

## **Astrophysique observationnelle**

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

Depuis Galilée, les progrès de l'astronomie ont largement reposé sur l'amélioration des instruments d'observation, et notamment les télescopes qui accroissent fortement la luminosité et la résolution angulaire de ce que perçoit l'œil humain sur la voûte céleste. La résolution concerne la finesse des détails observables sur les astres, et s'améliore en principe proportionnellement au diamètre de l'optique utilisée, à condition de pouvoir corriger les perturbations venant de l'atmosphère.

Une voie nouvelle en direction de télescopes géants « dilués » est amorcée depuis quelques décennies. Il s'agit de l'interférométrie, utilisant les interférences de la lumière captée par plusieurs ouvertures travaillant à la façon d'une ouverture géante diluée. Après l'utilisation de quelques télescopes situés sur une même montagne et travaillant ainsi de concert, l'équipe associée à la chaire d'Astrophysique observationnelle a étudié la généralisation au cas d'un grand nombre d'ouvertures. Elle a démontré l'avantage théorique de tels systèmes baptisés « hypertélescopes », et entrepris d'en construire des versions prototypes pour mieux voir les détails des étoiles, galaxies, et autres objets mal compris qui peuplent notre Univers. À terme, les perspectives de ces instruments concernent aussi l'observation des exo-planètes, la recherche de vie à leur surface et peut-être de formes de vie civilisée. Dans l'espace, un hypertélescope utilisant des miroirs espacés de centaines de milliers de kilomètres pourrait en principe voir les détails d'une étoile à neutron comme le pulsar du Crabe, dont le diamètre estimé est seulement une vingtaine de kilomètres.

Avant de pouvoir exploiter la résolution accrue espérée de ces nouveaux instruments, l'équipe associée à la chaire est engagée dans une phase technique de construction, qui pourrait demander encore un an. Si les résultats espérés se concrétisent, la construction d'hypertélescopes ambitieux pourra ensuite être proposée à de grands organismes comme l'Observatoire européen austral, et pour les versions spatiales la NASA ou l'Agence spatiale européenne.

COURS ET SÉMINAIRE : EXO-PLANÈTES, ÉTOILES ET GALAXIES :  
PROGRÈS DE L'OBSERVATION

Le cours de cette année a porté sur la théorie et la pratique des hypertélescopes, leur construction, et les problèmes astrophysiques qu'ils pourraient contribuer à élucider.

Trois des cours et séminaires ont été organisés, ainsi qu'une discussion table ronde, à l'université Joseph Fourier de Grenoble, par I. Joncour et F. Malbet.

Des séminaires ont été donnés à Paris par Florentin Millour, Marc Ollivier, Pierre Baudoz, Pascal Petit, Stéphane Jacquemoud, Olivier Arcizet, et à Grenoble par Daniel Bonneau, Eduardo Martin, Hervé Le Coroller.

ACTIVITÉS DE RECHERCHE DU LABORATOIRE D'INTERFÉROMÉTRIE STELLAIRE  
ET EXO-PLANÉTAIRE (LISE)

L'équipe a poursuivi ses recherches sur ses thèmes principaux que sont l'amélioration de la résolution des images astronomiques et de leur dynamique, pour mieux voir les détails des étoiles et aussi leurs planètes. La construction ébauchée d'un hypertélescope de 60 m, extensible à 200 m bénéficie cette année encore d'importantes contributions bénévoles par des astronomes amateurs, particulièrement A. Rondi. L'équipe a aussi accueilli depuis le 1<sup>er</sup> janvier M<sup>lle</sup> F. Allouche, doctorante libanaise recrutée sur un poste d'ATER du Collège de France, qui prévoit de soutenir sa thèse en janvier 2011 et de contribuer ensuite à la construction de l'hypertélescope prototype. Elle a aussi accueilli depuis le 1<sup>er</sup> septembre M<sup>elle</sup> R. Chakraborty, chercheuse post-doctorale indienne recrutée comme maître de conférence associée du Collège de France.

**Hypertélescope prototype à l'observatoire de Haute-Provence**

*J. Dejonghe, H. Le Coroller*

En 2003 a démarré, à l'observatoire de Haute-Provence (OHP), l'étude et la construction du premier prototype d'hypertélescope, en vue de valider l'ensemble du train optique du concept Carlina : miroir primaire sphérique dilué (base 10,5 m, extensible à 17,5 m), nacelle focale comprenant un correcteur d'aberration de sphéricité, un densifieur de pupille et une caméra à comptage de photons, nacelle de métrologie, l'ensemble étant suspendu à un trépied de câbles tendus sous un ballon à hélium.

Après l'obtention des premières franges d'interférence sur l'étoile Vega en 2004, grâce à une optique simplifiée, puis la validation sur le ciel du correcteur d'aberration de sphéricité en 2006, nous avons poursuivi avec l'implantation de l'ensemble des sous-systèmes nécessaires à un véritable instrument : asservissement du trépied de câbles, métrologie laser, nacelle focale complète.

L'année 2010 a été principalement dédiée à la mise au point en grandeur réelle du système d'asservissement étudié et construit auparavant, et à la construction d'une métrologie laser permettant de co-sphériser à quelques microns près les miroirs constituant le primaire géant dilué. Le système d'asservissement, constitué de trois treuils spéciaux tirant sur les câbles du trépied en fonction d'un signal d'erreur obtenu par visée laser, permet de stabiliser la nacelle de métrologie avec une précision inférieure au millimètre, tandis que le ballon oscille dans le vent de plusieurs mètres. Un laser blanc, aussi appelé supercontinuum, émet depuis le sol un faisceau en direction de la nacelle de métrologie située à 70 mètres de hauteur, pour y former une source virtuelle. Celle-ci éclaire les miroirs primaires, puis par retour inverse, forme une image sur une caméra rapide au sol. Les premières interférences de métrologie en lumière laser blanche ont ainsi été obtenues en septembre 2010, permettant de co-sphériser à quelques microns près des miroirs primaires.

L'intégration de la nacelle focale complète et les premières observations stellaires sont prévues pour 2011-2012. Nous pourrons ainsi évaluer les performances réelles de l'hypertélescope, sa magnitude limite, le rapport signal/bruit, etc., et proposer à la communauté scientifique la préparation d'un grand projet de plusieurs centaines de mètres de base.

### **Étude et essais pour un hypertélescope à ouverture de 200 m dans les Alpes du Sud**

*A. Labeyrie, A. Rondi, A. Surya, S. Saha*

La géométrie sphérique, maintenant envisagée pour les interféromètres « hypertélescopes », ne nécessite pas de lignes à retard et permet de ce fait l'utilisation d'ouvertures nombreuses, permettant l'obtention d'images directes, riches en information. Mais elle nécessite un site ayant une topographie approchant la forme hémisphérique idéale, ou hémicylindrique si l'on se contente d'observer les étoiles au moment de leur passage méridien. Des vallées glaciaires profondes ont une forme qui peut convenir, mais sont souvent incluses dans des parcs nationaux ou autres zones protégées. Cependant, l'implantation d'un hypertélescope peut y être effectuée de façon presque invisible, au moyen de structures légères et démontables utilisant de petits miroirs portés au sol par des tripodes, et une caméra focale suspendue à un câble amovible en dehors des nuits d'observation.

Après les essais de l'été précédent dans les Pyrénées aragonaises, il s'est avéré difficile d'obtenir une réponse des autorités provinciales quant à l'installation d'un hypertélescope dans ce site.

Un autre site, situé à 2 100 m d'altitude dans les Alpes du Sud près du col de la Cayolle, a été sélectionné. Après une mission de reconnaissance à ski au printemps, et l'obtention d'autorisations du Parc national du Mercantour pour des essais, deux autres missions ont permis de préciser l'implantation et de mettre en place un câble amovible. Lors d'une prochaine mission hivernale, une version « modeste » de l'optique pourrait être mise en place. Celle-ci doit en principe

permettre d'atteindre une ouverture effective de 57 m. Ulérieurement, le profil courbe de la vallée pourrait permettre d'atteindre 200 m.

Le concept optique a été modélisé, par tracé de rayons et calcul d'interférences, par A. Rondi. Le modèle est aussi exploité par R. Chakraborty. Un multi-densifieur permettant d'avoir 21 canaux d'imagerie à haute résolution dans un champ de  $5 \times 5$  secondes d'arc a ainsi pu être conçu.

### **Simulations numériques d'imagerie hypertélescope par « *speckle interferometry* »**

*A. Surya, S.K. Saha, A. Labeyrie*

Les premiers hypertélescopes terrestres ne seront pas, initialement, équipés d'optique adaptative pour corriger la turbulence atmosphérique. Mais les simulations effectuées au Indian Institute of Astrophysics montrent que la méthode d'interférométrie des tavelures (*speckle interferometry*), et son extension utilisant une triple corrélation pour reconstruire des images, est applicable aux ouvertures diluées des hypertélescopes. Les résultats montrent une bonne reconstruction d'images d'amas d'étoiles, pour lesquelles l'exploitation de la rotation terrestre durant l'observation améliore sensiblement la qualité.

### **Étude d'un hypertélescope dans l'espace utilisant des miroirs piégés par laser**

*U. Bortolozzo, S. Residori, A. Labeyrie*

La théorie des hypertélescopes, élaborée depuis 1996 principalement par des équipes françaises, montre que leur capacité d'imagerie et leur production scientifique espérée, s'améliorent fortement lorsque la dimension des ouvertures diminue, à surface collectrice donnée. Cela signifie que des ouvertures petites et nombreuses sont préférables aux quelques grandes ouvertures utilisées jusqu'ici en interférométrie, par exemple avec le grand instrument européen *Very Large Telescope Interferometer* installé au Chili. Dans cette logique, nous avons proposé le concept d'une flottille de très petits miroirs piégés par un laser. Une géométrie très précise est définie par la forme de l'onde stationnaire piégeante, produite par l'interférence de deux ondes laser.

Avec des milliers de tels miroirs, ressemblant à des lamelles de microscope et s'étalant sur des dizaines ou centaines de kilomètres, des images très riches pourraient être produites. Il s'agit d'une version diluée du concept de miroir spatial piégé par laser proposé en 1978 par A. Labeyrie, dont l'étude a été poursuivie depuis avec le soutien financier de la NASA. Le fait de diluer le miroir semble faciliter sa mise en œuvre.

Des essais en laboratoire, sous ultra-vide approchant les conditions spatiales, ont été entamés à Sophia Antipolis par U. Bortolozzo et S. Residori à l'Institut Non Linéaire de Nice (Sophia-Antipolis).

## Astrophysique théorique et relativité générale

*R.A. Krikorian*

Selon Synge, la seule mesure fondamentale en relativité est la mesure du temps propre le long de la ligne d'univers d'une particule matérielle ; la masse, la longueur, etc. étant des concepts dérivés.

Adoptant le point de vue de Synge, R.A. Krikorian a présenté une caractérisation de l'accélération uniforme en relativité restreinte, basée sur la mesure du temps propre.

Traitant un problème de commande optimale dans l'espace-temps de Minkowski, où le paramètre de contrôle est la 4-accélération, il a montré que parmi les trajectoires admissibles passant par deux événements donnés A et B, la trajectoire qui obéit au principe du maximum de Pontriaguine est celle qui correspond au mouvement uniformément accéléré, le long de cette trajectoire l'intervalle de temps propre mesuré entre A et B étant extremum.

Ce travail a fait l'objet d'une publication.

### PUBLICATIONS

Labeyrie A., Dejonghe J., Le Coroller H., Residori S., Bortolozzo U., Huignard J.-P., « Resolved imaging of extra-solar photosynthesis patches with a "Laser Driven Hypertelescope Flotilla" », *Proc. conf. « Pathways toward Habitable Planets »*, Barcelone, septembre 2009 (Présentation disponible sur [www.oamp.fr/lise/publis/LabeyrieBarcelonaTrim.pdf](http://www.oamp.fr/lise/publis/LabeyrieBarcelonaTrim.pdf)).

Krikorian R.A., « On a chronometric characterization of uniformly accelerated motion in special relativity », *Nuovo Cimento*, 124, 2009, p. 785.

Krikorian R.A., Sedrakian D.M., « Superfluidity in curved space-time and Cattaneo's projection method », à paraître dans *Astrophysics*.

*En préparation :*

Surya A., Saha S.K., Labeyrie A., « Speckle Imaging with Hypertelescope ».

Le Coroller H., Dejonghe J., Rabou P., Rondi A., Chakraborty R., Labeyrie A., « Design of a 200 m spherical hypertelescope and larger space versions ».

### DISTINCTIONS

Le nouveau prix Fizeau, de l'Union astronomique internationale a été décerné à A. Labeyrie pour son œuvre en interférométrie stellaire.

Le site web du LISE ([www.oamp.fr/lise](http://www.oamp.fr/lise)) a été mis à jour et amélioré par M<sup>me</sup> V. Garcia qui prend en charge sa maintenance et l'implantation d'une version en anglais.

