax* donnés plus haut pourraient décourager l'astronome amateur moyen, dont les possibilités financières sont rarement illimitées – et ce d'autant plus que ces merveilleux dispositifs sont souvent associés à une lunette de qualité.

Cependant, la firme même commercialise, depuis quelques années maintenant, un remarquable petit instrument « tout en un », le *Coronado PST* – l'acronyme PST signifiant *Personal Solar Telescope*... tout un programme ! Son prix est beaucoup plus démocratique : on le trouve actuellement à moins de 700 Euros. Avec son diamètre de 40 mm, il est moins performant que ses grands frères de la série *Solarmax*, mais il réserve cependant de très belles émotions ! En particulier il fournit des images spectaculaires des protubérances solaires.

Notre cercle a la chance de posséder un de ces petits bijoux... que vous pouvez retrouver, lors de nos Diurnes, en compagnie d'instruments plus imposants équipés de filtres Coronado de 60 ou 90 millimètres...

Quelques raffinements...

La dépendance de la longueur d'onde fournie par l'interféromètre de Fabry-Pérot en l'angle d'incidence du faisceau incident peut être mise à profit. En principe, les faces de l'interféromètre – dans la version classique où l'interféromètre est placé devant l'objectif – sont à peu près perpendiculaires au faisceau incident ($a \approx 0$, $\cos a \approx 1$). Cependant, si on modifie légèrement cet angle, la longueur d'onde sélectionnée sera, comme le montre l'équation (1), légèrement altérée.

L'intérêt d'une telle manœuvre ? Certains éléments de la surface solaire – par exemple les éjections de masse coronales – se déplacent rapidement, et à cause de l'effet Doppler, la longueur d'onde de la lumière qu'ils émettent diffère un peu de celle émise par la même matière au repos. En particulier, si de l'hydrogène de la chromosphère s'approche de nous, la longueur d'onde de la raie H-alpha qu'il émet est légèrement plus petite que 656,3 nanomètres. La modification de



Bagues de réglage de différents diamètres permettant d'optimiser la longueur d'onde sélectionnée par les interféromètres de Fabry-Pérot (Coronado).

l'inclinaison de l'interféromètre permet donc de mieux observer ces régions turbulentes. Les filtres interférentiels Coronado peuvent être montés sur une bague équipée d'une molette de réglage (le nom commercial du dispositif est « Tune-Max »).

L'appétit vient en mangeant...

La raie H_{α} de l'hydrogène est l'une des plus célèbres du spectre du Soleil, mais ce n'est pas la seule ! Fraunhofer avait, dès 1814, identifié une belle raie dans la partie violette du spectre, qu'il avait baptisée « raie K ». Nous savons aujourd'hui que cette raie, dont la longueur d'onde est de 393,4 nm, est produite par le calcium ionisé une fois⁴ – que les spectroscopistes notent Ca II. L'intérêt de l'observation à cette longueur d'onde est qu'elle révèle des régions de la chromosphère plus profondes et plus froides que celles auxquelles on a accès en H-alpha, et donc des détails différents.

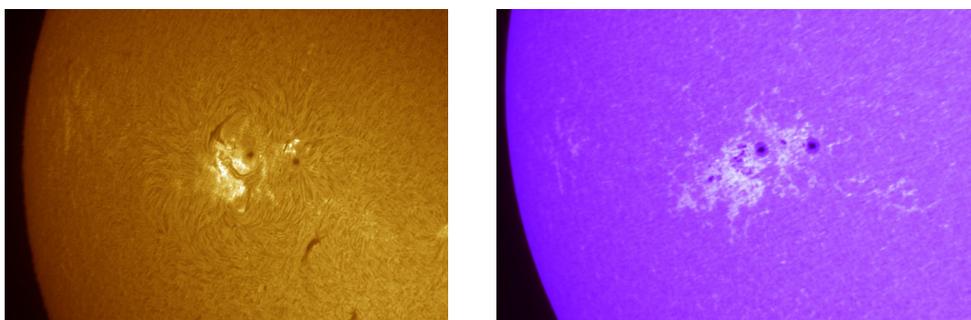
Le seul bémol concerne la couleur dans laquelle on observe le Soleil en Ca K. En effet, l'œil humain devient de moins en moins sensible à la lumière quand on se rapproche de l'ultraviolet (à la longueur d'onde de la raie Ca K, on y est presque !). C'est donc la photographie ou la webcam qui permettront d'exploiter au mieux les performances de l'instrument.



Le PST Ca K flambant neuf d'Olympus Mons !

Je termine par une bonne nouvelle : quand vous lirez ces lignes, votre cercle d'astronomie favori sera devenu l'heureux propriétaire de son propre *Coronado Ca K*... une raison de plus pour fréquenter nos Diurnes !

Francis Michel (UMH)



Un même groupe de taches solaires observées en H-alpha (gauche) et en Ca K (droite).

⁴ Le calcium neutre possède 20 électrons, dont 2 électrons périphériques ; le calcium ionisé une fois n'en possède donc plus que 19.