

## **Astrophysique observationnelle**

M. Antoine LABEYRIE, membre de l'Institut  
(Académie des Sciences), professeur

L'évolution actuelle des techniques d'observation astronomique annonce une amélioration considérable de la résolution angulaire : quatre ordres de grandeur dans la décennie qui vient, et encore un ou deux lorsque des bases interférométriques de 10, voire 100 km deviendront utilisables dans l'espace. La pénétration observationnelle de la civilisation terrienne vers l'univers proche et lointain s'en trouvera grandement améliorée.

Tout repose sur la maîtrise des télescopes « dilués », c'est à dire formés d'une mosaïque d'éléments collecteurs de lumière, espacés d'une distance bien supérieure à leur diamètre. Ces instruments sont équivalents à un télescope gigantesque devant lequel on aurait placé un masque percé d'ouvertures beaucoup plus petites. Les images produites par chacune sont recombinaison de façon cohérente au foyer commun. La recombinaison engendre des interférences qui apportent une information angulaire à la même échelle que le ferait l'ouverture entière, non masquée.

Différentes façons d'atteindre ces résultats font l'objet d'essais actuellement, et l'on ne sait pas encore quelle sera la voie privilégiée des évolutions à venir. Au-delà de la recherche des meilleures solutions mécaniques et optiques, des points obscurs subsistent dans la théorie de la formation des images et les algorithmes de mise en phase des éléments.

### *Formation des images par recombinaison de type Michelson dans un interféromètre à ouvertures multiples*

La formation des images par un grand interféromètre à ouvertures multiples a été très étudiée de façon théorique et expérimentale depuis les premières observations à deux télescopes effectuées en 1974. J'ai pu apporter quelques éclaircissements cette année au cas, important pour les projets actuels, des grandes ouvertures très diluées. Le problème est de parvenir à reconstituer le mieux possible l'image de l'objet céleste observé par N télescopes très espacés dont on

recombine les faisceaux lumineux. L'optique de recombinaison peut ou non respecter la disposition des ouvertures.

Dans le premier cas il s'agit de la recombinaison naturelle, ou de type Fizeau, qui fait de l'interféromètre l'équivalent d'un télescope géant qui porterait devant son ouverture un masque percé de  $N$  trous. Dans le second il s'agit du « mode Michelson », lequel peut ou non respecter la disposition des centres de sous-pupilles. Lorsque, en mode Michelson, seul le grandissement relatif des sous-pupilles est modifié, la disposition de leurs centres étant préservée, le système présente une propriété favorable qui n'avait peut-être pas été remarquée jusqu'ici : le pic d'interférence, image d'une source ponctuelle, subsiste lorsque la source se déplace. Dans la limite de la tache de diffraction des sous-pupilles, dont l'effet est comparable à celui d'une fenêtre, il en résulte que l'image d'un objet étendu est donnée par une convolution, comme c'est le cas pour les systèmes de type Fizeau. Mais ce montage évite l'inconvénient majeur du Fizeau, qui est l'éparpillement de l'énergie dans un grand nombre de pics secondaires.

Le mode de fonctionnement ainsi défini permettra en principe d'attaquer avec quelques chances de succès un problème observationnel aussi difficile que la formation d'images montrant des détails résolus sur des planètes extra-solaires. Il se trouve que la première découverte d'une telle planète, par la méthode spectroscopique qui détecte indirectement la présence d'un corps près d'une étoile, a été annoncée quelques jours avant le cours.

Avant de songer à obtenir une image résolue de ce genre d'objet il faudra d'abord obtenir une image non-résolue, c'est à dire où la planète apparaît sous la forme d'un point brillant près de l'étoile. Cela est déjà en soi très difficile, étant donné la faible luminosité relative de la planète.

Quelques propositions nouvelles pour la recherche de telles planètes ont été présentées récemment. Il s'agit notamment de méthodes d'occultation, ou utilisant l'effet de micro-lentilles gravitationnelles, ou l'imagerie utilisant des interférences destructrices pour la lumière de l'étoile.

La méthode « des tavelures noires » présentée lors du cours des années précédentes, est apparentée à cette dernière catégorie.

### *La résolution théorique est-elle atteignable avec les rayons X ?*

Aux longueurs d'ondes des rayons X, les observations astronomiques pourraient atteindre, avec des petites ouvertures de 10 cm, des résolutions élevées si l'on parvenait à exploiter l'image jusqu'à la limite de diffraction. Il n'est pas exclu d'y parvenir, au moyen de miroirs à incidence normale, rendus réfléchissants par des empilements de couches minces, et ayant une très longue distance focale, de l'ordre du kilomètre pour un diamètre de quelques centimètres. En raison du faible débit de photons, le guidage devra être particulièrement précis. Étant donnée l'extrême qualité optique nécessaire pour atteindre la limite de diffraction aux

longueurs d'ondes X, des techniques de déformation adaptative pourraient aussi être nécessaires. On peut aussi recourir à l'interférométrie des tavelures si l'on ne parvient pas à obtenir une image limitée par la diffraction et parfaitement guidée, mais c'est au prix d'une dégradation du signal.

*Perspectives d'utilisation de voiles solaires comme télescopes*

Depuis la description, par l'auteur de fiction scientifique Arthur Clarke, de grandes voiles solaires destinées à la navigation interplanétaire, l'utilisation de telles structures a été étudiée, notamment par la NASA, pour l'exploration du système solaire.

De telles voiles pourraient éventuellement servir en même temps de télescope si l'on parvient à donner une qualité de surface suffisante à la fine membrane réfléchissante dont elles sont constituées. J'ai évoqué dans le cours différentes approches du problème de la fabrication de telles membranes et du maintien de leur forme à un niveau de précision suffisant pour les applications optiques.

L'une des solutions entrevues pourrait en principe permettre de faire voyager une voile jusqu'à l'étoile la plus proche en une dizaine d'années, si l'on suppose qu'un puissant laser éclaire la voile au début du trajet. Le laser lui-même serait constitué d'une vaste membrane directement excitée par la lumière solaire, et dont l'émission fluorescente serait rendue cohérente et très directive grâce à une configuration particulière de la cavité laser (figure 1).

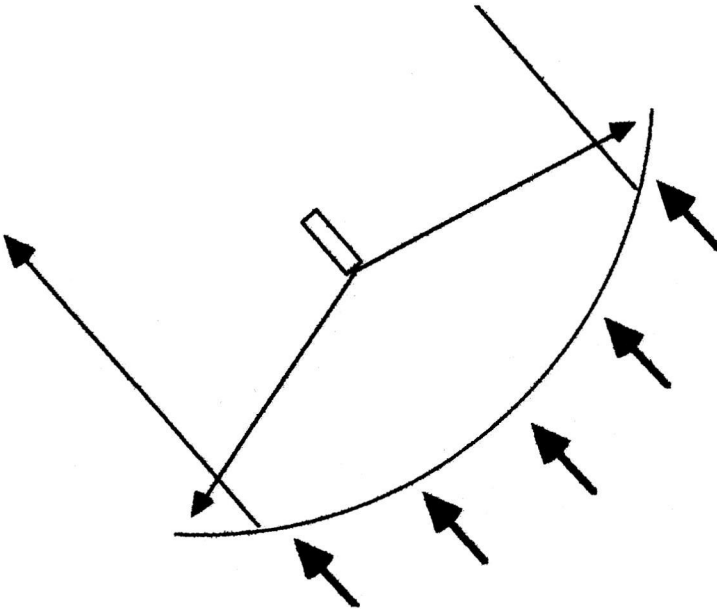


Figure 1 : principe éventuellement utilisable dans l'espace pour obtenir un faisceau laser de forte puissance et faible divergence, capable de propulser une

voile solaire jusqu'à une étoile proche. Une structure à profil parabolique, éventuellement constituée de cellules indépendantes, absorbe la lumière solaire (flèches épaisses) laquelle alimente l'émission laser des cellules. Pour former une onde plane se propageant dans la direction axiale (flèches pleines), l'émission est mise en phase par un petit laser pilote situé au foyer du paraboloïde et éclairant la structure (flèches en pointillé). Des photopiles de faible puissance, non représentées, alimentent le laser pilote. Il faudrait que le rendement de l'émission laser atteigne 100 % pour que la structure ne subisse aucune pression de radiation axiale. Sa position peut être stabilisée en ajustant sa masse, soumise à l'attraction Newtonienne du Soleil et compensant la pression de radiation.

Une autre mission envisageable au moyen de voiles solaires, à une moindre distance, concernerait le foyer gravitationnel du Soleil, où sont focalisées les ondes et particules provenant de sources lointaines. Un mécanisme permettant de stabiliser la forme d'une voile qui s'y dirigerait utiliserait la pression de radiation solaire, contrôlée activement pour déformer la voile.

#### *Recherche télescopique des ondes gravitationnelles*

La détection des ondes gravitationnelles par leur effet de lentille, déjà évoquée les années précédentes, soulève des problèmes théoriques encore mal éclaircis. L'effet observable est une modulation de l'intensité pour les sources lumineuses situées à l'arrière plan de la source d'ondes gravitationnelles. Lorsque le télescope ne résout pas la longueur d'onde gravitationnelle, cependant, ce qui est généralement le cas pour les pulsars, l'effet peut être atténué si la source lumineuse apparaît elle-même sous un angle plus grand que la longueur d'onde gravitationnelle. Il faut donc rechercher la présence de quasars dans le champ de pulsars.

Ainsi, l'identification de sources d'ondes gravitationnelles observables est-elle délicate.

A.L.

#### SÉMINAIRES D'ASTROPHYSIQUE GÉNÉRALE AU COLLÈGE DE FRANCE

Denis GILLET, (*Observatoire de Haute Provence*), Les Étoiles Pulsantes : atmosphère hypersonique.

José Antonio DE FREITAS PACHECO, (*Observatoire de la Côte d'Azur*), L'émission d'ondes gravitationnelles par des pulsars actifs.

Philippe VERON, (*Observatoire de Paris*), Les quasars.

Anne-Marie LAGRANGE-HENRI, (*Observatoire de Grenoble*), Recherche de systèmes planétaires avec coronographe.

Roger FERLET, (*Institut d'Astrophysique, Paris*), La détection de planètes extra solaires par l'effet de micro lentille.

Alain LÉGER, (*Institut d'Astrophysique, Saclay*), Recherche de planètes hors du système solaire — pourrait-on y détecter la présence de vie primitive ?.

Marc LACHÈZE-REY, (*Service d'Astrophysique, Saclay*), La masse cachée, expansion et âge de l'Univers.

Laurent NOTTALE, (*Observatoire de Paris-Meudon*), La relativité d'échelle : applications en cosmologie.

### **Travaux de recherches effectués par le groupe d'interférométrie stellaire à l'Observatoire de Calern et l'Observatoire de Haute Provence**

**Observations interférométriques à Calern** (Denis Mourard, Philippe Stée, Isabelle Tallon-Bosc, Farrokh Vakili, Laurent Kœchlin, Daniel Bonneau, Frédéric Morand)

Les observations effectuées avec le Grand Interféromètre à deux Télescopes (GI2T) ont donné lieu à la publication d'articles concernant les étoiles gamma Cassiopée, delta Céphée, et beta Lyre. La construction d'une nouvelle table de recombinaison est poursuivie en collaboration avec le Laboratoire d'Astronomie Spatiale et le groupe de projet de l'Observatoire de la Côte d'Azur.

**Projet de Grand Interféromètre à Trois Télescopes (GI3T)** (Denis Mourard, Sylvie Bédélian-Dutertre, Luc Arnold, Julien Dejonghe, Claude Cazalé, Jean Pierre Berger, Ettore Pedretti, Emmanuel Laurent, D. Vernet)

Le projet d'un « Optical Very Large Array » ou Très Grand Réseau Optique reste l'objet du principal effort de l'équipe et bénéficie dans l'actuelle phase préliminaire des moyens disponibles à l'Observatoire de Haute Provence. Un télescope prototype y est en construction, et il est prévu qu'il rejoigne l'interféromètre GI2T sur le site de Calern pour constituer un interféromètre à trois télescopes, le GI3T, lui-même précurseur du OVLA. Le polissage du miroir de 1,52 m du télescope prototype a été mené à bien. La construction d'un support actif est en cours.

L'un des aspects critiques des grands interféromètres réside dans le positionnement des éléments optiques, qui devrait idéalement être obtenu avec une précision atteignant une fraction de micron, pour satisfaire à la tolérance de Rayleigh. L'étude d'un système de mesure des positions avec des faisceaux de laser a été poursuivie par E. Laurent pendant son stage de DEA. Il a eu l'idée d'une disposition nouvelle des faisceaux lasers qui pourrait simplifier notablement le système.

**Méthode des tavelures noires pour la recherche de planètes extra-solaires** (A. Boccaletti, D. Kœhler, G. Knispel, A. Labeyrie)

A. Boccaletti, stagiaire de DEA, a construit un montage optique de simulation, comportant une étoile simulée, avec une planète simulée, de la turbulence artificielle, un télescope avec coronographe, et un détecteur. Il a analysé les signaux du détecteur pour en extraire le signal attribuable à la planète. Les premiers essais, à l'aide d'une diode à avalanche, lui ont permis de détecter en 25 secondes d'observation la planète simulée, située à une demi-seconde d'arc de l'étoile, lorsqu'elle est un million de fois moins lumineuse que cette dernière.

A l'occasion d'une mission sur le télescope de 1,52 m de l'Observatoire de Haute Provence, mission destinée aux essais d'une nouvelle optique adaptative construite par l'ONERA, la méthode a été expérimentée sur les étoiles. L'analyse des résultats est en cours.

Les premiers essais confirment les prévisions théoriques du signal et du bruit. Ils montrent que la méthode améliore la détection des détails faiblement lumineux au voisinage d'étoiles brillantes. Des enveloppes et compagnons stellaires peu lumineux devraient d'abord pouvoir être détectés. A plus long terme, des planètes extra-solaires pourraient également devenir décelables si l'on dispose de caméras détectant efficacement les photons individuels.

**Détectabilité des ondes gravitationnelles par leur effet de lentille** (C. Bracco, D. Kohler, G. Knispel, A. Labeyrie)

C. Bracco a entrepris dans ce domaine un travail de thèse, sous la direction de A. Labeyrie. Il a repris les calculs de l'effet de lentille des ondes gravitationnelles, effet qui pourrait permettre de détecter ces ondes par observation au télescope. En établissant des expressions analytiques, qui manquaient jusqu'ici, pour l'intégrale de chemin optique le long d'un rayon lumineux, il précise les conditions d'observabilité de l'effet.

Une première tentative observationnelle a été effectuée en Juin 1996 par C. Bracco au télescope de 193 cm de l'observatoire de Haute Provence, à l'aide d'une diode à avalanche permettant un comptage rapide des photons.

#### PUBLICATIONS

« The diameter of  $\delta$  Cephei measured by optical long-baseline interferometry », D. Mourard, D. Bonneau, L. Kœchlin, A. Labeyrie, F. Morand, Ph. Stee, I. Tallon-Bosc, F. Vakili, *Astron. Astrophys.*, sous presse, 1996.

« Resolved imaging of extra-solar planets with future 10-100 km optical interferometric arrays », A. Labeyrie, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 118, 517-524 (1996).

« An attempt to detect polarization effects in the envelope of  $\gamma$  Cas with the GI2T interferometer », K. Rousselet-Perraut, F. Vakili, D. Mourard, F. Morand, D. Bonneau and Ph. Stee, sous presse, 1996.

« Stellar interferometry in polarized light », K. Rousselet-Perraut, F. Vakili and D. Mourard, *Optical Engineering*, sous presse, 1996.

« Jet-like structures in  $\beta$  Lyrae ? », P. Harmanec, F. Morand, D. Bonneau, H. Bozic, et al, *Astron. Astrophys.*, sous presse, 1996.

« Dispersed fringe tracking with the multi- $r_0$  apertures of the GI2T », Kœchlin L., Lawson P.R., Mourard D., Blazit A., Bonneau D., Morand F., Stee Ph., Tallon-Bosc I. & Vakili F., *Applied Optics*, 35, 16, 1996.

« A Lunar Optical Very Large Interferometer (LOVLI) with simplified optics », Arnold L., Labeyrie A., Mourard D., *Advances in Space Research*, sous presse, 1996.

«  $\gamma$  Cas Revisited by spectrally resolved interferometry », Stee Ph., Xavier de Araujo F., Vakili F., Mourard D., Arnold L., Bonneau D., Morand F., and Tallon-Bosc I., *Astron. Astrophys.*, 300, pp 219-236, 1995.

« Uniform load and actuator influence functions of a thin or thick mirror : application to active mirror support optimization », L. Arnold, *Applied Optics*, 357, 1095-1106, 1996.

« First direct mass determination for a pre-main sequence star : DF Tau », E. Thiébaud, Y. Balega, I. Balega, I. Belkine, A. Blazit, D. Bonneau, J. Bouvier and R. Foy, *Astron. Astrophys.*, 304, L17, 1995.

« Effects of the atmospherical spectral decorrelation on the visibility measurements in Michelson Interferometry », P. Berio, D. Mourard, F. Vakili, J. Borgnino, and A. Ziad, *soumis JOSA*, 1996.

« Polarization effects in aperture synthesis array », K. Rousselet-Perraut, F. Vakili and D. Mourard, *soumis Optical Engineering*, 1996.

« Influence functions of a thin shallow meniscus-shaped mirror », L. Arnold, *soumis Applied Optics*, 1996.

« Evidence for asymmetrical structures in the wind of P Cygni », F. Vakili, D. Mourard, D. Bonneau, F. Morand and Ph. Stee, *Astron. Astrophys.*, en *préparation*, 1996.

« Evidence for long term variable sub-milliarcsecond structures in the hydrogen envelope of  $\gamma$  Cas », *Astron. Astrophys.*, en *préparation*, 1996.

### Communications à des colloques

L. Arnold, Journées Scientifiques de la SFSA, 10-12 avril 1996, Strasbourg, France, *Journal des Astronomes Français*, sous presse, 1996.

L. Arnold, CNRS-NSO International Workshop on Mirror Substrates Alternatives, 9-11 octobre 1995, Grasse, France, J.P. Rozelot, Éd., 1995.

« Interférométrie et l'Horizon 2000 + d'ESA », F. Vakili, S. Loiseau, Forum PNHRAA, octobre 95, Éd., sous presse.

« Feasibility of detecting lost planets by diffractive lensing surveys », A. Labeyrie, 2nd International Workshop on Gravitational Microlensing Surveys, Orsay, 29-31 janvier 1996.

« Laser semi-conducteur et stockage de données sur disque par effet Lippmann », A. Labeyrie, 15<sup>e</sup> Journées Nationales d'Optique Guidée, Palaiseau, 6-8 novembre 1995.

### *Sur invitation*

D. Mourard, « Observations of Cepheids with the VLTI », workshop ESO, Science with the VLTI, Garching, 18-21 juin 1996, sous presse.

F. Vakili, « Diagnosis value of interferometry for studying Be stars », ESO workshop, Science with the VLTI, Garching, 18-21 juin 1996, sous presse.

A. Labeyrie, Congrès de la Société Française de Physique, Marseille, octobre 1995.

A. Labeyrie, Congrès de la Société Européenne d'Astrophysique, Catane, novembre 1995.

A. Labeyrie, « Current steps towards kilometric arrays of many telescopes : prospects for snapshot images with 0.0001 resolution, Optical Telescopes of Today and Tomorrow, Landskrona, Suède 29 mai-2 juin 1996.

### **Conférences publiques (A. Labeyrie)**

Conférence publique à l'occasion du congrès de la Société Française de Physique, Marseille, octobre 1995.

Conférences publiques à Saint Etienne les Orgues et à Manosque