Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Herausgeber: Schweizerische Astronomische Gesellschaft
Band: 63 (2005)
Heft: 326

Artikel: Colorimétrie et imagerie CCD en couleur
Autor: Falco, Pierik
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-897736

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Colorimétrie et imagerie CCD en couleur

PIERIK FALCO

Cet article décrit le travail effectué à l'Institut de Physique de l'Université de Neuchâtel (IPH) en collaboration avec la Société Neuchâteloise d'Astronomie (SNA). Le but était de créer une image couleur à partir d'une caméra CCD noir et blanc en utilisant des filtres colorés rouge, vert et bleu, c'est-à-dire de déterminer les temps d'expositions relatifs nécessaires à chacun des trois filtres afin de reconstruire une image couleur la plus proche de la réalité. Il est rapidement apparu qu'il serait impossible de reproduire parfaitement les couleurs à l'aide des filtres utilisés sur la caméra. Il a alors été déterminé dans quelle mesure la reproduction de la couleur d'un objet dépend de la source lumineuse. Cette notion est liée à la définition de la couleur blanche, qui est fonction de la source lumineuse. Dans le cas d'une cible astronomique, il serait nécessaire d'en connaître préalablement ses propriétés lumineuses, notamment son spectre d'émission, afin de reproduire le plus fidèlement possible ses couleurs.
Dans tous les cas et pour les filtres RGB considérés, le meilleur résultat semble être obtenu en considérant un spectre d'émission uniforme. Il donne des facteurs d'exposition relatifs de 1 pour le filtre rouge, 0.9 pour le vert et 1.35 pour le bleu.

1. Introduction à la colorimétrie

Le capteur d'une caméra CCD consiste en une matrice de photodétecteurs à semi-conducteur en silicium. Par effet quantique, lorsque les photodétecteurs (pixels) absorbent un photon, un électron va être émis dans le matériau. Les électrons générés sont alors détectés sous forme de courant électrique, ou accumulés dans un condensateur puis mesurés par la charge électrique.

Caractérisation photométrique d'un détecteur.

Un photodétecteur crée un courant électrique lorsqu'il reçoit un flux lumineux. Idéalement, un électron devrait être généré pour chaque photon reçu. Ce n'est en réalité pas le cas. On définit alors le rendement quantique par le rapport entre le nombre d'électrons créés et le nombre de photons incidents. Ce rendement dépend de la longueur d'onde des photons.

$$R = \frac{n_{él}}{n_{ph}}$$

La notion de sensibilité spectrale est cependant plus pratique pour l'utilisateur de la caméra. Elle est définie par le rapport entre le courant électrique généré et le flux optique incident.

Le courant électrique est donné par le nombre d'électrons produits par seconde $n_{él}$ multiplié par leur charge:

$$I = n_{él} \cdot e$$

Le flux optique quant à lui est égal au nombre de photons incidents par seconde n_{ph} multiplié par l'énergie du photon:

$$\phi_{op} = n_{ph} \cdot h\nu = n_{ph} \cdot h\frac{c}{\lambda}$$

La sensibilité spectrale est alors donnée par la relation:

$$S(\lambda) = \frac{I}{\phi_{op}} = \frac{n_{él}}{n_{ph}} \cdot \frac{\lambda}{\frac{hc}{e}}$$

Le rapport

$$\frac{n_{él}}{n_{ph}}$$

n'est autre que le rendement quantique R et la valeur

$$\frac{hc}{e}$$

est une constante qui vaut 1.24 si λ est exprimé en mm. On obtient alors la formulation finale de la sensibilité spectrale:

$$S(\lambda) = \frac{\lambda \cdot R}{1.24} \quad [S] = A/W.$$

Système RGB:

La perception colorée de l'œil est basée sur trois types de cônes différenciés représentés selon les trois spectres de sensibilités spectrales. Une base de spectres trichromatiques a ainsi été établie pour permettre l'analyse des couleurs. Une contrainte est que leur superposition dans un rapport bien défini donne une sensation de blanc. En 1931, un choix a été fait et a donné lieu à la norme CIE 1931 [1]. Leurs maximums se trouvent dans le rouge, vers 600 nm, dans le vert, vers 550 nm, et dans le bleu, vers 450 nm. Ces spectres, notés R(λ), G(λ) et B(λ), sont représentés sur la figure ci-dessous par les courbes respectivement rouge, verte et bleue:

Une source caractérisée par un spectre I(λ) est donc définie par ses coefficients colorimétriques R, G et B donnés par les intégrales :

$$R = \int I(\lambda)R(\lambda)d\lambda$$

$$G = \int I(\lambda)G(\lambda)d\lambda$$

$$B = \int I(\lambda)B(\lambda)d\lambda .$$

Leur somme R + G + B donnant l'intensité totale, on peut normaliser ces valeurs pour obtenir les grandeurs colorimétriques pures (ou coefficients trichromatiques):

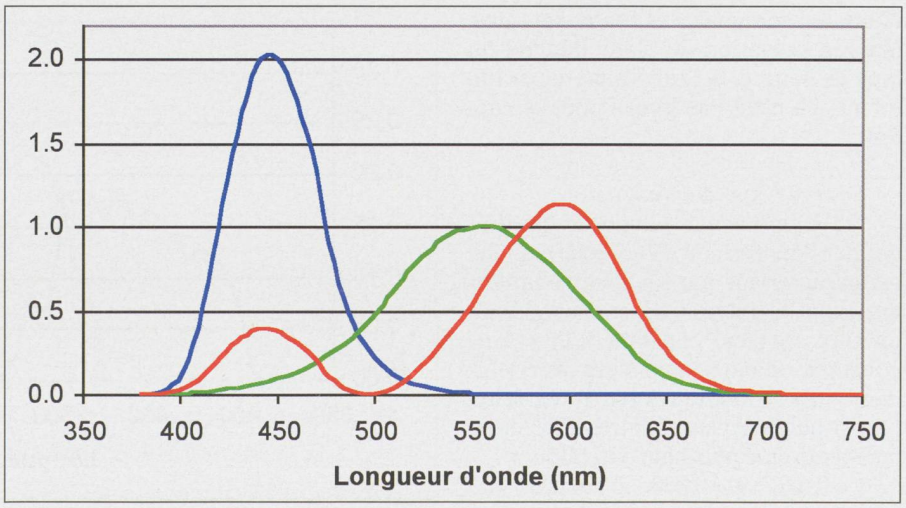
$$r = \frac{R}{R+G+B},$$

$$g = \frac{G}{R+G+B},$$

$$b = \frac{B}{R+G+B},$$

avec la relation évidente
r + g + b = 1.

Fig. 1. Spectres de base pour l'analyse trichromatique.



2. Application à la reproduction des couleurs

La caméra utilisée était le modèle ST7, dotée d'un CCD KODAK KAF-0401E, du fournisseur SBIG munie d'une roue à filtre du même fournisseur.

Rendement quantique et sensibilité spectrale du capteur KODAK KAF-0401E:

Le rendement quantique est considéré dans la plage 380 et 750 nm car la sensibilité spectrale de l'œil n'est significative que dans cet intervalle.

A partir du rendement quantique du capteur, fourni par le constructeur, on peut déterminer la sensibilité spectrale par la relation exprimée précédemment.

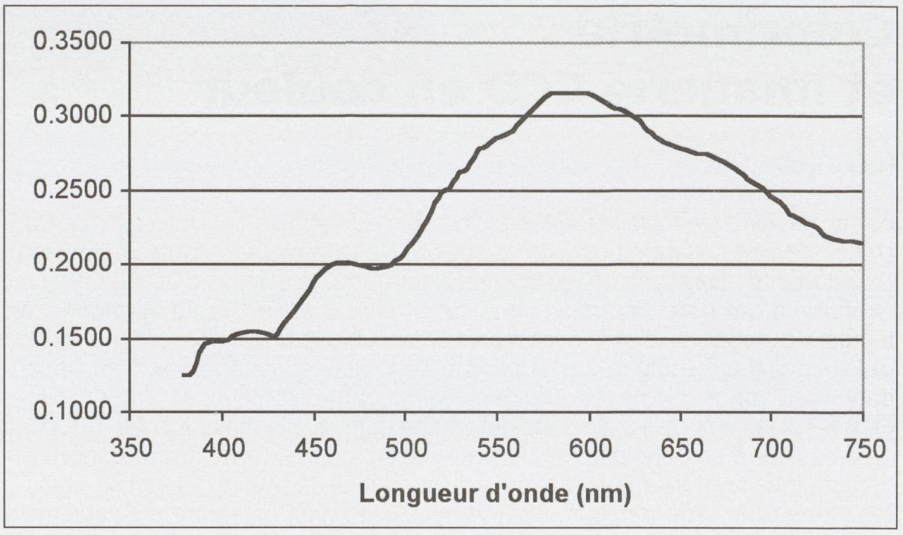


Figure 2. Rendement quantique du capteur KAF-0401E.

Mesures de la transmission spectrale des filtres rouge, vert et bleu:

Les trois filtres R,G,B de la roue sont de type diélectrique (interférentiels). Leurs spectres de transmission ont été mesures à l'école d'ingénieur du Locle (EICN) dans les laboratoires d'optique à l'aide d'un spectromètre à fibre *S2000 Miniature Fiber Optic Spectrometer* de Ocean Optics, avec une résolution spectrale de $\Delta\lambda = 2$ nm [2].

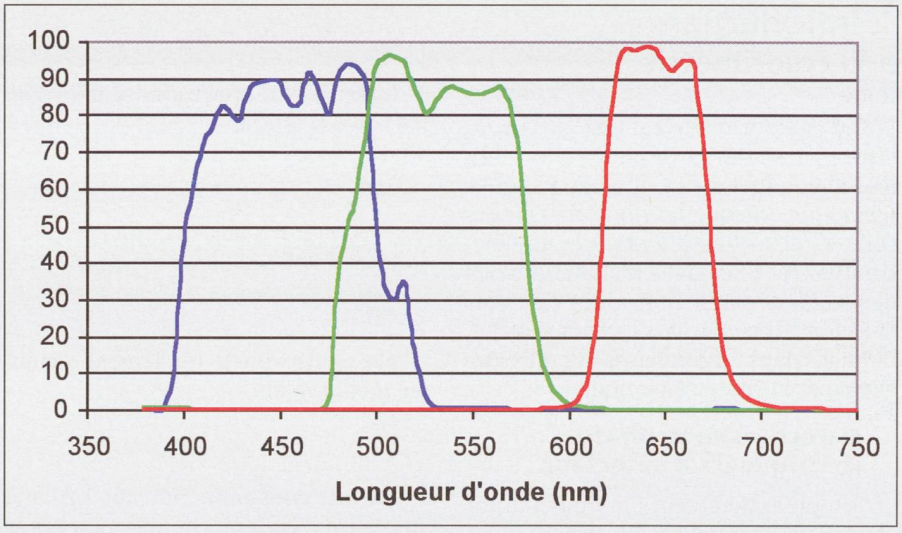
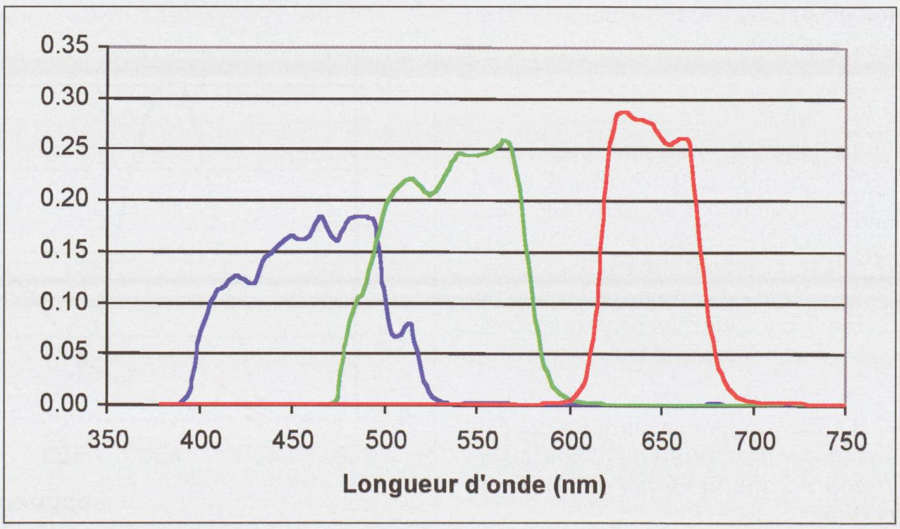


Figure 3. Transmission spectrale des filtres RGB.

Sensibilité spectrale:

Les sensibilités spectrales du capteur pour chacun des filtres, notées $Sr(\lambda)$, $Sg(\lambda)$ et $Sb(\lambda)$ respectivement pour le rouge, vert et bleu, s'obtiennent par la multiplication du spectre de transmission par celui de la sensibilité spectrale du capteur. Elles sont représentées sur la figure 4.

Figure 4. Sensibilité spectrale de l'association filtres et CCD.



a) Détermination du temps d'exposition pour la reproduction du blanc

La couleur blanche est donc obtenue en superposant dans des rapports judicieux les composantes fondamentales. Mais la sensation de blanc dépend du type de source. Si l'œil s'adapte par lui-même, ce n'est pas le cas pour le capteur.

Source à spectre uniforme:

On suppose que la source qui doit donner l'impression de couleur blanche est caractérisée par un spectre uniforme. Pour les filtres CIE, en considérant un flux spectral constant $I(\lambda) = I_0 =$ constant, on détermine alors les coefficients trichromatiques par intégration numérique avec les spectres CIE, comme mentionné plus haut. On obtient:

$r = 0.333 \quad g = 0.333 \quad b = 0.333.$

Ce résultat signifie que chaque composante trichromatique intervient dans la même proportion.

Pour le capteur CCD, on effectue un calcul équivalent à partir des sensibilités spectrales $S_r(\lambda)$, $S_g(\lambda)$, $S_b(\lambda)$. On détermine les coefficients trichromatiques correspondants Sr, Sg et Sb, équivalents aux coefficients r, g et b:

Sr = 0.351 Sg = 0.389 Sb = 0.260.

Ayant vu précédemment que les valeurs désirées étaient r = g = b = 0.333, il est nécessaire d'appliquer les facteurs correctifs k_r, k_g et k_b suivants aux temps d'exposition:

$$k_r = \frac{r}{Sr} = 0.949$$

$$k_g = \frac{g}{Sg} = 0.856$$

$$k_b = \frac{b}{Sb} = 1.281$$

Les facteurs k_r, k_g et k_b représentent donc les facteurs multiplicatifs pour la correction des temps d'exposition de chacune des couleurs, permettant ainsi de rendre fidèlement la couleur blanche.

Spectre du corps noir:

Sur Terre, la lumière qu'on considère comme blanche est celle émise par le Soleil. Elle peut être assimilée à l'émission d'un corps noir et obéit à la loi de Planck:

$$I(\lambda) = 8\pi \frac{h \cdot c}{\lambda^5 \cdot \left[\exp\left(\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k_B \cdot T}\right) - 1\right]}$$

où $h = 6.6260755 \cdot 10^{-34}$ est la constante de Planck, $c = 2.99792458 \cdot 10^8$ la vitesse de la lumière et $k_B = 1.380658 \cdot 10^{-23}$ la constante de Boltzmann.

On peut alors reprendre les calculs précédents en considérant une répartition spectrale obéissant à cette loi, avec un corps à 6000 K. Mais il est également possible de faire ces calculs pour des corps noirs à d'autres températures, par exemple 3000 K comme ce serait le cas pour une géante rouge ou 15 000 K pour une naine blanche. Ces différents spectres ont alors les allures données à la figure 5. Les facteurs correctifs des temps d'exposition sont reportés au tableau 1.

	Facteurs correctifs		
	t_r	t_g	t_b
$I(\lambda) = I_0$ = cste	1	0.902	1.350
Planck: T = 3000K	1	1.460	1.665
Planck: T = 6000K	1	0.797	1.220
Planck: T = 15 000K	1	0.533	0.906

Tableau 1. Facteurs correctifs des temps d'exposition

b) Détermination du temps d'exposition pour la reproduction d'une source colorée

Source monochromatique:

Dans le cas d'une source monochromatique, comme une nébuleuse émettant une raie H_β unique à 656 nm, une détermination des facteurs correctifs n'est pas possible. En effet, alors que les coefficients trichromatiques r et g sont non nuls, il n'en n'est pas de même pour le facteur correspondant Sg. Si le rapport k_r peut ainsi être déterminé sans problème, la détermination de k_g est impossible (et divergerait) puisque Sg = 0. Dans cet exemple, on ne pourra donc pas restituer fidèlement la couleur de cette nébuleuse.

De façon plus générale, la reproduction fidèle d'une source colorée n'est donc pas toujours possible et ne peut dans tous les cas être faite que si son spectre est connu.

c) Acquisition d'image en couleurs

Test sur cible colorée

Une cible constituée de quatre feuilles de papier coloré fixée sur un fond blanc sert au test. La prise de vue ayant été effectuée en extérieur par un temps couvert, la température de couleur n'est pas exactement déterminée. A noter qu'une prise de vue en plein soleil n'a pas été rendue possible avec les moyens à disposition, car elle conduisait à une forte surexposition.

Les images sont acquises avec le logiciel CCD_SOFT fourni avec la caméra et le traitement est effectué avec Astroart 3.0 de MSB Software.

La première image (en haut à gauche) est la cible photographiée. Les trois autres ont été prises avec des temps d'exposition correspondant aux rapports indiqués précédemment.

Images astronomiques

Pour créer une image couleur au moyen du logiciel Astroart 3.0, des prises de vue avec chacun des filtres colorés ainsi qu'un cliché sans filtre ont été effectuées. L'image sans filtre, donnant l'information de luminance, est souvent utilisée dans les logiciels pour composer l'image couleur.

La nébuleuse M42 sert au test. La caméra est montée sur un objectif catadioptrique de 90 mm de diamètre et de 350 mm de focale.

Dans un premier essai, les temps de pose appliqués sont ceux correspondant à une intensité constante, qui donne apparemment les meilleurs résultats. Ces temps de pose sont de 20 secondes pour le filtre rouge, 18 pour le filtre vert, 27 pour le bleu et 20 pour la luminance.

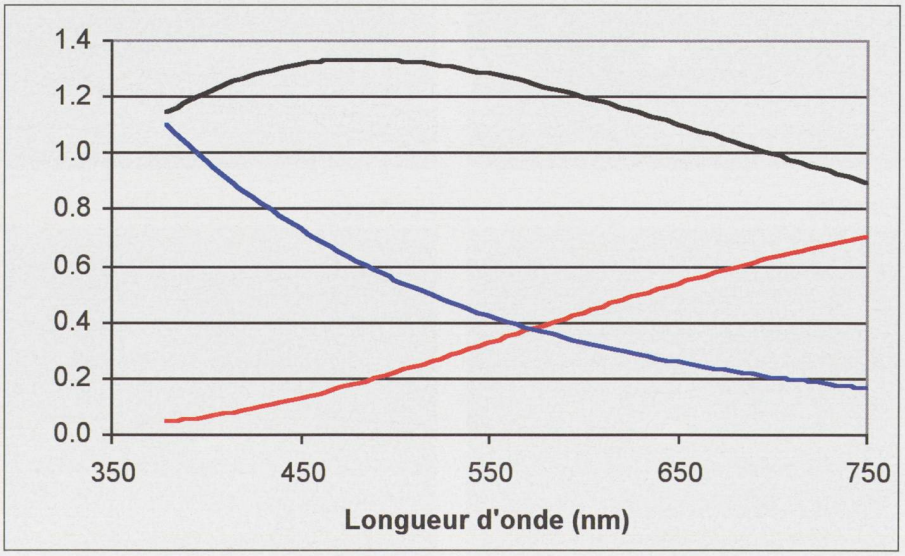


Fig. 5: Spectre du corps noir a 3000K, 6000K et 15000K. Pour des raisons de clartés, la courbe à 3000 K est amplifiée d'un facteur 20 et la courbe à 15000 K est divisée par 50 par rapport à la courbe à 6000 K.

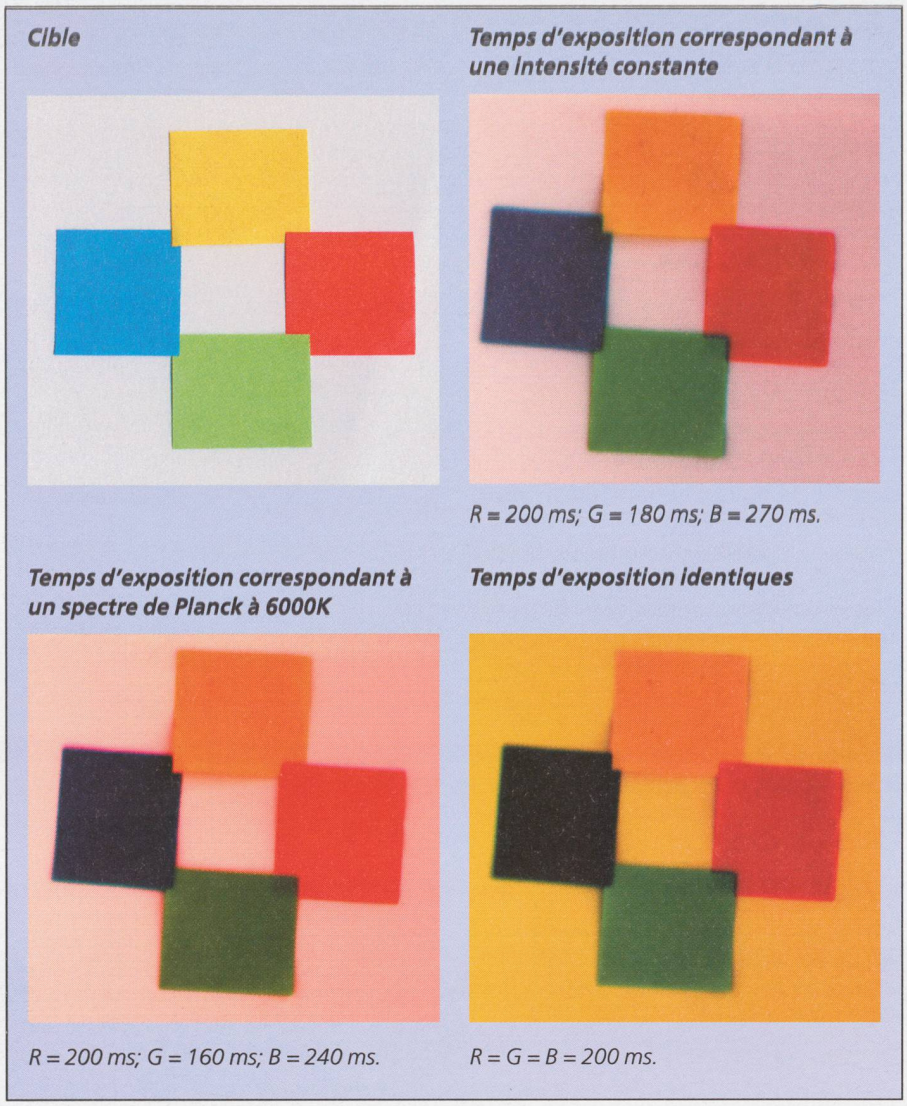


Fig. 6: Test d'acquisition d'image en couleurs

Fig. 8: Vue de M42 avec une petite variation dans le temps d'exposition: 20 secondes pour le rouge, 20 pour le vert et 27 pour le bleu.

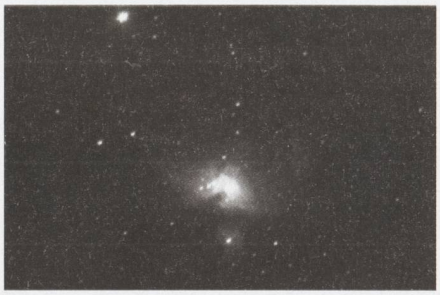


Fig. 9: Vue de M42 avec des temps d'exposition égaux, 20 secondes pour chacun des filtres.

Pour illustrer la sensibilité de la couleur de l'image finale aux différents modes d'exposition, cette image a également été prise avec des temps d'exposition différents.

Conclusion

Recréer ce que l'œil est capable de percevoir en terme de couleur pose des problèmes qui sont loin d'être triviaux. Il nécessite de reconstituer une image couleurs à partir d'images analysées à travers des filtres correspondant aux

Fig. 7: Nébuleuse M42 reproduite dans les conditions du spectre uniforme.

Image couleur

couleurs fondamentales. Si les filtres utilisés dans l'analyse, associés au photodétecteur, produisent des sensibilités spectrales ne correspondant pas aux spectres fondamentaux, des facteurs de proportionnalité dépendant des sujets photographiés devront être appliqués lors de cette reconstruction. Ces facteurs sont ainsi fonction de la nature de l'objet et de la température de couleur de la source d'illumination.

Pour le photodétecteur et le jeu de filtres utilisés, les divers essais montrent que les temps de pose déterminés en considérant un spectre uniforme d'illumination donne les meilleurs résultats lorsque la prise de vue s'effectue en extérieur par temps couvert. Le rapport R/G/B vaut alors 1 / 0.9 / 1.35. Ce même rapport semble également donner des résultats satisfaisants pour des objets astronomiques tels des nébuleuses.

Le résultat le plus important à tirer de cette étude est d'être conscient qu'il est absolument impossible de restituer les couleurs exactement telles que nous les verrions, sans faire intervenir pour les prises de vue des informations sur la source et la nature de l'objet photographié. Dans certaines situations, il sera même impossible de restituer fidèlement les couleurs. Les instruments optoélectroniques ne se sont pas près d'égaler les capacités de l'œil dans ce domaine particulier.

PIERIK FALCO
Rue du Seyon 25, CH-2000 Neuchâtel

Bibliographie

[1] *Vision et mesure de la couleur*, PAUL KOWALISKI; Masson, Paris, 1978
[2] http://www.oceanoptics.com/products/s2000.asp

ASTRO-LESEMAPPE DER SAG

Die Lesemappe der Schweizerischen astronomischen Gesellschaft ist die ideale Ergänzung zum ORION. Sie finden darin die bedeutendsten international anerkannten Fachzeitschriften:
Sterne und Weltraum
Astronomie heute
Ciel et Espace
Spektrum der Wissenschaft
Forschung SNF
Der Sternenbote
Kostenbeitrag: nur 30 Franken im Jahr!

Rufen Sie an: 071/841 84 41
HANS WITTWER, Seeblick 6, 9327 Tübach