

Le coronographe interférentiel achromatique : un outil pour l'étude de l'environnement stellaire

Yves Rabbia

Jean Gay

Jean-Pierre Rivet

Observatoire de la Côte d'Azur

Tél. : 33 (0)4 93 40 53 59

Yves.Rabbia@obs-azur.fr

Sommes-nous seuls dans l'univers ? Comment son origine peut-elle être décrite ? Ces deux questions ont traversé les siècles et depuis le temps d'Epicure jusqu'à la fin des années 80, l'essentiel des réponses ou commentaires ne pouvait être que de nature spéculative. La situation a complètement changé au début des années 90, avec le lancement par la NASA d'un grand programme de recherche *Origins*. Ce programme déplace le questionnement vers le terrain expérimental et implique des développements technologiques dédiés, notamment, à la recherche des autres mondes que sont les planètes extra-solaires ou exoplanètes (planètes en orbite autour d'étoiles autres que notre Soleil).

La coronographie

■ La détection directe d'exoplanètes

Depuis la première exoplanète découverte en 1995 par l'équipe de Mayor, plus de 150 sont maintenant identifiées, mais cela par des méthodes indirectes (c'est-à-dire à partir des perturbations de la lumière émise par l'étoile mère). L'étape suivante doit accomplir la détection directe (recueillir les photons de

la planète elle-même) et l'analyse spectrale d'exoplanètes de type Terre, afin de trouver la signature de gaz "bio-traceurs" tels que CO₂, H₂O, O₃, par les raies spectrales en absorption qu'ils engendrent.

Une telle entreprise nécessite de recourir à des missions spatiales, dont l'accomplissement pose d'ambitieux défis technologiques. Leur développement est engagé mais pour leur lancement il faut encore attendre plus d'une décennie.

Pour l'instant, il y a un objectif préliminaire : la détection directe de corps célestes faiblement émissifs, situés dans le très proche voisinage angulaire des étoiles, où les exoplanètes représentent la déclinaison ultime. Ici s'introduit la coronographie.

■ L'apport de la coronographie

La coronographie est un mode d'observation utilisé en astronomie, pour l'étude de l'environnement angulairement proche des étoiles (et autres sources ponctuelles : astéroïdes, compagnons faibles dans les binaires, galaxies à noyau actif, quasars,...).

Dans le domaine stellaire, l'étude concerne par exemple la répartition de la matière circum-stellaire, la détection de compagnons faibles dans les binaires et aussi la détection des exoplanètes.

Le problème posé est double : d'une part, l'étoile est excessivement plus brillante que les motifs environnants (le rapport de flux est typiquement de 10³ à 10⁶ et même au-delà) et cette prédominance empêche leur détection ; d'autre part, la proximité angulaire à explorer est typiquement de l'ordre de quelques dizaines de milliarcsec, ce qui correspond à la résolution angulaire des plus grands télescopes (classe 4 à 8 m selon la longueur d'onde de travail).

Ainsi, un coronographe stellaire a d'abord comme fonction d'empêcher le rayonnement de l'étoile d'apparaître dans l'image enregistrée, autrement dit d'assurer la réjection, et ensuite de limiter angulairement cette réjection, de manière à sonder l'environnement stellaire aussi près que possible de l'étoile, là où se trouvent les motifs dont l'intérêt scientifique est actuellement le plus important et qui sont inaccessibles par les méthodes d'observation habituelles.

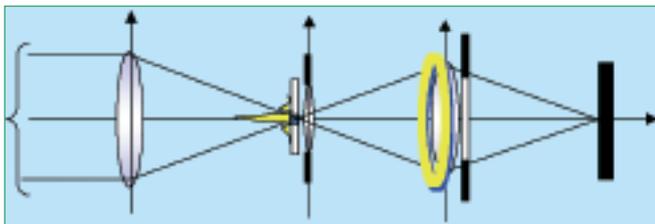
La coronographie interférométrique

■ Ses avantages

Diverses approches coronographiques existent, dont la plus prometteuse est l'approche interférométrique, où la réjection de l'étoile est obtenue par interférences destructives. Celles-ci agissent pour une source sur l'axe de visée, tandis que les motifs "hors d'axe" échappent à ce processus : on peut ainsi éliminer la contribution stellaire pour ne garder que l'environnement. Le principe de base de la coronographie interférentielle est de séparer le faisceau incident sur l'axe, en deux parties (deux bras) et d'insérer sur l'une un déphasage de π (ou 180°), ce qui à la recombinaison des deux parties produit une interférence destructive : les photons de la source sur l'axe sont rejetés (et repartent vers le ciel). L'approche interférentielle est celle qui permet le sondage le plus rapproché de l'étoile.

Tel n'est pas le cas avec l'approche conventionnelle fondée sur le coronographe de Lyot (*figure 1*). Celle-ci est directement transposée du système conçu par B. Lyot pour observer les protubérances à la périphérie du soleil, en réalisant une occultation artificielle par un masque matériel opaque, placé en un foyer intermédiaire du télescope. Mais pour le cas "stellaire", un tel masque ne permet pas d'explorer dans un voisinage angulaire suffisamment proche, à cause de la diffraction. Ainsi, c'est typiquement sur plus de cinq rayons d'Airy autour de l'étoile que l'exploration est interdite (en supposant que les effets adverses de la turbulence atmosphérique sont compensés par un système d'optique adaptative).

Figure 1. Principe et utilisation d'un coronographe stellaire de type Lyot. Les effets de la diffraction demandent d'insérer dans le plan pupille de sortie un "diaphragme de Lyot".



Le coronographe interférentiel achromatique

Le coronographe interférentiel achromatique (CIA) développé à l'Observatoire de la Côte-d'Azur, est un exemple d'approche interférométrique. Le CIA est essentiellement un interféromètre de Michelson-Fourier modifié pour assurer l'interférence destructive sur l'axe à la recombinaison (figure 2). La particularité du CIA est que (à la différence des autres coronographes interférentiels) le déphasage est intrinsèquement achromatique, ce qui est un effet du passage d'une onde par un foyer. Ainsi, sur l'un des bras, on insère un système à œil de chat qui réalise à la fois le déphasage par traversée d'un foyer et un retournement de champ (à partir duquel les sources hors d'axe échappent à l'interférence destructive). L'efficacité du processus dépend de la qualité du front d'onde incident (cohérence spatiale de la source). Ainsi l'emploi de la coronographie au sol exige de disposer d'un système d'optique adaptative pour corriger les distorsions de front d'onde introduites par la turbulence atmosphérique. Les performances du coronographe sont en définitive gouvernées par celles de l'optique adaptative.

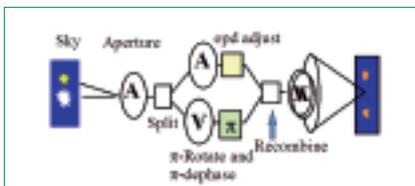


Figure 2. Principe générique du CIA.

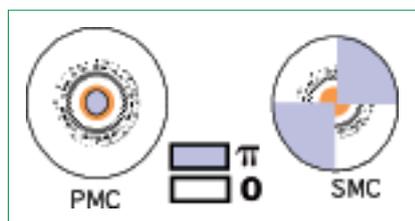


Figure 3 a. Principe des systèmes PMC et SMC.

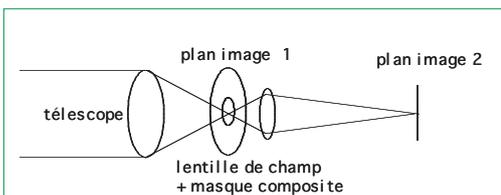


Figure 3 b. Utilisation des systèmes PMC et SMC. Le diaphragme de Lyot n'est pas représenté.

Les autres approches coronographiques

Parmi d'autres approches coronographiques, on peut citer le PMC (Phase Mask Coronagraph – Roddier et Roddier, 1997) et le SMC (Sectorized Mask Coronagraph – Rouan et al, 2000) (figures 3 a et b).

Avec le PMC, un masque matériel composite en deux parties transparentes (avec deux indices de réfraction différents) forme les deux voies interférométriques en séparant la tache d'Airy en deux parties (centrale et périphérique). Le choix des indices conduit à un déphasage de π entre la voie centrale et la voie périphérique.

Avec le SMC, l'approche est similaire mais la séparation des voies est faite en coupant la tache d'Airy en secteurs selon quatre quadrants. Les quadrants diagonaux ont le même indice, mais le déphasage de π s'établit entre les voies respectivement séparées par le couple 1-3 et le couple 2-4.

Dans les deux systèmes, l'interférence destructive apparaît dans le plan image suivant. Un avantage substantiel du PMC et du SMC est leur faible encombrement, permettant de les insérer aisément dans le train optique d'un télescope ; ce qui n'est pas aussi facile avec le CIA, dont le volume est nettement plus grand et dont les faisceaux d'entrée et de sortie sont perpendiculaires.

En revanche, un désavantage est qu'ils ne sont pas achromatiques. Les avantages du caractère achromatique sont la possibilité d'observer dans une large bande spectrale (accroissement de la détectivité par un meilleur rapport signal à bruit), ou d'observer en deux canaux spectraux adjacents (meilleure détectivité par un traitement différentiel des signaux) ou encore de pouvoir facilement choisir des canaux spectraux spécifiques à sonder (intérêt scientifique).

Réalisation du coronographe interférométrique achromatique

Le CIA a été réalisé et équipé pour tests sur le ciel sur le télescope Canada France Hawaii (CFHT) où est installé le système d'optique adaptative PUEO et la caméra infrarouge KIR (bande K, centrée à 2 microns).

Les performances en sondage proche (*close-sensing*) ont été vérifiées et la réjection s'est révélée en accord avec les évaluations théoriques (figures 4 a et b).

Pour des raisons budgétaires, ce n'est toute-

fois que récemment, grâce à l'acquisition d'une caméra Jade SWIR de chez Cedip, que des tests systématiques en laboratoire ont pu être effectués dans le domaine spectral de travail du CIA. Ils ont permis de chiffrer certaines imperfections dans la qualité optique du système et de quantifier les contraintes requises pour les réglages internes et pour l'insertion du CIA dans le train optique d'un télescope.

Par exemple, l'analyse du résidu et de sa forme a permis d'évaluer par la mesure un défaut optique interne au CIA (aberration de forme liée à l'usage) et a fourni des contraintes de pointage.

La réjection obtenue a atteint 500 (plus de

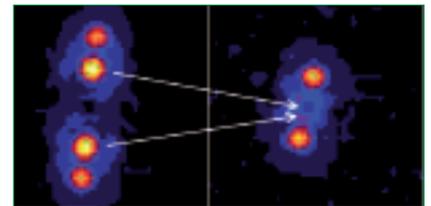


Figure 4 a. Mode de fonctionnement du CIA pour extinction de la source sur l'axe (binaire, 72 Peg. Observatoire de Haute-Provence, 1,93 m, CIA prototype).



Figure 4 b. CIA modèle compact sur sa platine d'interfaçage optique au 3,6 m CFHT (Hawaii).



Figure 4 c. Compagnon sondé à une séparation inférieure au rayon du premier anneau d'Airy (étoile HIP 97339, séparation $r = 0,13$ arcsec, CFHT anneau d'Airy à 2,2 m $r = 0,15$ arcsec, camera KIR, pixel : 0,035 arcsec)

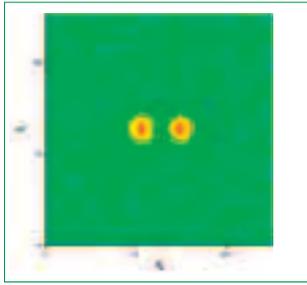


Figure 5 a. Étoile artificielle hors d'axe, deux images symétriques (Cedip).

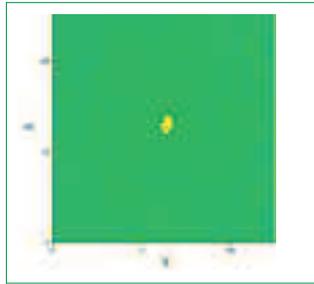


Figure 5 b. Étoile artificielle sur l'axe, présence d'un résidu de non-extinction.

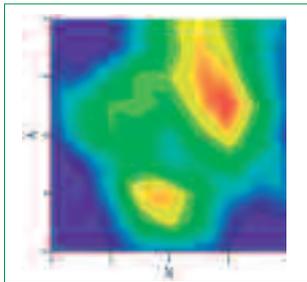


Figure 5 c. Image zoomée de la distribution d'intensité résiduelle.

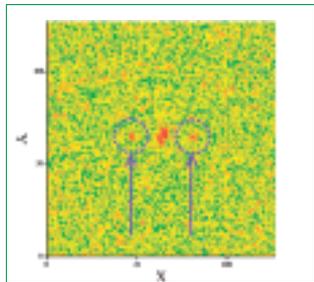


Figure 5 d. Étoile binaire artificielle, écart de magnitude étoile/compagnon = 5 (facteur 100). Les deux images du compagnon sont perceptibles sur l'image brute (deux points rouges encerclés).

6 magnitudes) avec une large bande spectrale de travail (1,9 à 2,5 μm). Les figures 5 présentent des images obtenues en laboratoire sur une étoile artificielle.

Le CIA a démontré sa capacité à sonder l'environnement stellaire angulairement très proche d'une étoile (plus proche qu'un rayon d'Airy, dépassant ainsi la limite théorique de la diffrac-

tion) et avec un taux de réjection atteignant, en laboratoire, plus de six magnitudes sur une large bande spectrale (plus étendue que la fenêtre K de l'atmosphère). Ces performances valident l'approche interférentielle et le déphasage achromatique, ainsi que la capacité à sonder l'environnement stellaire au-delà des performances de l'imagerie conventionnelle. •

BIBLIOGRAPHIE

Principe d'un coronographe interférentiel, J. Gay & Y. Rabbia, 1996, C. R. Acad. Sci. Paris, t. 322, Série II b, pp. 265-271, 1996.

Achromatic Interfero Coronagraphy I : Formalism & Theoretical Capabilities for Ground-based observations, P. Baudoz, Y. Rabbia, J. Gay, 2000, A&A Suppl. 141, 319-329.

Achromatic interfero coronagraphy : II. Effective performance on the sky, Baudoz, P.; Rabbia, Y.; Gay, J.; Burg, R.; Petro, L.; Bely, P.; Fleury, B.; Madec, P.-Y.; Charbonnier, F., 2000, A&A Suppl. 145, 341-350.

Achromatic Interfero Coronagraphy and VLT, Rabbia, Y; Baudoz P; Gay J., 2001, Proc of ESO workshop "Scientific Drivers for future

ESO VLT/VLTI instrumentation", Bergeron & Monnet Editors, pp 273-278.

A jupiter-mass companion to a solar-type star, Mayor M. & Queloz D, Nature, vol. 378, 1995, p.355

A study of the solar corona and prominences without eclipses, Lyot B., MNRAS, vol. 99, 1939, p. 580

A stellar coronagraph with phase mask, Roddier F. & Roddier C., P.A.S.P., vol. 109, 1997, p 815

The Four-Quadrant Phase-Mask Coronagraph. I. Principle, Rouan, D.; Riaud, P.; Boccaletti, A.; Clénet, Y.; Labeyrie, A., P.A.S.P., vol. 112, 2000, p.1479.

Continuum[®]
An Excel Technology Company

Leopard[™]

**Picosecond
Nd:YAG Laser**

**Ideal for Spectroscopy
and Streak Camera
Experiments**



Excellent Beam Quality

**3 Pulse Width Ranges
Available**

**Passive Negative
Feedback for Excellent
Energy Stability**

**Possibility to Pump an
OPA/OPG**

EXCEL
TECHNOLOGY FRANCE

1, Avenue de Garagliano
F - 91 600 Savigny sur Orge
Tel: 0033 (0) 1 69 12 29 80
Fax: 0033 (0) 1 69 44 85 47
Email: info@excel-france.com

www.continuumlasers.com