

Astrophysique observationnelle

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

I. Cours et séminaires au Collège de France

Dans le cours de cette année, j'ai poursuivi la description des possibilités et projets concernant l'observation de planètes extra-solaires, notamment au moyen des hypertélescopes, nouveaux instruments dont le principe a été décrit les années précédentes. L'étude d'une solution associant hypertélescope et coronographe pour le projet « Terrestrial Planet Finder » de la NASA a été décrite de façon particulièrement détaillée. La possibilité de détecter dans l'image de planètes extra-solaires des signatures spectroscopiques attribuables à la photosynthèse a également été discutée.

Les images projetées pendant le cours et plusieurs séminaires ont été affichées sur le site Internet du Collège de France.

II. Activités de recherche

Les recherches poursuivies au laboratoire concernent : l'étude et la construction d'interféromètres optiques au sol ; l'étude de versions spatiales ; l'étude de leur emploi pour observer des planètes extra-solaires et y rechercher la présence de vie.

Télescope interférométrique prototype (J. Dejonghe, L. Arnold, O. Lardière, D. Vernet)

Les essais sur le ciel du prototype de télescope pour l'interféromètre « Optical Very Large Array » ont été repris pour qualifier l'optique active, mais furent fortement ralentis par la pluviosité exceptionnelle, qui ne laissa que peu de nuits utilisables de l'automne au printemps. Les améliorations mécaniques effectuées semblent avoir été fructueuses, mais des perfectionnements s'avèrent nécessaires en matière de logiciel. Un point critique à évaluer concerne la charge de mainte-

nance qui serait requise pour faire fonctionner interférométriquement une série de télescopes semblables, sur un site au Chili, et les données actuelles ne permettent pas encore d'en juger. L'adoption de télescopes plus petits, 1 m au lieu de 1 m 50, permettrait d'utiliser des miroirs passifs, dont la mise en œuvre serait simplifiée. La poursuite des essais devrait permettre d'évaluer les deux options.

Étude d'un hypertélescope précurseur (J. Dejonghe, O. Lardière, D. Vernet, L. Arnold, S. Gillet, P. Riaud, H. Le Coroller, A. Labeyrie)

Les possibilités théoriques des « interféromètres imageurs multi-ouvertures à pupille densifiée », que j'étudie depuis 1995 et pour lesquels je propose le nom d'hypertélescope, sont maintenant bien comprises et vérifiées par des montages optiques de laboratoire. Une version miniature a aussi été utilisée sur le ciel. Le moment est donc venu d'envisager la construction de versions plus grandes, permettant d'entamer des observations d'imagerie à haute résolution. Nous avons ébauché l'étude d'un concept baptisé « CARLINA », hypertélescope comportant un miroir dilué de plusieurs kilomètres, considéré comme une version éclatée du Overwhelmingly Large telescope ou OWL qu'étudie l'Observatoire Européen Austral.

Mais il est souhaitable de commencer petit et nous cherchons à définir un instrument de 50 ou 100 m, formé de petits miroirs (25 cm) en nombre initialement modeste. Une première possibilité envisagée concerne l'utilisation de la structure du radio-télescope d'Arécibo.

Mission d'évaluation au radio-télescope d'Arécibo (S. Gillet, J. Dejonghe)

Une mission a été effectuée au radio-télescope d'Arécibo à Porto Rico par J. Dejonghe et S. Gillet pour étudier la possibilité d'observations optiques en mode hypertélescope utilisant la structure du grand radio-télescope. Plusieurs difficultés sont apparues : des flexions et oscillations dépassant fortement les indications initiales, l'interdiction de toute présence humaine lors des émissions radar à forte puissance effectuées 50 % du temps, et la présence fréquente de brume dans la cuvette du radio-télescope.

Par ailleurs, l'option d'utiliser un ballon dirigeable, dûment stabilisé, pour porter une optique focale au-dessus d'un réseau de miroirs, s'avère intéressante à terme pour une version terrestre d'hypertélescope à l'échelle d'un kilomètre. L'équipe prévoit à terme des essais avec un tel ballon, dont la construction est entamée par H. Le Coroller. Dans cette perspective, nous avons ainsi préféré, pour les essais à court terme d'un système précurseur, rechercher un site plus adapté qu'Arécibo. Un canyon, permettant d'amarrer de part et d'autre des câbles portant l'optique focale, peut permettre une poursuite de l'image stellaire formée par un réseau de miroirs, installés au fond. Plusieurs sites intéressants ont été repérés dans les Alpes du Sud, où le climat moins humide est plus favorable qu'à Arécibo.

Une simplification appréciable est possible si l'on se contente d'observer l'étoile Polaire, dont il ne serait pas inutile de former une image résolue à l'échelle du millième de seconde d'arc. Mais l'intérêt d'une telle étape préalable n'est pas certain, et la décision qui doit être prise prochainement sera fortement influencée par les sites qui auront été repérés.

Proposition à la NASA d'une version hypertélescope pour le Terrestrial Planet Finder, et contribution à l'étude industrielle entamée aux États-Unis (A. Boccaletti, F. Vakili, L. Abe, L. Arnold, O. Lardière, P. Riaud, S. Gillet, J. Schneider, D. Rouan, R. Kaiser, V. Borkowski, A. Labeyrie)

La collaboration entamée l'année précédente entre les équipes américaines et françaises s'est poursuivie. Une présentation en a été faite à la NASA le 14 décembre, et celle-ci a demandé au consortium industriel américain concerné une prolongation de l'étude concernant l'architecture hypertélescope proposée par l'équipe française. Les calculs et simulations effectués en France ont permis de préciser le gain de sensibilité qu'apporte ce type d'architecture, en comparaison avec l'architecture prévue initialement, qui utilise des lames semi-transparentes pour combiner les faisceaux.

Proposition à la NASA de miroirs à particules piégées par laser

En réponse à un appel d'offres de la NASA pour l'étude de miroirs ultralégers répondants aux besoins des projets spatiaux, des collègues américains ont souhaité proposer l'approche que j'avais suggérée en 1979 (« Standing waves and pellicle : a possible approach to very large space telescopes », Labeyrie, A. *Astron. astrophys.*, **77**, pp. L1-L2, 1979). Il s'agirait d'utiliser des interférences de faisceaux laser pour piéger sur une surface virtuelle des nanosphères. Celles-ci formeraient une nappe réfléchissante capable de focaliser la lumière stellaire. Des discussions avec plusieurs physiciens (C. Cohen-Tannoudji, W. Phillips, R. Kaiser, D. Maystre) ont permis de préciser les difficultés de cette approche, mais il subsiste un désaccord sur l'intensité du faisceau laser nécessaire. La proposition, jugée trop lointaine par la NASA, n'a pas été sélectionnée (en revanche celle-ci a sélectionné une proposition de R. Angel et ses collaborateurs à l'université d'Arizona pour étudier le type de voile solaire qui avait été proposé en France en 1983 pour le projet TRIO).

A. L.

Travaux des groupes associés à la chaire

Grand Interféromètre à 2 Télescopes (D. Mourard, F. Vakili, D. Bonneau, A. Blazit)

L'équipe basée au site de Calern de l'Observatoire de la Côte d'Azur a remis en marche le « Grand Interféromètre à deux télescopes » après d'importantes

améliorations. Des observations infrarouges ont été effectuées avec l'équipe allemande de G. Weigelt, avant d'obtenir des interférences visibles.

Exobiologie (J. Schneider, L. Arnold, O. Lardière, S. Gillet, A. Labeyrie)

J. Schneider, chercheur associé à l'équipe LISE, a contribué à la rédaction d'un rapport pour la NASA sur les critères utilisables pour la détection de vie extra-solaire. Il confirme l'intérêt de la spectroscopie visible, complétant la spectroscopie infrarouge pour caractériser la présence de vie par la présence des bandes d'absorption attribuables à des formes de photosynthèse.

Relativité générale

L'étude théorique d'effets de relativité générale est poursuivie par R. Krikorian sur les points suivants :

1) Rotation relativiste (superfluidité, électrodynamique des pulsars)

En collaboration avec D. Sedrakian, il a obtenu les équations décrivant le mouvement d'un superfluide dans un récipient en rotation relativiste. Il a poursuivi son étude sur l'électrodynamique des pulsars. En adoptant deux approches différentes pour l'étude de l'électrodynamique dans les référentiels accélérés, il a calculé la distribution des champs électrique et magnétique mesurés par un observateur attaché à une sphère conductrice en rotation, la sphère étant soit uniformément chargée soit uniformément magnétisée. Il a retrouvé les résultats classiques de Goldreich et Julian (APJ157, 869, 1969). Il a aussi montré que le pulsar constitue une réalisation astrophysique de l'expérience de PEGRAM (PHYS REW10, 591, 1917).

2) Dynamique relativiste

La démonstration de la relation d'incertitude masse au repos-temps propre proposée par Kudaka et Matsumoto (J. Math. Phys. 40, 1237, 1999) n'est pas satisfaisante du point de vue relativiste car elle entre en contradiction avec la dépendance temps propre-ligne d'univers.

Un séjour a été effectué par R. Krikorian, du 19 juin au 2 juillet 2001, au département de physique générale, Université d'Erevan, dans le cadre de sa collaboration avec le Prof D. Sedrakian. Il a aussi effectué un séminaire intitulé : « Sur quelques questions de dynamique relativiste ».

Doctorants

Ettore Pedretti : La thèse entamée sur les techniques de mise en phase pour les interféromètres à ouvertures multiples est poursuivie à Harvard (Center for Astrophysics du Smithsonian Astrophysical Observatory). Le travail comporte des missions d'observation avec l'interféromètre IOTA situé au mont Hopkins en Arizona.

Pierre Riaud : Il poursuit à l'Observatoire de Meudon et au LISE le travail de thèse entamé sur la coronographie combinée à l'utilisation d'hypertélescopes dans l'espace pour tenter de détecter des planètes exo-planétaires.

Sophie Gillet : Elle étudie la construction d'un hypertélescope au sol. Elle participe également à des observations de lumière cendrée sur la Lune pour y rechercher la signature spectrale de la photosynthèse terrestre, selon une suggestion de J. Schneider.

Virginie Borkowski : Elle a entamé sa thèse au début de 2001, dans le cadre d'une bourse CIFRE financée par Alcatel-Espace, sur la mise en phase d'interféromètres au sol et dans l'espace.

III. Publications

Articles publiés dans des journaux à comité de lecture

« Evolution of Dust Shells and Jets in the Inner Coma of Comet C/1995 O1 (Hale-Bopp) », O. Lardièrre, S. Garro and J.-C. Merlin, *Earth, Moon, and Planets*, v. 78, Issue 1/3, p. 205-210 (1997).

« Observation de la comète Hale-Bopp au 80 cm de l'OHP », O. Lardièrre, *La Lettre de l'OHP*, No. 16 (1997).

« First images on the sky from a hyper telescope », E. Pedretti, A. Labeyrie, L. Arnold, N. Thureau, O. Lardièrre, A. Boccaletti, P. Riaud, *Astron. and Astrophys. Suppl.*, v.147, p. 285-290 (2000).

« Hyper telescopes for direct imaging and coronagraphy », S. Gillet, A. Boccaletti, P. Riaud, L. Arnold, O. Lardièrre, A. Labeyrie, *C. R. Acad. Sci. Paris, t.2, Série IV*, p. 27-33 (2001).

« The Four-quadrant Phase Mask Coronagraph. II. Simulation », Rouan, D., Riaud, P., Boccaletti, A., Clénet, Y., Labeyrie, A., Pub. Astron. Soc. Pacific (à paraître).

« On pulsar electro-dynamics in rotating frames », D. Sedrakian, R. Krikorian, à paraître dans ASTRFIZIKA.

« Rotation and pulsar electro-dynamics », D. Sedrakian, R. Krikorian, soumis à NUOVO CIMENTO B.

« On the rotation of fluids in a relativisticall rotating container », D. Sedrakian, R. Krikorian, à paraître dans NUOVO CIMENTO B 2001.

« Comment on uncertainty principle for proper time and mass », R. Krikorian, J. MATH. PHYS. 40, 1237, 1999), à paraître dans J. MATH. PHYS., juin 2001.

Articles publiés dans des actes de colloques

« The OVLA prototype telescope control system », O. Lardièrre, L. Arnold, J.-P. Berger, C. Cazalé, J. Dejonghe, A. Labeyrie, D. Mourard, « *Telescope control*

systems III », Kona, Hawaii, 23-25 March 1998, *Proc. SPIE* vol. 3351, p. 107-117 (1998).

« The Optical Very Large Array (OVLA) prototype telescope : status report and perspective for large mosaic mirrors », J. Dejonghe, L. Arnold, O. Lardière, J.-P. Berger, C. Cazalé, S. Dutertre, D. Kohler, D. Vernet, « *Advanced Technology Optical/IR Telescopes VI* », Kona, Hawaii, 23-25 March 1998, *Proc. SPIE* 3352, p. 603-613 (1998).

« The OVLA 1.5-m primary as a segment for an Extremely Large Telescope ? », L. Arnold, O. Lardière, J. Dejonghe, *Proc. of Bäckaskog Workshop on Extremely Large Telescope*, T. Andersen et al eds., Sweden, 1-2 June 1999, p. 132-138 (1999).

« First light of the OVLA active mirror with its surface heating system », O. Lardière, L. Arnold, J. Dejonghe, « *Optical Design, Materials, Fabrication, and Maintenance* », Munich, 27-31 March 2000, *Proc. SPIE* vol. 4003, p. 426-435 (2000).

« Sites and adaptive phasing for 1-10 km hypertelescopes », O. Lardière, J. Dejonghe, P. Riaud, S. Gillet, L. Arnold, A. Labeyrie, *proc. ESO conf., Marrakech, ASP Conference Series*, sous presse, 2001.

« Spaceborne hypertelescope : A spacecraft formation flying controlled by solar sails », O. Lardière, A. Labeyrie, S. Gillet, P. Riaud, *Proc. of 2nd International Workshop on Satellite Constellations and Formation Flying, Haifa, Israel, 19-20 February 2001*, p. 181-186 (2001).

« Hypertélescope OVLA (OVLAHT), un interféromètre au sol pour l'imagerie directe », O. Lardière, J. Dejonghe, L. Arnold, V. Borkowski, *Atelier d'Optique de l'INSU, Grenoble*, 2001.

Communications à des congrès

« Dark-Speckle Coronagraphy in the Infrared », Moutou, C., Boccaletti, A., Mouillet, D., Lagrange, A.M. & Labeyrie, A., VLT Symposium, Antofagasta.

« Sites and adaptive phasing for 1-10 km hypertelescopes », Lardière, O., Dejonghe, J., Riaud, P., Gillet, S., Arnold, L. & Labeyrie, A., Coll. Marrakech.

« Antennes Interférométriques en Optique », Labeyrie, A., communication invitée au colloque : « Antennes non-standard, techniques & traitements », 20-21 mars 2001, Paris.

« Hypertelescope architectures for direct imaging at high angular resolution », Labeyrie, A., communication invitée au colloque de Venise : « Beyond conventional adaptive optics », 7-10 mai 2001.

« Adaptive optics for ground-based hypertelescopes », L. Arnold, P. Riaud, O. Lardière, V. Borkowski, S. Gillet, J. Dejonghe, colloque de Venise : Beyond conventional adaptive optics, 7-10 mai 2001.

« Hypertélescope OVLA (OVLAHT), un interféromètre au sol pour l'imagerie directe », O. Lardière, J. Dejonghe, L. Arnold, V. Borkowski, *Atelier d'Optique de l'INSU, Grenoble, 2001.*

Séminaires

Labeyrie, A., séminaire à l'Observatoire de Genève, avril 2001.

Labeyrie, A., séminaire à l'Observatoire de Padoue, 10 mai 2001.

Conférences publiques

Labeyrie, A., Centre Culturel Français de Marrakech.

Labeyrie, A., Conférence à la Société Astronomique de France.

Articles de vulgarisation

« C/1995 O1 (Hale-Bopp), Imagerie à haute résolution avec le T62 de Saint-Véran », J-C. Merlin, S. Garro, O. Lardière, *l'Astronomie*, Vol. 111, nov.-déc. 1997.