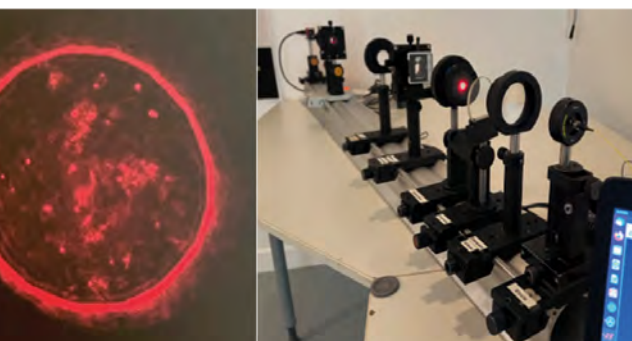


Coronographe des étoiles en laboratoire... et découvrir des planètes

Pierre BAUDOZ

LESIA, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université,
Université Paris Cité, 5 place Jules Janssen, 92195 Meudon, France

pierre.baudoz@obspm.fr



Éteindre une étoile, voilà une drôle d'idée !

C'est pourtant que ce que l'on propose aux étudiants avec cette expérience. L'objectif est de comprendre le principe du coronographe appliqué à l'observation de planètes extrasolaires. Avec un montage simple, on démontre comment atténuer optiquement la lumière d'une étoile sans modifier l'image d'une planète extrasolaire qui orbite autour de cette dernière.

<https://doi.org/10.1051/photon/202211724>

Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation correcte de la publication originale.

Le critère de Rayleigh considère que l'on peut distinguer deux points distincts du champ de vue lorsque le maximum principal de l'image d'un des objets coïncide avec le minimum de l'autre image. Cette définition du pouvoir de résolution est incomplète si l'on n'ajoute pas que les sources doivent avoir le même éclairement. Prenons deux objets ponctuels d'éclairements très différents, la diffraction augmente significativement la distance minimale nécessaire pour les distinguer puisque la source faible n'est détectée que lorsqu'elle produit un éclairement significativement supérieur aux pieds de la tâche de diffraction de l'objet brillant.

Pour rétablir la capacité de distinguer les deux objets, il faut soit minimiser les pieds de la tâche de diffraction par des techniques d'apodisation (au risque de conserver l'objet central brillant en général trop

éblouissant pour les caméras) soit supprimer la lumière de la source centrale sans modifier la transmission du reste du champ de vue. C'est l'objectif de la coronographie.

Un banc de démonstration

La coronographie est une technique qui permet donc d'augmenter la dynamique des observations en diminuant voire supprimant la lumière de l'objet placé sur l'axe central de l'instrument tout en modifiant au minimum la transmission du reste du champ de vue.

Son application étant principalement astronomique, elle est rarement enseignée dans les cursus optiques. Pourtant, elle ne comporte pas de difficulté conceptuelle et représente une très belle application des principes de diffraction de la lumière. Cette technique se trouve

de plus aujourd'hui au cœur des nouveaux instruments d'imagerie astronomique dans le contexte de détection de planètes extrasolaires. Par exemple, 2 des 3 instruments du télescope spatial James Webb lancé en décembre 2021 intègrent des coronographes et les 3 premiers instruments du futur télescope géant européen de 39m de diamètre en seront également équipés.

Nous avons développé un petit banc de démonstration au sein du laboratoire LESIA de l'Observatoire de Paris. Il est utilisé pour des enseignements au niveau Master 2 mais également pour des démonstrations grand public lors de portes ouvertes par exemple. Le banc démontre plutôt la coronographie stellaire qui est apparue dans les années 80 et qui a pris tout son essor depuis une vingtaine d'année avec son utilisation pour la détection de planètes extrasolaires (Voir encart).

Montage expérimental

Le montage présenté en Figure 1 est constitué principalement de matériel de récupération. Il est très simple et peut être monté avec du matériel d'enseignement classique. Il est constitué de 4 lentilles convergentes plan-convexes, de 2 diaphragmes, d'une fibre optique mono-mode alimentée par un laser rouge à 630 nm qui simule une étoile et d'une petite caméra monochromatique qui permet d'enregistrer des images.

La fibre optique est placée au foyer d'une lentille pour simuler les rayons parallèles qui nous parviennent des étoiles toujours situées à de très grandes distances par rapport à la taille des télescopes. La deuxième lentille simule le télescope. Elle est couplée avec un diaphragme à iris qui définit la pupille du télescope et permet de faire varier son diamètre. On peut ainsi démontrer la variation de la taille de tache de diffraction avec le diamètre lors de visites grand public. Le diamètre de la pupille d'entrée est limité par l'aberration sphérique de la lentille « télescope » et par la distribution gaussienne du faisceau en sortie de la fibre. En effet, l'éclairement au niveau de la pupille du « télescope » doit être relativement plan pour simuler une observation astronomique. Avec des fibres monomodes standards et une

première lentille de focale 200 mm, le diaphragme du « télescope » doit être inférieur à environ 10 mm.

Au foyer du télescope, on va placer le masque coronagraphique qui est lui-même placé au foyer d'une troisième lentille qui permet de faire une image de la pupille d'entrée du télescope. Au niveau de ce plan, on place un deuxième diaphragme, le diaphragme de Lyot, qui permet de filtrer la lumière diffractée par le masque coronagraphique. La dernière lentille permet la focalisation de l'image de l'étoile sur une petite caméra CMOS monochrome de quelques centaines d'euros.

Le masque focal de Lyot est une diapositive classique utilisée pour des Travaux Pratiques de diffraction et vendue par les sociétés de produits éducatifs (Jeulin, 3B Scientific, Didalab etc). Celui qui est utilisé dans ce montage contient 9 disques opaques déposés sur une diapositive (diamètres de 0.1 à 1.8 mm). Cette diapositive est généralement utilisée en parallèle d'une grille de diaphragmes de même diamètre pour étudier le théorème de Babinet.

Pour démontrer l'intérêt de la coronagraphie, on peut ajouter une planète dans le montage optique. Il suffit pour cela d'introduire une lame à face parallèle en amont de la lentille simulant le télescope. Cette lame va créer une deuxième source en utilisant la double ●●●

Figure 1 : Photographie du montage expérimental. Au premier plan, l'écran montre l'image coronagraphique du système étoile-planète de laboratoire observé en simultané par la caméra.



Solutions de soudure optique pour le marché de la Photonique



Nouvelle plateforme de fusion par laser CO2 LZM125A+ Fujikura

Soudure de 80 à 2.5mm de silice
Tous types de fibres (LDF, PM, PCF, Zblan,...)
Ablation, clivage et mode-stripping
Tapers, ball lenses, fonctions spéciales



Soudeuse FSM100P+ Fujikura

Soudure de 60 à 1.2mm de silice
Mode PM avec End-View
Fonctions spéciales intégrées
Pilotable par PC via logiciel convivial



Nouveau cliveur CT106+ Fujikura

Clive les fibres de 60µm à 1.2mm
Option clivage angulaire réglable 0-15°
Back-stop intégré
Clamps de fibres motorisés et automatiques

LA CORONOGRAPHIE

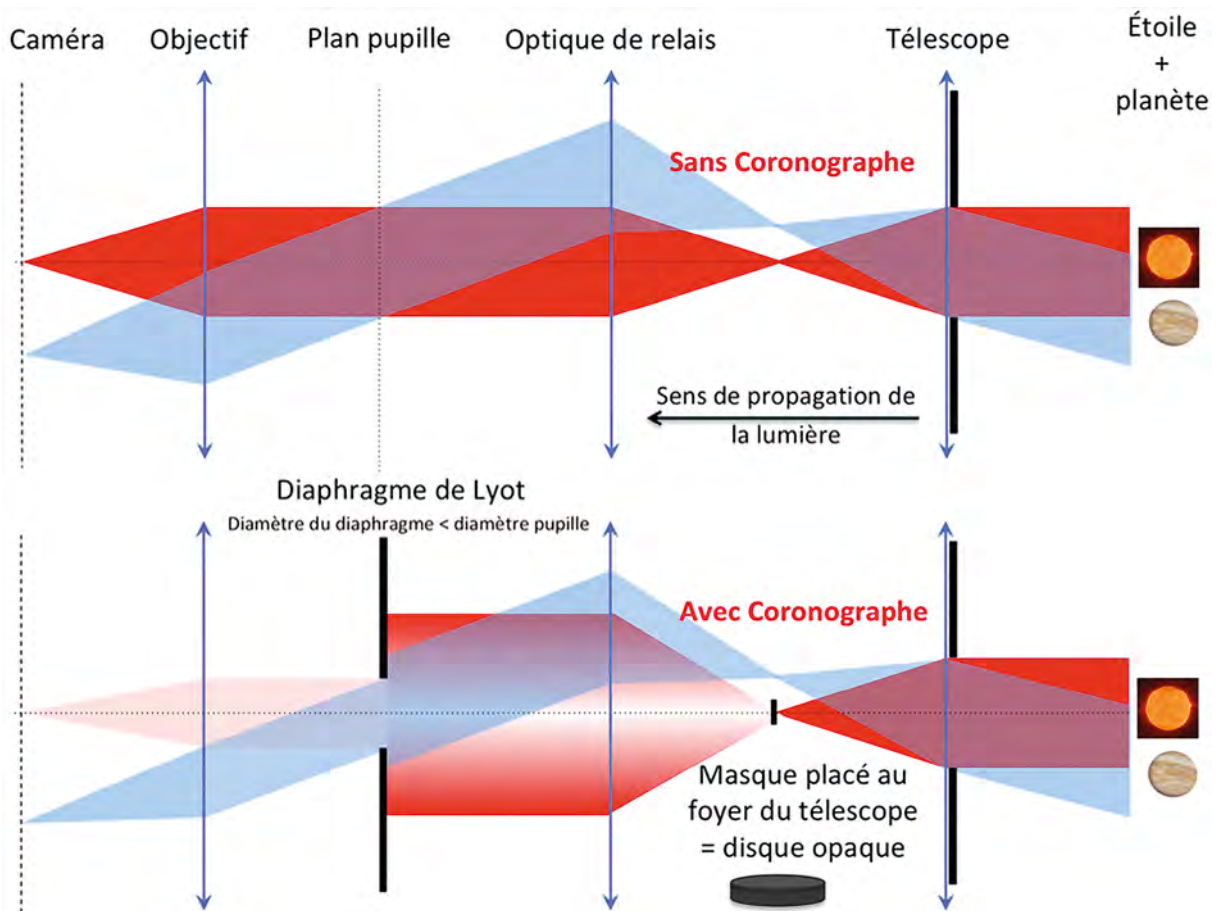
La **coronographie solaire** a été inventée par Bernard Lyot, astronome à l'Observatoire de Meudon, en 1930 [1]. La technique inventée par Lyot vise l'observation de la couronne solaire dont le rayonnement visible atteint à peine un millionième de celui de la photosphère solaire et qui, à l'époque, n'était observable que pendant des éclipses solaires. Le coronographe de Lyot est formé de deux éléments essentiels :

- un masque opaque dans le plan focal dont la taille est légèrement supérieure à l'image du disque solaire et qui bloque la majeure partie de la lumière solaire.
- Un diaphragme placé dans un plan pupille en aval du masque focal qui permet d'atténuer la diffraction du disque solaire

Contrairement au cas solaire, la **coronographie stellaire** veut éteindre une source ponctuelle.

En effet, les étoiles ont des diamètres inférieurs à la

résolution des télescopes actuels et pour la majorité d'entre elles, elles peuvent être comparées à des sources ponctuelles. De plus, l'angle qui sépare une planète et son étoile est très faible par rapport à la résolution angulaire des télescopes actuels. Pour prendre un exemple concret, si l'on plaçait le système solaire à une distance d'une dizaine d'années-lumière, l'angle séparant la Terre du soleil sera à peine 10 fois supérieur à la résolution des plus gros télescopes optiques actuels. On ne compte qu'une dizaine d'étoiles à moins de 10 années-lumière. Il faut donc prévoir d'observer des systèmes planétaires plus lointains et détecter des planètes situées à une distance angulaire de l'ordre de la résolution du télescope. La coronographie stellaire doit donc éteindre la lumière d'un objet ponctuel tout en optimisant la transmission d'un objet situé à quelques λ/D de l'étoile.



Principe du coronographe de Lyot appliqué à la détection de planètes extrasolaires.

réflexion vitreuse sur les deux surfaces de la lame. Le facteur de réflexion en intensité sur un dioptre silice/air est de 3,5%, on obtient donc avec une double réflexion une « planète » environ mille fois moins lumineuse que notre « étoile » de laboratoire. La distance entre les deux sources peut être modifiée en augmentant ou diminuant l'angle de la lame¹.

Montage expérimental

L'utilisation d'une petite caméra CMOS dont le temps d'exposition peut varier de quelques dizaines de microsecondes à quelques secondes permet d'enregistrer des images avec ou sans le coronographe sans saturer le détecteur. En général, on estime les performances d'un coronographe en calculant le rapport d'intensité entre l'image de l'étoile centrée sur le coronographe et l'image de l'étoile décalée par rapport au masque. Un exemple qualitatif est donné dans la Figure 2 où l'on a rassemblé des images enregistrées par la caméra pour un masque de 0.2 mm de diamètre avec un « télescope » de 5 mm de diamètre et 200 mm de focale.

L'effet du diaphragme de Lyot est évident sur les images coronographiques présentées dans la Figure 2. Dans cet exemple, le diaphragme de Lyot a un diamètre de 75% du diamètre initial de la pupille mais atténue d'un facteur 30 les effets de diffraction dans l'image et permet d'atteindre un contraste de 10^6 entre le maximum de l'image de l'étoile et l'intensité coronographique à $10 \lambda/D$. Le diaphragme diminue également la transmission d'une éventuelle planète mais d'un facteur 1,8 seulement.

Au centre des résidus coronographiques, on voit distinctement un point lumineux qui est connu pour avoir trois noms de scientifiques célèbres : tache d'Arago, de Fresnel ou de Poisson. En effet, l'existence d'un tel point lumineux centré sur l'ombre d'un masque occultant a été prédite théoriquement par Siméon Denis Poisson pour démontrer l'inexactitude de la théorie ondulatoire de la lumière proposée par Augustin Fresnel. L'effet fut inverse puisque François Arago observa expérimentalement l'existence de ce point et acheva de convaincre la majorité des scientifiques de l'époque de la nature ondulatoire de la lumière.

Un instrument ultra-sensible aux aberrations optiques

Un des points clefs du coronographe de Lyot est donc bien la présence d'un diaphragme dans le plan pupille aval du masque focal. Le montage permet de mettre en évidence visuellement l'anneau de lumière diffractée au niveau du bord de la pupille et pour lequel Lyot a proposé le diaphragme qui porte son nom (voir Figure 3). Sur cette même figure, on voit également des structures lumineuses dans la pupille qui sont créées ●●●

¹ La planète est cohérente avec l'étoile sur notre banc puisque nous avons choisi une source laser mais les effets coronographiques ne seront pas fortement affectés et ce montage permet de simuler simplement une source secondaire.

FORMATION CONTINUE



40 stages au catalogue
niveau débutant à confirmé



stages sur mesure
pour répondre à vos besoins
spécifiques



formateurs experts
du monde académique
et industriel



**enseignement
expérimental**
sur les 70 montages
de la formation ingénieur



La certification qualité a été délivrée
au titre de la catégorie d'actions suivantes :
Actions de formation

<https://fc.institutoptique.fr>

✉ fc@institutoptique.fr

☎ +33 1 64 53 32 36 / +33 1 64 53 32 15

par les défauts des optiques qui sont utilisées sur le banc (aberrations, poussières, etc.). Dès ses premiers papiers sur la coronagraphie, Lyot s'est rendu compte qu'un coronographe permettait de mettre en évidence les défauts des optiques utilisées. C'est d'ailleurs cette méthode qu'il a appliquée pour tester toutes les optiques qu'il a intégrées dans les différents modèles de coronographe qu'il a construits de 1930 à 1938 [2]. Il a amélioré cette solution en 1941 en remplaçant le masque opaque par un masque qui déphase l'onde d'un quart de période indépendamment du test de contraste de phase proposé par Zernike. Cette technique, appelée test de Lyot, est particulièrement sensible aux aberrations de très hautes fréquences spatiales.

Cette sensibilité est aussi un inconvénient de la coronagraphie stellaire puisqu'aujourd'hui, c'est la qualité de la surface d'onde en amont des coronographes qui limite principalement leurs performances. Pour les observations des télescopes au sol, la qualité de la correction des optiques adaptatives limite le contraste obtenu à 10^4 à 10^5 (avant traitement des données). Dans l'espace, la qualité de surface des optiques limite les coronographes à des contrastes de 10^6 environ. Pour

atteindre des contrastes suffisants pour détecter des exoplanètes rocheuses comme la Terre (contraste de 10^{10}), la prochaine génération de coronographes spatiaux intégrera des miroirs déformables à très grand nombre d'actionneurs permettant de corriger les défauts résiduels de polissage des miroirs du télescope. L'objectif pour un projet comme le Roman Space Telescope qui devrait être mis en orbite en 2027 est d'atteindre une qualité de surface d'onde de quelques picomètres RMS sur les fréquences spatiales corrigées par les miroirs déformables.

Un pointage très précis

Le montage permet également d'expliquer les opérations de pointage très précis de l'étoile sur le coronographe que requiert un coronographe (de quelques dixièmes à quelques centièmes de λ/D). Pour cela, on a besoin de :

- 1) connaître la position du centre du coronographe,
- 2) connaître la position de l'étoile,
- 3) avoir un système précis permettant d'amener précisément l'image de l'étoile au centre du coronographe.

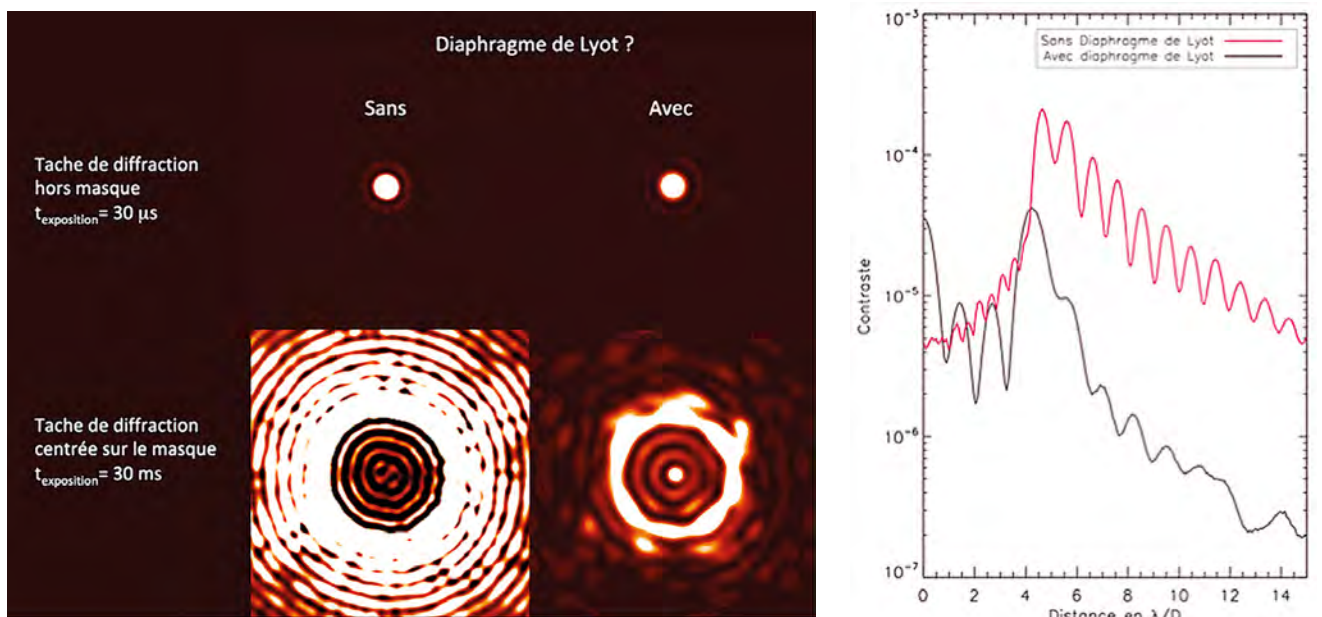
La position du coronographe sur la caméra est mesurée sur le banc en illuminant le masque focal avec une illumination uniforme (ici, on utilise une petite lampe LED placée à quelques centimètres devant le masque focal).

Sur le banc, le coronographe est mobile par rapport au télescope pour faire correspondre le centre du masque à la position de l'image de la source sur la caméra. Sur un télescope, le coronographe sera fixe par rapport au télescope et c'est le télescope que l'on bougera ou plus souvent un miroir de pointage précis (sur le télescope spatial Webb, le miroir de pointage est précis à 5 millisecondes d'angle soit $2.4 \cdot 10^{-8}$ radians).

Les coronographes plus complexes

Sur le banc, l'utilisation de masques de tailles différents permet de mettre en évidence les limitations du coronographe de Lyot. En réduisant à quelques millimètres le diamètre du « télescope » et en choisissant

Figure 2 : Gauche : Images enregistrées sur le banc pour plusieurs configurations. Le masque coronographique a un diamètre 8 fois plus grand que la résolution du « télescope ». Droite : Contraste entre les images avec et sans diaphragme de Lyot et le maximum de la tache de diffraction hors masque.



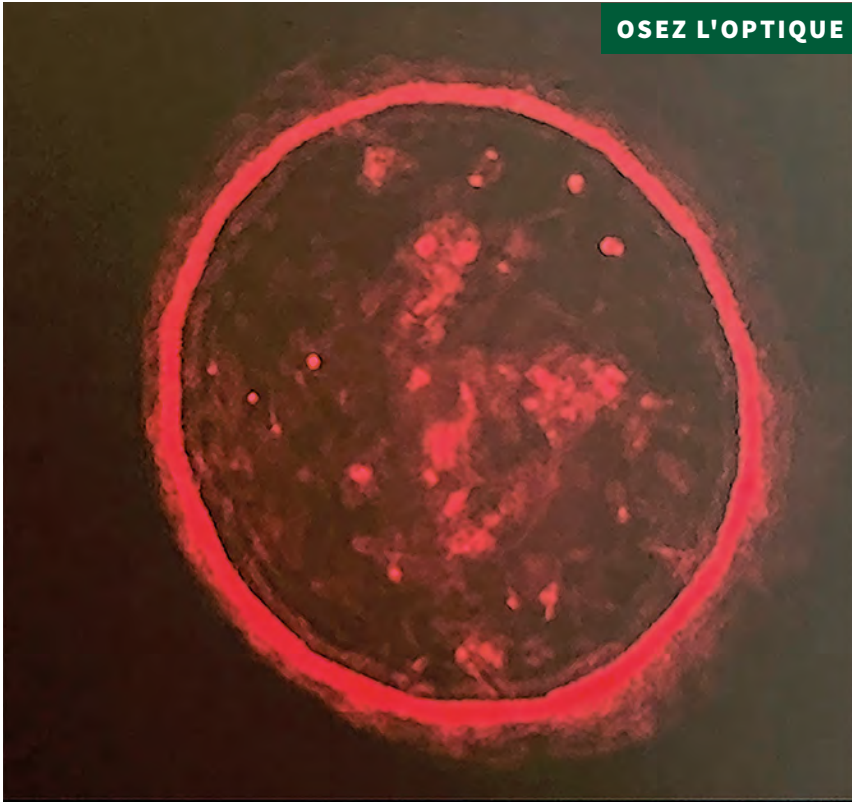


Figure 3 : Photographie enregistrée par un Smartphone de l'éclairage de la pupille au niveau du diaphragme de Lyot

le masque le plus petit (0,1 mm de diamètre), on peut démontrer que l'effet coronographique est limité lorsque le masque de Lyot a un diamètre inférieur à $4-5 \lambda/D$. Pour observer des exoplanètes orbitant au plus proche de leur étoile, il est donc nécessaire de remplacer le masque de Lyot opaque par des masques de phase permettant d'éteindre la lumière de l'étoile par interférences destructives.

Contrairement au coronographe de Lyot, ces masques peuvent éteindre complètement une étoile ponctuelle centrée sur le coronographe et observer en même temps l'environnement de l'étoile jusqu'à la limite de résolution théorique de l'instrument, c'est-à-dire λ/D . Ces masques sont les plus étudiés actuellement pour

la coronographie stellaire. Par exemple, on peut citer le masque de phase à quatre quadrants proposé par D. Rouan [3] dans les années 2000 et qui est utilisé sur un des instruments du télescope spatial James Webb [4] et qui a permis la première observation d'une planète extrasolaire dans l'infrarouge thermique [5] ou des masques composés d'un vortex optique de charge paire [6]. C'est la combinaison de ces masques coronographiques complexes et de la correction des défauts optiques au niveau du picomètre qui permettra d'ici quelques années d'étudier plus précisément les systèmes exoplanétaires les plus proches et de mieux comprendre les conditions d'apparition de la vie sur les planètes rocheuses qui les composent. ●

RÉFÉRENCES

- [1] B. Lyot, C. R. Acad. Sci. Paris **191**, 834 (1930)
- [2] B. Lyot, C. R. Acad. Sci. Paris **222**, 51 (1946)
- [3] D. Rouan, P. Riaud, A. Boccaletti, *et al.*, Publ. Astron. Soc. Pac. **112**, 1479 (2000)
- [4] A. Boccaletti, C. Coussou, P. Baudoz *et al.*, Astron. Astrophys. **667**, A165 (2022)
- [5] A. Carter, S. Hinkley, J. Kammerer, *et al.*, Submitted to Astrophys. J. (2022)
- [6] D. Mawet, P. Riaud, J. Surdej, et O. Absil, Astrophys. J. **633**, 1191 (2005)

OPTIQUES LASER ET SYSTÈMES OPTIQUES

POUR LES APPLICATIONS LASER HAUTE ENERGIE

- Lentilles sphériques et asphériques de précision
- Traitement IBS haute tenue au flux
- Expanseurs de faisceaux et systèmes optiques de focalisation
- Cristaux laser et non linéaires
- Cellules de Pockels et drivers haute tension



www.eksmaoptics.com

Représenté par:

ARDOP
INDUSTRIE

05.40.25.05.36 | sales@ardop.com
www.ardop.com