

Astrophysique observationnelle

M. Antoine LABEYRIE, professeur

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

Une nouvelle fenêtre sur l'univers s'ouvre actuellement avec l'apparition des télescopes géants. Après une assez longue stagnation, l'art de construire les grands télescopes de l'astronomie optique entre en effet dans une phase d'évolution rapide. D'une part les progrès techniques des servo-mécanismes permettent maintenant de renoncer aux lourdes structures utilisées jadis pour maintenir la forme précise des grands miroirs, la position relative des différents éléments optiques et le pointage de l'ensemble. D'autre part, l'idée d'associer plusieurs télescopes en un réseau cohérent guide maintenant les projets les plus ambitieux. Les ouvertures optiques, larges de quelques mètres jusqu'à ces dernières années, vont maintenant pouvoir s'étaler sur un ou plusieurs kilomètres, et bénéficier d'une amélioration en proportion pour leur résolution angulaire.

Le projet d'un Very Large Telescope, entamé par l'Observatoire Européen Austral, comporte ainsi 4 télescopes de 8 m et deux télescopes de 1,8 m. Aux Etats-Unis, le plus haut volcan des îles Hawaï accueille le télescope Keck de 10 m. Sa construction est presque terminée, et doit être complétée par celle d'un deuxième télescope de 10 m et deux de 1,5 m pour permettre l'observation interférométrique.

L'instrument nommé Optical Very Large Array, mis en chantier par l'équipe d'Astrophysique Observationnelle, est moins ambitieux par la dimension des télescopes qui le composent, 1 m 50, mais davantage par le nombre de ces télescopes, qui s'élève à 27.

Ces trois instruments de conception très différente illustrent le foisonnement technique de la période actuelle, où les meilleures approches ne se sont pas encore distinguées. Alors que les radioastronomes ont acquis une préférence pour des réseaux d'antennes nombreuses, en économisant plutôt sur leur dimension individuelle que sur leur nombre, certains de ceux qui observent

aux longueurs d'ondes optiques restent encore attachés à l'idée de construire des ouvertures monolithiques aussi grandes que possible.

Cependant, 27 télescopes, même petits, permettent en principe d'obtenir des images à haute résolution de façon instantanée, alors que les télescopes moins nombreux, même de gros diamètre, nécessitent des observations beaucoup plus longues pour synthétiser les images. Il est important d'obtenir des images instantanées car la plupart des sources stellaires, ainsi peut-être que les noyaux galactiques actifs, les jets, etc., présentent une morphologie dont les détails les plus fins et les plus intéressants sont souvent mouvants et rapidement variables.

Si l'on observe une étoile brillante, la mise en phase adaptative de N télescopes n'est guère plus difficile que pour une grande ouverture monolithique. Pour les objets faibles, le succès est beaucoup moins assuré. Y parvenir est un enjeu majeur pour l'astronomie optique actuelle, enjeu qui doit déterminer le partage des efforts entre le sol et l'espace.

Les progrès actuels de l'optique adaptative monolithique, c'est-à-dire concernant les télescopes monolithiques, montrent les voies techniques qui seront éventuellement applicables aux ouvertures multiples. Une équipe française a obtenu au Chili des résultats encourageants sur des étoiles brillantes dans l'infra-rouge. Les observations adaptatives peuvent être étendues aux objets faibles si l'on peut disposer d'une étoile brillante très près de l'objet. Une telle étoile est rarement disponible, mais elle peut être obtenue artificiellement en focalisant un faisceau de laser vers la haute stratosphère. Une petite partie de la lumière émise est rétrodiffusée, soit par diffusion Rayleigh, soit par diffusion résonnante sur des atomes comme le sodium. Ces techniques ont été expérimentées avec un certain succès. Cela laisse espérer une correction assez poussée des effets optiques de l'atmosphère terrestre, pour observer des objets faibles, d'abord aux longueurs d'ondes infra-rouges puis visibles.

Dans le cas de réseaux à N télescopes, il serait intéressant d'observer une étoile brillante permettant le cophasage adaptatif, et simultanément l'objet faible étudié, situé à quelques minutes d'arc et qui servirait de cible à des faisceaux laser émis par chaque télescope. La cible serait évidemment inaccessible, mais la faible proportion de lumière rétrodiffusée en traversant la stratosphère engendrerait une étoile artificielle pour chaque télescope. Une partie des déphasages concernant l'objet faible pourrait vraisemblablement être corrigée.

Les systèmes d'optiques adaptatives sont assez complexes, mais des simplifications appréciables ont été récemment proposées par F. Roddier et ses collaborateurs.

La perspective de pouvoir utiliser des interféromètres optiques au dessus de l'atmosphère terrestre suscite aussi un intérêt considérable. D'une part, les

effets atmosphériques évoqués précédemment disparaissent. D'autre part, l'accès au domaine ultra-violet ouvre une nouvelle fenêtre sur l'Univers. Nombre de concepts ont été proposés pour le fonctionnement en orbite, et quelques-uns pour une installation sur la Lune.

Le télescope spatial Hubble n'a pas la qualité escomptée, en raison principalement d'un défaut de réalisation optique. Cependant, des données remarquables en proviennent. Les plus spectaculaires images obtenues concernent les jets de certaines galaxies, et des étoiles multiples. Dans ce dernier cas, la résolution de l'étoile centrale d'eta Carinae en cinq composantes, par interférométrie des tavelures au sol, trouve une vérification remarquable qui met en cause l'existence même des étoiles super-massives.

Les nouveaux systèmes de télescopes atteignent un degré de complexité appréciable, et cette complexité continue à s'accroître avec l'augmentation du nombre de télescopes, l'optique adaptative, le sondage laser, etc. Les progrès de l'informatique classique permettent déjà de piloter et coordonner des systèmes qu'il aurait été impossible d'utiliser à l'époque de Michelson et Pease. Ils permettent aussi de réduire les données, obtenues sous forme de coordonnées de photons, au prix de calculs statistiques intensifs. Mais la récente apparition des réseaux neuronaux artificiels et des logiciels génétiques semble annoncer une percée conceptuelle et technique qui va bouleverser notre façon de concevoir les instruments complexes et de les utiliser. Pour l'acquisition de champ, les asservissements de guidage, la correction d'onde adaptative, avec analyse prédictive de la turbulence, la détection et la stabilisation des franges, la correction adaptative de polarisation, la réduction d'images en ligne et la prise de décision, les réseaux neuronaux semblent pouvoir remplacer avantageusement les classiques algorithmes programmés. Ils ont déjà été utilisés avec succès pour l'optique adaptative. Ils semblent aussi utilisables pour réduire les données interférométriques, qu'il s'agisse de tavelures, de franges, ou des tavelures frangées que l'on détecte au foyer commun des grands télescopes à ouvertures multiples.

Mais l'approche neuronale et génétique est aussi une convergence avec les structures biologiques, qui sont très supérieures aux systèmes artificiels actuels pour ce qui est de contrôler des systèmes complexes. Le système nerveux d'une puce ne comporte que quelques milliers de neurones, mais il est sans doute beaucoup plus perfectionné que ceux de nos plus imposantes machines. Le grand débat actuel sur l'éventuelle relation entre l'intelligence embryonnaire des neurones artificiels et les formes supérieures d'intelligence naturelle concerne-t-il aussi l'astrophysique ? Peut-il exister par exemple des structures de type neuronal dans le milieu interstellaire, comme il en existe dans les matériaux magnétiques dit « verres de spin » ? L'hypothèse de nuages interstellaires intelligents, illustrée dans un roman de fiction par l'astrophysicien anglais Fred Hoyle, suggère de préciser les conditions physiques auxquelles

devrait satisfaire un « plancton interstellaire » pour pouvoir fonctionner comme un réseau neuronal. Quelles dimensions de cellules seraient nécessaires pour obtenir des équivalents de neurones capables de fonctionner dans l'ultra-vide, d'émettre et de détecter des signaux, de capter l'énergie d'une étoile proche et de se reproduire ? Des macro-molécules ou des pseudo-cristaux semblables à certains virus pourraient-ils atteindre un degré de complexité suffisante pour avoir ces fonctionnalités ? Est-il imaginable qu'une partie des grains opaques contenus dans la nébuleuse d'Orion aient de telles propriétés ?

Parmi les objets célestes d'intérêt actuel que l'on aimerait observer avec une résolution accrue se trouvent les lentilles gravitationnelles et les sources d'ondes gravitationnelles. L'étude des premiers est un domaine très actif depuis quelques années. Il semble intéressant d'étudier aussi l'effet de lentille dynamique et propagatif que présentent les ondes gravitationnelles. Des calculs préliminaires, soumis pour publication, suggèrent que l'effet pourrait être détectable à proximité d'étoiles binaires rapides. Il apparaîtrait sous la forme d'une modulation photométrique dans l'image des sources lointaines vues à proximité de l'étoile binaire.

Cours donnés en Hollande :

à Utrecht :

*Sujet : Arc-millisecond stellar data currently obtainable
with the GI2T interferometer*

Les modèles des étoiles autres que le Soleil élaborés jusqu'ici sont essentiellement basés sur les données de la spectroscopie, car les images n'étaient pas résolues. Les données interférométriques qui commencent à être obtenues avec le Grand Interféromètre à 2 Télescopes apportent les premières informations spatiales sur l'atmosphère étendue des étoiles à raies d'émission. Pour les confronter avec les modèles, et faire ainsi évoluer ces derniers pour les améliorer, il faut s'en servir pour calculer les images monochromatiques telles qu'elles devraient apparaître dans chacun des centaines de canaux spectraux utilisés par l'interféromètre. En attendant les futures machines qui produiront dans ces mêmes canaux spectraux des images simultanées, les transformées de Fourier calculables à partir des images théoriques peuvent être directement comparées aux données d'observation. Il importe donc maintenant de rapprocher les inventeurs de modèles des utilisateurs d'interféromètres. Les premiers doivent aussi préciser les paramètres observationnels les plus importants pour donner aux observations la meilleure efficacité.

A Amsterdam :

« *The challenge of arc-millisecond optical images :
the Optical Very Large Array* »

Le futur réseau de 27 télescopes nommé Optical Very Large Array, déjà évoqué dans des cours précédents, est ici décrit de façon plus détaillée ainsi que ses possibilités observationnelles.

Cours donné à l'Université de Nice

Un congrès récemment organisé par l'Observatoire Européen Austral a présenté l'état de l'art en matière d'interférométrie optique. Les tendances actuelles concernent la multiplication du nombre de télescopes dans les nouveaux systèmes et l'utilisation d'optique adaptative. Des résultats nouveaux, obtenus en nombre croissant, jettent une lumière nouvelle sur des objets jusqu'ici incompris. Les intimités stellaires deviennent ainsi observables. Les étoiles binaires serrées sont particulièrement intéressantes en raison de leur orbite rapide, dont le mouvement radial est observable par la spectroscopie. La combinaison des données spectroscopiques et angulaires peut fournir les masses des étoiles composantes. Mais l'effet de lentille gravitationnelle, variable dans le temps, d'une binaire devrait aussi être fort intéressant à observer. Le calcul Newtonien de la déflexion lumineuse est grossièrement valable pour les parties internes de la lentille gravitationnelle, situées à moins d'une longueur d'onde gravitationnelle de l'étoile. Il en découle que l'on devrait voir une variation importante de la distorsion de la « toile de fond » que constituent les galaxies ou étoiles lointaines apparaissant près de la binaire. A des distances angulaires plus grandes, entre l'étoile binaire déflectrice et la partie observée de la toile de fond, les termes propagatifs doivent être pris en compte, en utilisant par exemple la Relativité Générale. Les premiers résultats du calcul sont mentionnés plus haut.

SÉMINAIRES

Au Collège de France :

Michel AURIÈRE (Observatoire du Pic du Midi et de Toulouse), *Observation d'étoiles binaires dans les amas globulaires.*

Suzy COLLIN (Institut d'Astrophysique), *Noyaux actifs de galaxies, modèle unifié.*

Véra DOAZAN (Observatoire de Paris), *Observation d'étoiles B à émission, modélisation et interprétation.*

Jean Loup PUGET (Institut d'Astrophysique Spatiale, Orsay), *Observations à haute résolution du milieu interstellaire et implications pour la formation des étoiles.*

Gerd WEIGELT (Institut Max Planck de Bonn), *High resolution imaging.*

Romain PETROV (Département d'Astrophysique de l'Université de Nice), *Observer la rotation des étoiles.*

A Nice :

Jean LEFÈVRE (Observatoire de la Côte d'Azur), *Observation des atmosphères stellaires étendues.*

Marc CHABRE (CNRS, Sophia Antipolis), *Détection de la lumière par les bâtonnets réiniens. Implications pour l'observation astronomique.*

TRAVAUX DE RECHERCHE

Observations avec le Grand Interféromètre à deux Télescopes (D. MOURARD, I. TALLON-BOSC, D. BONNEAU, A. BLAZIT, F. MORAND, F. VAKILI, L. KOEHLIN, A. LABEYRIE)

Ce travail est effectué en collaboration avec l'équipe GI2T du département Fresnel à l'Observatoire de la Côte d'Azur. Cette équipe, animée par A.Labeurie, a construit et exploite depuis 1989 le Grand Interféromètre à 2 Télescopes.

L'instrument comporte deux télescopes optiques de 1,5 m, dont les faisceaux sont recombinaés dans une station centrale. Leur luminosité permet maintenant d'observer avec une bonne résolution spectrale, atteignant 1,5 Angstrom, divers types d'étoiles. Les spectres obtenus sont sillonnés de franges d'interférence parallèles à la dispersion. Ces franges fournissent dans chaque canal spectral une information sur la morphologie de l'étoile source et de la matière lumineuse qui l'entoure éventuellement, avec une résolution angulaire qui atteint une milliseconde d'arc pour l'actuelle base interférométrique de 67 mètres. En attendant l'avènement d'instruments possédant des ouvertures plus nombreuses, comme le OVLA, la résolution présentement obtenue ne concerne qu'une direction, celle de la base projetée sur la sphère céleste. Cela restreint considérablement l'information obtenue, mais peut cependant permettre de faire progresser notre compréhension de certaines étoiles.

L'étoile binaire β Aurigae n'est pas résoluble par l'observation classique, mais semble avoir été résolue en 1981 par l'interféromètre I2T, qui a servi de précurseur à l'instrument dont il est question ici. C'est la plus brillante des étoiles à éclipses dont les deux séries de raies spectrales sont décelables. Après avoir effectué quelques simulations numériques suggérant que l'interféromètre pourrait apporter les pièces manquantes permettant de déterminer l'orbite du système, les observateurs de l'équipe ont obtenu des données sur cette étoile deux nuits de suite à la fin décembre. Les données ne sont pas encore entièrement réduites. La résolution spectrale a permis de dédoubler la raie H_α de l'hydrogène, et l'on espère mettre en évidence le décalage spatial des franges correspondantes, qui permettrait pour la première fois de relier sur une étoile double l'effet Doppler avec les mouvements apparents. Cela peut en principe permettre la détermination précise des deux masses et de la distance du système.

Une autre étoile binaire à éclipses, β Lyrae, présente des caractéristiques surprenantes qui en font un membre important de la classe des binaires semi-détachées. Les abondantes données (environ 1 Gigaoctets) obtenues à différentes phases du cycle orbital ne sont que partiellement réduites, mais laissent espérer une meilleure compréhension de cet objet, ou tout au moins des contraintes nouvelles pour leurs modèles.

Des perfectionnements divers ont été apportés à l'interféromètre. Une nouvelle caméra à comptage de photons, à anode résistive, a été construite aux Etats-Unis à notre demande par le Space Telescope Science Institute. Nous avons entamé les essais. Sa rapidité de réponse va peut-être permettre d'étendre à l'ultra-violet proche les observations interférométriques.

Nous avons aussi commencé à étudier une nouvelle version de la table optique qui assure la recombinaison des faisceaux.

Construction d'un réseau à 27 télescopes : Optical Very Large Array (L. ARNOLD, F. MORAND, B. DEJONGHE, J. DEJONGHE, C. CAZALÉ, A. LABEYRIE)

Cette étape importante, que l'on espère atteindre dans quelques années, devrait permettre d'obtenir des images à haute résolution, 6 000 fois plus nettes que celles obtenues classiquement en astronomie optique. L'instrument OVLA étant très modulaire, nous avons entrepris d'en construire les premiers éléments prototypes sans attendre d'avoir un financement assuré pour l'ensemble. La construction d'un télescope prototype compact et léger, destiné à être construit en série, a été entreprise en collaboration avec l'Observatoire de Haute Provence.

Après les essais mécaniques de la monture, il a fallu commencer à réaliser un miroir de 1,5 m. Nous avons choisi, selon la tendance actuelle dans ce

domaine, d'adopter un miroir mince tenu par des supports actifs. Comme cela relâche les tolérances concernant la forme de la surface polie du miroir, il semble possible d'utiliser du verre industriel ordinaire, épais de 25 mm, au lieu des vitro-céramiques à dilatation nulle, fort coûteuses, généralement utilisées depuis une vingtaine d'années pour la fabrication des grands miroirs. C'est ainsi que nous avons fait construire un four et un moule pour ramollir à 700 °C, courber et recuire des disques en verre.

De premiers ménisques ont été obtenus depuis Janvier. Nous avons ensuite entrepris de les faire polir. Comme il s'agit de miroirs paraboliques très ouverts, à F/1,7, le polissage est difficile. Nous étudions actuellement un nouveau type de machine dont nous pourrions prochainement commencer la construction.

La réalisation d'un système prototype de faisceaux laser, destiné à mesurer de façon précise la position des télescopes, est poursuivie par F. Morand dans le cadre de son travail de thèse.

Refraction de la lumière par les ondes gravitationnelles près de leurs sources
(A. LABEYRIE)

Un manuscrit, soumis au journal *Astronomy and Astrophysics*, présente un calcul théorique des effets de lentille attribuables aux ondes gravitationnelles selon la théorie de la Relativité Générale. Les calculs effectués par l'auteur suggèrent l'existence de l'effet suivant : lorsqu'un rayon de lumière, venant d'une source plus lointaine, passe à proximité d'une source d'ondes gravitationnelles, par exemple une étoile binaire rapide, les fluctuations du chemin optique créent une modulation de l'intensité lumineuse détectable par un observateur terrestre. L'effet est faible mais pourrait être perceptible dans certains cas favorables, notamment en utilisant les grands interféromètres optiques. Si cette perspective est confirmée par d'autres auteurs, la méthode pourrait fournir des informations sur l'objet proche, l'objet lointain, le milieu intergalactique éventuellement, et peut-être aussi sur les ondes gravitationnelles, lesquelles n'ont pas encore pu être détectées directement.

Projets interférométriques en orbite et sur la Lune (I. TALLON-BOSC, F. VAKILI, Ph. CLAUDIN, A. LABEYRIE)

La collaboration entamée avec l'Agence Spatiale Européenne, au sein de la « Lunar Interferometry Study Team » créée par cet organisme, est poursuivie pour préciser les concepts d'interféromètres dans l'espace et leur potentiel scientifique. L'Agence Spatiale Européenne, aidée par l'Observatoire de la Côte d'Azur, organise un colloque sur ces questions en octobre 1992. F. Vakili fait partie du comité scientifique et I.Tallon-Bosc s'occupe de l'organisation locale.

L'incertitude actuelle sur le calendrier des projets lunaires suggère d'étudier à la fois les possibilités lunaires et orbitales. Pour ce dernier cas, nous avons étudié différentes versions d'un interféromètre déployable utilisant des câbles. Selon les premiers résultats des calculs, non encore publiés, certaines configurations à câbles pourraient permettre de déployer en orbite une charge repliée, pour atteindre des dimensions de plusieurs centaines de mètres.

CONFÉRENCES PRÉSENTÉES SUR INVITATION

Professeur Antoine LABEYRIE

European Southern Observatory, conf. on High-resolution Imaging by Interferometry, Garching, oct. 1991, *Construction of the Optical Very Large Array*.

Conférence à Groningen, octobre 91, *Optical Interferometry in Space*.

Communication au colloque de l'Agence Spatiale Européenne « Solar physics and Astrophysics at Interferometric Resolution » Paris, 17-19 Février 1991, *Optical Interferometry in Space and on the Moon*.

Conférenciers invités à l'Observatoire de Calern :

Buddy MARTIN (University of Arizona, U.S.A.) : *New techniques of Mirror Fabrication developed in Arizona*, Avril 1992

PUBLICATIONS

LABEYRIE A., CAZALÉ C., GONG S., MORAND F., MOURARD D., KESSIS J.J., RAMBAUT J.P., VAKILI F., VERNET D., ARNOLD L., *Construction of the Optical Very Large Array* (ESO conf. on High-resolution imaging by interferometry, Garching, oct 1991).

MOURARD D., BLAZIT A., BONNEAU D., KOECHLIN L., LABEYRIE A., MORAND F., PERCHERON I., TALLON-BOSC I., VAKILI F., *Status and results report on GI2T* (ESO conf. on High-resolution imaging by interferometry, Garching, oct 1991).

MORAND F., GONG S., MOURARD D., LABEYRIE A., *Status of the GI2T tridimensional absolute metrology system* (ESO conf. on High-resolution imaging by interferometry, Garching, oct 1991).

MOURARD D., BONNEAU D., BLAZIT A., LABEYRIE A., MORAND F., PERCHERON I., TALLON-BOSC I., VAKILI F., *Simultaneous spectroscopic and interferometric measurements on binaries with the GI2T* (proc. UAI conf. Atlanta, Avril 1992).

ARNOLD L., DEJONGHE B., DEJONGHE J., LABEYRIE A., *Producing mirrors for the Optical Very Large Array* (proc. ESO conf. « Télescope 92 », Garching, Avril 1992).

VAKILI F., *Optical Interferometry from Space : Plans and Thoughts (Review Paper, Plenary Meeting of ESA, 22-24 june, Liège (Belgique))*.

En préparation

LABEYRIE A., *Optical lensing effects of gravitational waves near celestial sources* (manuscrit soumis à *Astronomy and Astrophysics*).

MISSIONS

LABEYRIE A., Colloque *Frontiers of life* (Blois, 14-19 oct. 91).

LABEYRIE A., Congrès de l'ESO à Garching (octobre 1991).

FILM

Le cours donné à Utrecht par A. Labeyrie a fait l'objet d'un film dont le montage est en cours.