



## Optical techniques for direct imaging of exoplanets/Techniques optiques pour l'imagerie directe des exoplanètes

### Foreword

Since the first detection of an exoplanet around 51 Pegasi by Mayor and Quéloz [1] at the *Observatoire de Haute Provence*, more than 230 planetary systems have been detected in an indirect way, most of them using radial velocities. As I am writing these lines, the first detection of a possible exo-Earth in the habitable zone has just been announced around Gl 581 using the HARPS radial velocity instrument at La Silla in Chile. Exoplanetary systems are not identical copies of our solar system. A large number of detections correspond to giant planets orbiting very close to their stars, just where the old theories prohibited their existence, which shows, if necessary, the fundamental importance of observation in astronomy. An interactive catalogue, remarkably held up to date by Jean Schneider, can be found at [exoplanet.eu](http://exoplanet.eu). This site also takes into account the intense international activity on the subject and is a good point to start a trip to exoplanets via the Internet.

Now the main objective in this field of astronomy is to resolve exoplanets from their stars and perform a spectral analysis of their radiation. The underpinning of this goal appears in the first direct observations of four giant planets around brown dwarf stars ([exoplanet.eu/catalog-imaging](http://exoplanet.eu/catalog-imaging)), even if the classification of these objects as planets is not universally recognized (Boss [2]). The ambition of the Darwin and Terrestrial Planet Finder projects is the detection of an exo-Earth and the search for extraterrestrial life. Within 10 parsecs, or 32.6 light years, there are about 250 stars, of which 20 of solar type are known (see for example [www.chara.gsu.edu/RECONS](http://www.chara.gsu.edu/RECONS)). For a nearby system similar to our own, the angular distance between the Earth-like planet and its star will be larger than 0.1 second of arc, which is not a strong requirement in terms of angular resolution.

According to the Rayleigh criterion ( $1.22\lambda/D$ ), a telescope of just  $D \sim 1.2$  m should be enough to do detect this in the visible. Larger wavelengths are less resolving and a telescope of 25 m would be needed at 10  $\mu\text{m}$ , but the conditions in terms of dynamics are the most favorable there. The star to planet ratio in the visible should be of the order of one to ten billion, and just one to one million at 10  $\mu\text{m}$ . But the Rayleigh criterion, which assumes sources of comparable brightness, does not apply to these observations. The criterion proposed by Jacquinot for the detection of weak spectral lines is more adequate: it simply imposes that the level of the planet overcomes that of the diffraction wings of the star. This criterion, which does not include the signal to noise ratio aspect, is somewhat pessimistic, but it is commonly used because it is simple and pictures well the problem. Since the envelope of the Airy pattern decreases as the cube of the distance to its center, dynamic compensating for resolution, a similar perfect space-born giant aperture of diameter 1 kilometer would be necessary in the visible or in the infrared. Present technology cannot envisage such an instrument, but one can fortunately take advantage of the mutually incoherent nature of the planet and star wavefronts to use an ad hoc instrumentation to cancel the starlight and make the planet visible. There is an extraordinary effervescence in this domain, new proposals appearing continuously. The 17 papers presented in this issue cannot exhaust the subject. They give an overview of the state of the art in the field and give original results. A rapid thematic presentation of the contributions in the order of appearance is now given.

Techniques for direct detection of exoplanets are generally divided between coronagraphs and nulling interferometers. Coronagraphs originated with the instrument invented by Lyot [3] for the observation of the solar corona without eclipses (the corona is a million times fainter than the photosphere). Coronagraphs are complex systems operating as spatial filters. Basically they use two diaphragms, the Lyot mask in the focal plane and the Lyot stop in an image of the aperture. Lyot masks tend to reject the starlight outside an image of the aperture where the Lyot stop blocks it. The planet light goes unaffected through the diaphragm. Several masks have been proposed: the basic ones are opaque or of variable amplitude, but they can also be transparent with phase transmissions. A presentation of coronagraphs is

given here in the introductory paper of Ferrari et al., that of Balasubramanian et al. which focuses on the realization of masks, and the paper of Rouan et al. for the four quadrant phase masks and its variations.

Apodizing systems are generally associated to coronagraphs, while operating on a different mode. In these systems, there is no light rejection, but cancellation of the diffraction wings or feet, from where the name apodizer originates. The result is obtained using a pupil with a variable transmission. Apodization for exoplanet detection was proposed by Nisenson and Papaliolios [4]. The technique has been known in optics for a long time and was extensively described in the review paper of Jacquinot and Roizen-Dossier [5] who mentioned their utilization for the observation of the companion of Sirius (Sinton [6]). This technique is presented here in the papers of Kasdin et al. for shaped apertures and Guyon for the PIAA, who also proposes a comparison of various coronagraphic systems.

Because an extreme performance is needed, the observation is strongly affected by instrumental defects at the origin of the so-called residual speckles. This problem is crucial and probably sets the actual limit of detection of existing coronagraphs. The papers by Galicher and Baudoz, and by Shao both use the coherency of the starlight for calibration of residual speckles. The paper by Bordé and Traub describes an iterative technique for speckle noise reduction. The paper by Sivaramakrishnan et al. presents the results obtained with the first extreme adaptive optics coronagraph that can be considered as a precursor for future ground based projects such as SPHERE and the Gemini Planet Imager described here by Macintosh et al., and space projects such as the project SPICA presented by Abe et al.

The achromatic interfero-coronagraph of Rabbia et al. constitutes a transition between coronagraphs and nulling interferometers. Although applied to a monolithic pupil it behaves like a nulling system. This was already the case for the nulling coronagraph of Shao quoted above. Nulling interferometers originated with the proposal of Bracewell [7] who describes a Michelson stellar interferometer for which the pupils are recombined after a phase shift of  $\pi$  is applied between them. The system operates as an amplitude-division interferometer. The rejection of the starlight is made through an image of the recombined entrance aperture. These systems usually operate in integrated mode, projecting on the sky a chart of transmission. The rule of the game is to put the star in a null of transmission and the planet in a maximum. The paper by Danchi and Lopez describes the possibilities enabled by such an instrument and that of Ollivier gives the expected performances of the projects DARWIN and TPF. The paper by Rouan proposes a modeling of the transmission chart based on a fractal method to define optimal telescope configurations. The article by Labeyrie compares the performance of various types of telescopes for imaging exoplanets, and in particular the hypertelescopes, which consist in a manipulation (a densification) of diluted apertures. This series of articles ends with the external occulter of Arenberg et al. which reproduces, mutatis-mutandis, the conditions of a natural solar eclipse.

The order of the papers in these reports follows a conventional scheme, roughly from diffracting to interferential systems. In a less conventional way, I would suggest to differentiate these systems into four types, depending on the way they get rid of the stellar light. For the first type we may consider the instruments that *avoid* letting the stellar light to enter the telescope (the external occulter). On the other hand, the second type may be represented by the apodizers that *keep* the whole light in the instrument, up to the final focal plane. All other systems allow the starlight to enter the instrument but *reject* it as much as possible. These systems may be subdivided in two types: those that reject the light *outside* a geometrical image of the pupil (coronagraphs) and those that perform that rejection *through* a recombined image of their pupil (nulling systems). These rejecting systems take advantage of the coherency of the stellar wavefront. Their efficiency is naturally reduced when the coherency of the wavefront is reduced due to a finite spectral bandwidth or the angular diameter of the source. I let the reader recognize in the systems proposed here or elsewhere to which of these proposed types they may be related. A given system may be purely one of these four types, for example the four quadrant phase mask is purely of the third type, whereas most of the other coronagraphs are a mixing of types two and three. Conclusions about the efficiency of the different systems for a given observing situation could be drawn from such a simple analysis; a discussion about these aspects is, however, beyond the scope of this foreword.

## *Avant-propos*

*Depuis la première détection par Mayor et Quéloz [1] d'une exoplanète autour de 51 Pegasi à l'observatoire de Haute Provence, plus de 230 systèmes planétaires ont été détectés de manière indirecte, la plupart d'entre eux par vitesses radiales. Alors que j'écris ces lignes, la première détection d'une possible exo-Terre dans une zone habitable*

vient d'être faite par cette technique autour de Gl 581 avec l'instrument de vitesses radiales HARPS à La Silla au Chili. Les systèmes planétaires sont loin d'être de simples copies du système solaire. La majorité des détections correspondent à des planètes géantes orbitant très près de leur étoiles, là où les anciennes théories semblaient interdire leur existence, ce qui montre si nécessaire l'importance fondamentale de l'observation en astronomie. Un catalogue interactif, remarquablement tenu à jour par Jean Schneider, se trouve à [exoplanet.eu](http://exoplanet.eu). Ce site rend aussi compte de l'intense l'activité internationale sur ce sujet et est un bon point de départ pour une exploration des exoplanètes à partir d'internet.

On cherche maintenant à séparer les exoplanètes de leurs étoiles pour pouvoir faire une analyse spectrale de leur rayonnement. Des prémisses de ce but apparaissent dans les premières observations directes de quelques planètes géantes autour d'étoiles naines brunes ([exoplanet.eu/catalog-imaging](http://exoplanet.eu/catalog-imaging)), même si l'appartenance de tous ces objets aux planètes n'est pas universellement reconnue (Boss [2]). L'ambition des grands projets (Darwin, TPF) est en fait de détecter une exo-Terre pour la recherche de la vie extraterrestre. A moins de 10 parsecs, ou 32,6 années lumière, on compte environ 250 étoiles, dont une vingtaine de type solaire (voir par exemple [www.chara.gsu.edu/RECONS](http://www.chara.gsu.edu/RECONS)). Pour un système semblable au nôtre à cette distance, la séparation exo-Terre étoile serait supérieure à 0.1 seconde d'arc, ce qui n'est pas une très grande exigence en terme de résolution angulaire.

Selon le critère de Rayleigh ( $1,22\lambda/D$ ), un instrument de l'ordre de  $D \sim 1,2$  m devrait suffire dans le visible. Les plus grandes longueurs d'onde sont moins résolventes, un télescope de 25 m serait requis à  $10 \mu\text{m}$ , là où les conditions sont les meilleures en termes de dynamique. Le rapport de flux étoile planète devrait être de l'ordre de un à dix milliards dans le visible, et seulement un million à  $10 \mu\text{m}$ . Mais le critère de Rayleigh ne s'applique qu'à des sources de brillance comparable, et ne peut être utilisé ici. Le critère de Jacquinot proposé pour la détection de raies faibles, est plus adapté : il impose simplement que le niveau de la planète dépasse les ailes de diffraction de l'étoile. Ce critère, qui n'inclut pas les aspects de rapport signal à bruit, est quelque peu pessimiste, mais est communément utilisé car il est simple et donne une bonne idée du problème. Pour un système parfait, l'enveloppe de la tache d'Airy décroît comme le cube de la distance au centre de la tache, et il faudrait, pour détecter l'exoplanète un télescope géant d'environ 1 kilomètre de diamètre aussi bien dans le visible que dans l'infrarouge, le gain en dynamique compensant la perte de résolution. La technologie actuelle ne peut évidemment pas envisager un tel instrument, mais on peut heureusement profiter de l'incohérence mutuelle des fronts d'onde de l'étoile et de la planète pour utiliser une instrumentation adaptée qui va permettre de réduire de manière drastique le flux de l'étoile pour faciliter l'observation de la planète. On assiste à une effervescence extraordinaire de propositions dans ces domaines. Les 17 articles présentés ici ne peuvent prétendre épuiser le sujet. Tout en donnant l'état de l'art dans ce domaine, plusieurs d'entre eux présentent des résultats vraiment originaux. Voici un survol thématique rapide de ces contributions, dans l'ordre où ils apparaissent dans ce recueil.

Les techniques pour la détection directe des exoplanètes sont généralement divisées en coronographes et systèmes annulleurs. Les coronographes ont leur origine dans le coronographe de Lyot (Lyot [3]) pour l'observation de la couronne solaire (un million de fois plus faible que le soleil) en dehors des éclipses. Les coronographes sont des systèmes complexes, qui opèrent comme des filtres spatiaux. Pour l'essentiel, ils utilisent deux diaphragmes, le masque de Lyot dans le plan focal et le Lyot stop sur une image de la pupille d'entrée. Les masques de Lyot rejettent par diffraction la lumière stellaire en dehors de l'image de la pupille d'entrée où elle est arrêtée par le second diaphragme. La lumière de la planète passe normalement par l'image de la pupille. Divers types de masques ont été proposés : à l'origine ce sont des masques opaques ou à transmission variable, mais ils peuvent aussi être transparents et introduire des termes de phase. Une présentation de ces techniques est faite ici dans l'article introductif de Ferrari et al., celui de Balasubramanian et al. qui décrit la réalisation des masques et celui de Rouan et al. pour les coronographes de phase à quatre cadrans et leurs évolutions.

On inclut généralement dans les coronographes les systèmes apodiseurs qui opèrent sur un mode différent. Ici la lumière n'est plus rejetée, mais concentrée dans la tache de diffraction. On obtient ce résultat en modifiant la transmission de la pupille. Pour les exoplanètes, la proposition a été faite par Nisenson et Papaliolios [4], mais la technique est connue en optique depuis longtemps et très bien décrite dans l'article de revue de Jacquinot et Roizen-Dossier [5] qui mentionne leur utilisation pour l'observation du compagnon de Sirius (Sinton [6]). Cette technique est représentée ici par l'article de Kasdin et al. à pupille découpée et celui de Guyon, à anamorphose de pupille, qui compare aussi plusieurs coronographes entre eux.

Comme l'on veut atteindre des dynamiques extrêmes, l'observation est fortement compromise dans les défauts résiduels instrumentaux, aussi bien au sol après correction par optique adaptative que dans l'espace. Ce problème

est crucial et fixe probablement la limite actuelle de détection des coronographes existants. Les articles de Galicher et Baudoz et celui de Shao utilisent tous les deux la cohérence de la lumière de l'étoile pour calibrer les speckles résiduels. L'article de Bordé et Traub décrit une technique pour leur réduction. L'article de Sivaramakrishnan et al. présente les résultats obtenu avec le premier coronographe utilisant de l'optique adaptative extrême qui peut être considéré comme un précurseur des projets futurs au sol tels que SPHERE ou Gemini, présenté ici dans l'article de Macintosh et al., ou les projets spatiaux tel que le projet SPICA présenté par Abe et al.

Le coronographe interférentiel achromatique de Rabbia et al. fait une transition entre les coronographes et l'interférométrie annulante. Bien qu'appliqué à un objectif à pupille monolithique, il présente les caractéristiques principales des systèmes annuleurs. Ceci est vrai également pour le système de Shao précédemment cité. Les systèmes annuleurs ont leur origine dans la proposition de Bracewell [7] qui est un interféromètre à deux télescopes de type Michelson pour lequel les pupilles sont recombinaées après qu'un déphasage de  $\pi$  ait été appliqué à l'une des voies. C'est un interféromètre à division d'amplitude. La réjection de la lumière de l'étoile se fait à travers une image de la pupille d'entrée. Pour la plupart d'entre eux ces systèmes fonctionnent en mode intégré, projetant sur le ciel une carte de transmission où l'on place l'étoile dans un nul de transmission et de manière optimale la planète sur une zone de forte transmission. L'article de Danchi et Lopez décrit les possibilités d'un tel instrument et celui de Ollivier donne les performances attendues des grands projets européens et américains DARWIN et TPF (Terrestrial planet finder). L'article de Rouan propose une modélisation de la carte de transmission basée sur une méthode fractale et une méthode pour optimiser les configurations de télescopes. L'article de Labeyrie compare les performances des divers types de télescopes pouvant fournir des images des exoplanètes, et en particulier les hypertélescopes, qui sont des systèmes à densification de pupille. Cette collection d'articles se termine avec le système à occulteur externe de Arenberg et al. qui reproduit, mutatis mutandis, les conditions bien connues d'une éclipse solaire.

L'ordre des articles présentés dans ce recueil a suivi un classement très habituel, allant globalement des diffractants aux interférentiels. De manière moins conventionnelle, je suggérerais de différencier ces systèmes en quatre types, selon leur comportement par rapport au flux lumineux stellaire. Il y a ceux qui évitent que le flux stellaire entre dans l'instrument (les occulseurs externes), ceux qui conservent tout le flux mais réduisent les effets de la diffraction (les apodiseurs), et tous les autres qui rejettent tout ou partie de la lumière stellaire qui est entrée dans l'instrument. Ces derniers se subdivisent en deux grands types, ceux qui rejettent la lumière en dehors de l'image géométrique de la pupille (les coronographes) et ceux qui rejettent la lumière à travers l'image de leur pupille (les interféromètres annuleurs). Les systèmes qui rejettent la lumière tirent parti de l'aspect cohérent du front d'onde. Leur efficacité est réduite quand cette cohérence diminue, soit à cause de la largeur de bande spectrale, soit à cause du diamètre de l'étoile. Je laisse au lecteur le soin de reconnaître dans chacune des propositions présentées ici ou ailleurs le type du système présenté. Par exemple, certains systèmes, comme le quatre cadrans, sont purement d'un type, alors que beaucoup d'autres coronographes agissent tout autant par apodisation que par réjection de flux. Des conclusions pourraient être tirées sur l'efficacité des différents systèmes pour une observation donnée à partir de cette simple approche ; ceci dépasse les objectifs de cet avant-propos.

Claude Aime  
 LUAN – UMR 6525 du CNRS,  
 université de Nice Sophia Antipolis,  
 parc Valrose,  
 06108 Nice cedex 2, France  
 URL: <http://www-luan.unice.fr>

Available online 15 June 2007

## References

- [1] M. Mayor, D. Queloz, A Jupiter-mass companion to a solar-type star, *Nature* 378 (1995) 355.
- [2] A.P. Boss, WG on extrasolar planets, in: IAU Transactions XXVIA, Reports on Astronomy, 2007, p. 183.
- [3] B. Lyot, *Z. Astrophys.* 5 (1932) 73.
- [4] P. Nisenson, C. Papaliolios, *Astrophys. J. Lett.* 548 (2001) L201.
- [5] P. Jacquinet, B. Roizen-Dossier, *Prog. Opt.* 3 (1964) 31.
- [6] W.M. Sinton, *J. Opt. Soc. Am.* 42 (1952) 284.
- [7] R.N. Bracewell, *Nature* 274 (1978) 780.