

Astrophysique observationnelle

M. Antoine LABEYRIE, professeur

Cours : *Vers l'observation optique à haute résolution* (suite)

1. Recherche de masses invisibles par les effets diffractifs de la lentille gravitationnelle

L'année précédente, j'avais discuté une technique d'observation envisageable, utilisant la diffraction de lentilles gravitationnelles pour rechercher la présence de masses stellaires ou sub-stellaires qui pourraient se trouver à des distances de l'ordre de l'année lumière. Des impulsions lumineuses pourraient être perçues lorsque l'ouverture d'un télescope est traversée par les taches de diffraction que produit une lentille gravitationnelle avec la lumière d'étoiles plus éloignées sur la ligne de visée. Cela m'a conduit à une publication⁵ et amené à préciser les conditions et limitations de la méthode, à la lumière notamment de remarques exprimées par A. Gould (Institute for Advanced Studies Princeton) et R. Narayan. Leur expertise critique du manuscrit soumis m'a notamment conduit à calculer comment la sphéricité imparfaite des masses considérées dégrade la figure de diffraction projetée sur Terre. Le calcul de figures perturbées, pour des masses légèrement aplaties, montre qu'un aplatissement comparable à celui de la Terre convient encore, quoiqu'il réduise sensiblement le domaine de distances où la méthode est applicable. Compte tenu des évaluations plus précises ainsi obtenues, et lorsque l'on disposera de grands télescopes limités par la diffraction, la méthode apparaît effectivement applicable pour rechercher au voisinage du système solaire des masses invisibles. Un corps céleste trois fois moins massif que la Terre, éloigné de 40 000 unités astronomiques dans la direction d'une galaxie située à 2 mégaparsecs, produit un événement tous les 22 jours en moyenne. Si le corps céleste a le même aplatissement que la Terre, dans 16 % des cas son axe est suffisamment peu incliné pour que la tache de diffraction visible ne soit pas dégradée. Chaque événement dure 5,3 millisecondes et apporte 220 photons dans un télescope de 15 mètres, si la largeur spectrale utilisée est 300 nanomètres.

Lors d'un cours donné à l'Université de Nice, j'ai aussi examiné l'information que de telles observations pourraient en principe apporter sur la structure interne des masses ainsi détectables par leur champ de gravitation proche. La figure de diffraction projetée sur Terre est en effet sensible à la forme de l'objet, ou plutôt à sa distribution de masse intégrée le long de la ligne de visée. Si l'objet est en rotation, une reconstruction tomographique de cette distribution, en 3 dimensions, est envisageable. Beaucoup reste à faire pour juger l'intérêt éventuel d'une telle méthode.

2. *Observations récentes des pulsars binaires*

Le travail de Hulse & Taylor sur les pulsars binaires, qui a été distingué cette année par un prix Nobel de physique, a mis en lumière l'intérêt de ces objets en tant que démonstrations de phénomènes gravitationnels extrêmes. Les résultats des observations récentes sur ces objets ont apporté des précisions sur leur nature.

3. *Les ondes gravitationnelles sont-elles détectables près de leurs sources, par leur interaction avec la lumière venue de l'arrière-plan ?*

L'effet prévisible d'une source d'ondes gravitationnelles, binaire rapide ou pulsar par exemple, sur la lumière qui passe à proximité a été considéré dans le cours de 1991-1992. Les calculs que j'ai publiés à la suite de ce cours montrent que l'émission d'ondes gravitationnelles par des pulsars ou binaires rapides pourrait être détectable de cette façon. La méthode consiste à faire de la photométrie rapide, et synchrone, dans le champ étroit entourant un pulsar ou une étoile double rapide. Une modulation détectée sur l'une des étoiles du fond, à une fréquence double de celle du pulsar, indiquerait la présence d'une onde gravitationnelle. J'ai précisé cette année les conditions pratiques de telles observations : il faudrait que le pulsar apparaisse devant une galaxie proche, dont les étoiles soient résolues et néanmoins d'un diamètre apparent inférieur à la longueur d'onde apparente de l'onde gravitationnelle. Du fait de la détection synchrone, l'étoile considérée peut être de magnitude élevée.

4. *Images de planètes extra-solaires : nouvelles approches*

Le problème de la détection d'exo-planètes a déjà été abordé les années précédentes. J'y suis revenu cette année en décrivant deux méthodes d'observation, plus élaborées, qui devraient faciliter cette détection.

Il s'agit d'abord d'une méthode qui serait utilisable au sol avec de grands télescopes adaptatifs, c'est-à-dire équipés pour corriger la turbulence atmosphérique. L'idée est d'exploiter les tavelures noires, ces interférences destructives qui apparaissent occasionnellement et de façon aléatoire dans l'image monochromatique d'une étoile non résolue. Si la turbulence atmosphérique est

corrigée partiellement par une optique adaptative, des tavelures subsistent autour de la partie centrale de l'image ; c'est-à-dire dans la zone périphérique où les planètes éventuelles ont le plus de chances de se trouver. Lorsqu'une tavelure noire apparaît brièvement à l'endroit où se trouve une telle planète, relativement peu brillante, la visibilité de cette planète s'en trouve améliorée. L'effet peu être analysé statistiquement pour engendrer une image de la zone intéressante, débarrassée du halo lumineux venant de l'étoile. A partir d'un grand nombre de poses courtes, on peut calculer une « carte noire » dont les pixels sont noircis lorsqu'apparaît à la position correspondante une tavelure noire. Cette carte s'assombrit progressivement lorsqu'augmente le temps d'observation, sauf à l'endroit des planètes qui apparaissent ainsi sous forme de taches plus claires. Un algorithme plus élaboré, que j'ai programmé et expérimenté avec des données simulées numériquement, consiste à additionner les négatifs des poses et calculer ensuite une version positive du résultat. Les résultats de simulation, que j'ai soumis pour publication, montrent que des planètes apparaissent en quelques heures d'observation si leur éclat relatif est un milliardième de celui de l'étoile. En pratique, de telles observations pourraient être déjà tentées dans l'infra-rouge proche avec les systèmes existants d'optique adaptative.

Une méthode différente mais exploitant aussi les tavelures noires serait applicable dans l'espace, avec de grands télescopes équipés d'optique active. Dans ce cas, l'on pourrait faire apparaître n'importe où dans la zone tavelée de l'image stellaire une tavelure noire statique. Il faudrait pour cela retoucher légèrement les réglages des actionneurs, tout en restant dans la tolérance de Rayleigh qui assure l'intégrité du pic central. Des simulations numériques m'ont permis de mettre au point un algorithme itératif assurant le noircissement des tavelures. La méthode est peut-être applicable sur le télescope Hubble, qui possède des actionneurs prévus pour corriger les faibles déformations du miroir.

5. Miroirs à membrane piégée, pour l'espace

De telles membranes, épaisses d'un dixième de micron par exemple et piégées par des ondes stationnaires de laser, permettront peut-être un jour de construire dans l'espace des télescopes plus légers et plus grands que ceux obtenus par les méthodes classiques. Etant donné l'extrême fragilité de la membrane, il serait nécessaire de la fabriquer *in situ*. Après avoir envisagé différents mécanismes utilisant des atomes gazeux piégés, des molécules gazeuses ou des solides, j'ai discuté la formation d'une membrane solide, cristallisée ou amorphe, à partir d'un jet atomique. Un modèle numérique permet aussi d'étudier le piégeage d'une telle structure sur la frange centrale, en modulant la couleur du laser. Les résultats de simulations montrent que le processus est chaotique si aucune dissipation d'énergie n'est présente, et ne permet pas dans ce cas de ramener une particule sur la frange centrale. Si,

par contre, se produit une dissipation due par exemple à l'échauffement visqueux d'une membrane qui subit des flexions, alors le champ laser modulé amène la membrane vers la frange centrale et l'y maintient. Des essais sont envisagés en laboratoire dans une cloche à vide.

6. Interféromètre de première génération pour l'interférométrie sur la Lune : concept simplifié

Plusieurs concepts ont été proposés, notamment au Jet Propulsion Laboratory par Shao et al. et en France par le groupe de Calern, pour construire sur la Lune de grands interféromètres optiques. L'une des difficultés est de parvenir à simplifier ces instruments, dont la complexité inhérente risque de rendre l'usage coûteux, délicat, aléatoire, et de reporter leur construction dans un avenir éloigné. J'ai exposé une possibilité de simplification, qui a fait l'objet d'une proposition à l'Agence Spatiale Européenne en 1993. Il s'agit de construire sur la Lune, sous forme segmentée et diluée un grand miroir optique, large de 10, 100 ou 1000 mètres, que l'on pointe en déformant les segments tout en les déplaçant. Cette approche pourrait en outre fournir un champ utilisable beaucoup plus grand qu'avec les réseaux de télescopes envisagés précédemment, ce qui permettrait d'utiliser une étoile de référence pour asservir la mise en phase, lorsque l'on observe des objets faibles ou étendus.

Travaux de recherches effectués par le groupe d'interférométrie stellaire

1. Observations interférométriques à Calern avec le Grand Interféromètre à deux Télescopes, analyse et interprétation : (Denis Mourard, Philippe Stée, Isabelle Tallon-Bosc, Farrokh Vakili, Laurent Koechlin, Daniel Bonneau, Frédéric Morand).

Le programme d'observations interférométriques utilisant le Grand Interféromètre à Deux Télescopes ou GI2T s'est poursuivi sur quelques étoiles de type B à émission, sur delta Céphée, et sur beta Lyre. L'analyse des données, enregistrées numériquement sous la forme de millions d'images frangées, demande beaucoup plus de temps que les observations proprement dites, malgré l'amélioration des moyens de calcul et des logiciels créés par D. Mourard. Plusieurs personnes (DM, DB, IT-B) ont consacré une partie majeure de leur temps à ces analyses. Les résultats ont mis en évidence quelques particularités, inobservables jusque-là, de ces objets :

D. Mourard a imaginé et expérimenté une méthode améliorant la précision de mesure des contrastes de franges, mesures qui étaient jusque-là fortement perturbées par la turbulence de l'atmosphère.

Ph. Stée a perfectionné les modèles physiques d'étoiles Be qu'il avait commencé à construire en collaboration avec F. Xavier de Araujo dans le

cadre de son travail de thèse. Il obtient des cartes théoriques, en lumière monochromatique à diverses longueurs d'ondes proches des raies d'émission, et dans le continuum. Les cartes sont présentées par l'ordinateur sous une forme qui peut se comparer directement aux quantités observées. Malgré la mauvaise bidimensionnalité spatiale des observations actuelles, liée au fait que l'interféromètre n'a encore que 2 télescopes, la théorie semble confirmée par l'observation. Il reste cependant à étudier de façon critique la signification de telles comparaisons, sachant que les paramètres ajustables des modèles théoriques font largement varier les aspects présentés, et que les quantités accessibles à l'observation ne sont pas encore très détaillées. Cependant, le progrès des deux approches devrait améliorer la signification du travail entamé, et conduire ainsi à une situation où la théorie et l'observation se stimulent mutuellement de façon importante.

Etude d'une nouvelle table interférométrique, en collaboration avec le Laboratoire d'Astronomie Spatiale (Marseille) et le département Fresnel de l'Observatoire de la Côte d'Azur (D. MOURARD, I. TALLON-BOSC, D. BONNEAU, A. BLAZIT)

La table portant l'optique centrale du GI2T, construite par Isabelle Tallon-Bosc, a donné d'excellents résultats, mais peut maintenant être améliorée, notamment en ce qui concerne le chromatisme résiduel de l'optique dioptrique, et son absorption des rayons infra-rouges, lesquels ont empêché jusqu'ici d'observer à la fois le visible et l'infra-rouge. Une nouvelle table, plus largement équipée de miroirs pour transmettre l'infra-rouge, et susceptible d'évoluer vers une recombinaison de 3 faisceaux, a été étudiée de façon très détaillée. Une correction de rotation de champ, et une optique adaptative pourront y être ajoutés.

Construction d'un troisième télescope en collaboration avec l'Observatoire de Haute-Provence et le Laboratoire de Robotique et d'Intelligence Artificielle (A. LABEYRIE, C. CAZALÉ, J.P. RAMBAUT, J.J. KESSIS, D. PONS, D. VERNET, L. ARNOLD, E. SCHMIDTLIN, J. PINEL)

Ce troisième télescope de 1 m 52 est le prototype de la série de 27 qui est prévue pour le projet « Optical Very Large Array » ou « Très Grand Réseau Optique ». Après la monture légère construite et expérimentée les années précédentes, le polissage du miroir mince a été largement entamé par D. Vernet, utilisant une machine conçue par lui-même et D. Pons, et réalisée avec la participation du groupe technique de l'observatoire de Calern. Il s'agit d'un miroir difficile à polir, parce que très mince, 25 mm, et de court foyer. La méthose mise au point par D. Vernet a permis d'atteindre le stade des retouches finales, actuellement en cours.

L. Arnold et C. Cazalé ont étudié le barillet actif qui doit porter ce miroir en annulant les déformations causées par la gravité. Une autre solution, dite « à triangles virtuels activés » est étudiée par A. Labeyrie et E. Schmidtlin.

Ces différents éléments, et les autres finitions nécessaires pour mettre en service le télescope sont suffisamment avancés pour laisser espérer que la « première lumière » puisse être reçue dans moins d'un an.

Cela permettra d'ajouter le télescope au système G12T pour en faire un réseau à trois télescopes, qui devrait permettre la formation de véritables images à haute résolution. Mais il faudra encore mettre en service le translateur à pattes, et le système de mesure à rayons de laser qui le pilote pour que le prototype du OVLA puisse être considéré comme complet. Un élément de patte, réalisé par A. Labeyrie et J.P. Rambaut a été équipé d'asservissement par ce dernier, qui obtient une précision de l'ordre du micron.

Pré-étude d'interféromètres en ballon stratosphérique (D. SCIGOCKI et A. LABEYRIE en collaboration avec le CNES)

La complexité des interféromètres optiques retarde leur mise en œuvre dans l'espace. Les projets en orbite et sur la Lune, présentés aux agences spatiales par différents groupes et notamment celui du Collège de France, nécessitent des développements techniques et des essais préliminaires qui retardent leur construction.

Les ballons stratosphériques, déjà largement utilisés aux Etats-Unis et en France pour les observations astronomiques avec des télescopes dont le diamètre est de l'ordre du mètre, pourraient permettre d'emmener au-dessus de la troposphère des interféromètres dont la dimension pourrait atteindre 100 à 150 m. Différentes configurations possibles utilisant dans la mesure du possible les types de ballons existants, ont été étudiées. Un essai est envisagé.

Objets candidats pour la détection d'ondes gravitationnelles (A. LABEYRIE)

Selon la méthode proposée par A. Labeyrie, les ondes gravitationnelles émises par une étoile binaire rapide ou un pulsar pourraient être détectables s'il existe une galaxie proche située en arrière, sur la même ligne de visée. On observerait une modulation de la lumière des étoiles appartenant à cette galaxie. Parmi les 558 pulsars du catalogue de Taylor & al., une dizaine se trouvent à quelques minutes de galaxies, elles-mêmes situées à quelques centaines de mégaparsecs, mais ce ne sont pas de très bons candidats car les étoiles de ces galaxies trop lointaines seraient insuffisamment séparées angulairement, ce qui dégraderait le contraste de la modulation photométrique

espérée. Un seul pulsar est dans une direction approchant une galaxie du groupe local, le Grand Nuage de Magellan, mais il n'est pas encore certain qu'il soit utilisable.

Détection d'exoplanètes à partir du sol et de l'espace (A. LABEYRIE)

Après les cours des années précédentes sur la recherche des exo-planètes, le cours de cette année a porté sur deux méthodes nouvelles qui ont été élaborées à l'aide de simulations numériques. Les algorithmes mis au point devraient permettre d'extraire les images d'exoplanètes à partir d'observations effectuées au sol, avec de grands télescopes munis d'optique adaptative. Une méthode apparentée conviendrait au cas des télescopes dans l'espace, et peut-être au télescope Hubble. Ces résultats ont été soumis pour publication au journal *Nature* en février 1994. Par coïncidence, ce journal a publié le 17 mars suivant un article de R. Angel démontrant qu'un grand télescope terrestre, muni d'une optique adaptative fonctionnant à la limite des possibilités théoriques, devrait parvenir à détecter des exoplanètes. La méthode proposée par R. Angel n'utilise cependant qu'une simple intégration des images, ce qui la rend beaucoup moins sensible que l'autre méthode exploitée par un traitement d'image non-linéaire la présence des tavelures noires. Une confrontation stimulante des deux approches s'est donc instaurée, et elle pourrait déboucher sur des tentatives observationnelles d'ici quelques années.

SÉMINAIRES

Au Collège de France :

Philippe STEE (Observatoire de la Côte d'Azur), *Modélisation et observation à haute résolution angulaire d'étoile Be.*

Roger FERLET (Institut d'Astrophysique), *La haute résolution spectrale, le milieu interstellaire diffus et les rapports isotopiques D/H et Li^7/Li^6 .*

Vincent COUDÉ DU FORESTO (Observatoire de Paris, section de Meudon), *La lumière protégée : pourquoi utiliser des fibres optiques en interférométrie astronomique ?*

Jean-Pierre MAILLARD (Institut d'Astrophysique), *Détection des oscillations de planètes géantes par spectrométrie de Fourier.*

Andreas QUIRRENBACH (Institut Max Planck, Garching), *Stellar long-baseline interferometry on Mt Wilson and the BOA project.*

David SCIGOCKI (Laboratoire d'Astrophysique Observationnelle Collège de France), *Photocathodes associées à des détecteurs gazeux proportionnels : résultats et perspectives.*

Jacqueline BERGERON (Institut d'Astrophysique), *Propriétés des galaxies et des nuages de gaz primordial révélées par leurs raies d'absorption dans le spectre des quasars.*

Jean-Marie MARIOTTI (Observatoire de Paris, section Meudon), *A la recherche des naines brunes dans les systèmes binaires.*

Li Zhi FANG (Université d'Arizona, Département de Physique), *Cosmic background radiation and the size of the Universe.*

A Nice :

Université de Sophia Antipolis :

Alain MAZURE (Université de Montpellier), *L'univers à grande échelle.*

MISSIONS ET CONFÉRENCES

A. LABEYRIE :

Conférences à la Société Astronomique de France et à la Société Astronomique de Nantes.

Participation aux colloques à la Fondation des Treilles (juillet 1993) et « Gaia in Oxford » à Oxford (mai 1994).

PUBLICATIONS

MOURARD D., TALLON-BOSC I., BLAZIT A., BONNEAU D., MERLIN G., MORAND D. and LABEYRIE A., « The GI2T interferometer on Plateau de Calern », **283**, 705, *Astron. Astrophys.*, 1994.

MOURARD D., TALLON-BOSC I., RIGAL F., BONNEAU D., MORAND F., VAKILI F. and STEE Ph., « Estimation of visibility amplitude by optical long baseline Michelson interferometry with large apertures », *Astron. Astrophys.*, in press, 1994.

STEE Ph. and DE ARAÚJO F.X., « Line profiles and intensity maps from an axisymmetric radiative wind model for Be stars », *Astron. Astrophys.*, accepted, 1994.

DEVANEY M.N., THIÉBAUT E., FOY R., BLAZIT A., BONNEAU D., BOUVIER J., DE BATZ B. and THOM Ch., « The Ha environment of Tauri resolved by speckle interferometry », *Astron. Astrophys.*, accepted, 1994.

LABEYRIE A., « Gravitational lenses as diffractive telescopes », *Astron. Astrophys.* **284**, 689-692, 1994.

LABEYRIE A., « Images of exo-planets obtainable from dark speckles in adaptive telescopes », 1994 (submitted to Nature).

COMMUNICATIONS PRÉSENTÉES AU SYMPOSIUM 162
DE L'UNION ASTRONOMIQUE INTERNATIONALE
(Juan-les-Pins, octobre 1993)

VAKILI F., MOURARD D. and STEE Ph., « Optical resolution of Be stars disks », **invited paper**, Symp. IAU 162, Juan-les-Pins, 1994.

SAREYAN J.P., CHAUVILLE J., BRIOT D., ADELMAN S.J., ALVAREZ M., BALEGA Y., BALEGA I., BARDIN D., BELKIN I., BONNEAU D., BOSSI M., DESNOUX V., ESPOTO M. FRIED R., GONZALEZ-BEDOLLA S., GUO X.Z., GUO Y.L., HAO J.X., HUANG L., KLOTZ A., LEISTER N., MORAND F., MOURARD D., VAKILI F. and VALERA F., ZHAO F.Y., « First results of an international multisite multitechnique campaign on α And », Symp. IAU 162, Juan-les-Pins, 1994.

STEE Ph. and DE ARAÚJO F.X., « Latitude dependent radiative wind model for Be stars : Line profiles and intensity maps », Symp. IAU 162, Juan-les-Pins, 1994.

DE ARAÚJO F.X., STEE Ph. and LEFEVRE J., « Linear polarization in the envelopes of B[e] supergiants », Symp. IAU 162, Juan-les-Pins, 1994.

COMMUNICATIONS PRÉSENTÉES AU COLLOQUIUM IAU 149
UNION ASTRONOMIQUE INTERNATIONALE MARSEILLE
(22-25 mars 1994)

STEE Ph., BONNEAU D., LAWSON P., MORAND F., MOURARD D., TALLON-BOSC I. and VAKILI F., « Michelson-Spectro-Interferometry (MSI) of Be stars envelopes with the GI2T interferometer », **invited paper**, Coll. IAU 149, Marseille, 1994.

COMMUNICATIONS PRÉSENTÉES AU SYMPOSIUM 158 SPIE KONA, HAWAÏ

VAKILI F., BONNEAU D., LAWSON P., MERLIN G., MOURARD D., STEE P., TALLON-BOSC I., and VALLÉE F., « Spectrally resolved interferometry with the GI2T : results and prospects », SPIE, Hawaiï, 1994.

LINDEGREN L. et al., « GAIA : Global Astrometric Interferometer for Astrophysics », SPIE, Hawaï, 1994.

MOURARD D., BLAZIT A., BONNEAU D., MERLIN G., TALLON-BOSC I., VAKILI F., MÉNARDI S., REBATTU S., HILL L., ROUSSELET K., BOIT J.L., LE MERRER J., LASSELIN-WAULTIER G., SAISSE M., POULIQUEN D. and JOUBERT M., « REGAIN : a new optical beam combiner for the GI2T », SPIE, Hawaï, 1994.

ARNOLD L., « Optimized mirror supports, active primary mirrors and adaptive secondaries for the Optical Very Large Array (OVLA), SPIE, vol. 2199, Hawaï, 1994.

AUTRES PUBLICATIONS

LABEYRIE A., LOVLI : proposition à l'Agence Spatiale Européenne, 1993.

MOURARD D., « Le GI2T aujourd'hui ou le long chemin d'une grande idée », JAF, n° 48, 1994.