

## **Astrophysique observationnelle**

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

### **I. Cours et séminaires**

Les progrès en cours et prévisibles des observations astronomiques à haute résolution angulaire ont encore fait l'objet du cours de cette année. La voie des télescopes géants dilués, encore nommés « hypertélescopes », explorée depuis une dizaine d'années, apparaît prometteuse. D'une part, la compréhension théorique de ces instruments et de leurs propriétés d'imagerie progresse et confirme l'amélioration de leur sensibilité, par rapport aux interféromètres plus classiques comportant un petit nombre de grandes ouvertures. D'autre part, les techniques visant à leur mise en œuvre se mettent en place. Un grand défi est de parvenir à rendre les hypertélescopes utilisables pour observer les objets les plus faiblement lumineux auxquels accèdent les télescopes classiques et leurs versions à venir nommées « Extrêmement Grands Télescopes », comportant un miroir mosaïque de 25 à 42 m.

Ces différents points ont été abordés dans le cours, et certains l'ont été dans les séminaires de Roberto Gilmozzi, Jean Surdej, Michel Aurière, Didier Pelat, Lyu Abe, Jean-Gabriel Cuby, Tristan Guillot, Guy Perrin et Hervé Le Coroller.

### **II. Activités de recherche du Laboratoire d'Interférométrie Stellaire et Exo-planétaire (LISE)**

Le groupe de recherche LISE associé à la chaire d'Astrophysique Observationnelle est hébergé à l'Observatoire de Haute Provence et à l'Observatoire de la Côte-d'Azur, sur ses sites de Grasse et de l'Observatoire de Calern.

#### **Hypertélescope prototype Carlina-tech (J. Dejonghe et H. Le Coroller)**

L'agrandissement du prototype est en chantier à l'Observatoire de Haute-Provence, avec une participation active de ses services techniques. Des essais d'observation utilisant trois miroirs espacés de 10 m sont prévus au début 2009.

Prévu initialement pour une ouverture diluée dont la dimension atteindrait 18 m, il pourrait être agrandi ultérieurement à 36 m s'il s'avère possible de construire un correcteur focal d'aberration sphérique ouvert à  $F/1$ . Le nombre des petits miroirs collecteurs pourrait aussi être accru, jusqu'à une centaine éventuellement, s'il s'avère utile, en attendant la disponibilité de la version agrandie mentionnée ci-après, d'entreprendre un programme d'observation sur des étoiles super-géantes, bien résolues avec les dimensions d'ouverture de 18 ou 36 m. Cela nécessiterait le déménagement de l'instrument sur un site plus favorable.

Après les premiers essais d'interférence qui ont validé partiellement le concept dit d'hypertélescope Carlina, J. Dejonghe et H. Le Coroller, revenu de séjour post-doctoral à Hawaii, ont augmenté le prototype en installant un troisième miroir collecteur, et un correcteur focal à deux miroirs. Ils ont aussi, avec l'aide de stagiaires, fait un montage d'essai du système de métrologie à laser servant à co-sphériser les miroirs collecteurs avec une précision de l'ordre du micron. Ils préparent des observations de franges à trois ouvertures, en attendant un plus grand nombre. Une caméra à comptage de photons, permettant des temps de pause très courts afin de « figer » la turbulence, a été construite en collaboration avec l'Observatoire de la Côte-d'Azur. Le densifieur de pupille, dispositif optique destiné à concentrer la lumière sur un nombre réduit de franges, a été étudié à l'aide du logiciel de simulations optiques Zemax et est en cours de construction à l'Observatoire de Haute-Provence. Enfin, un système d'asservissement permettant de stabiliser le trépied de câbles du ballon à hélium et ainsi d'améliorer la stabilité de l'ensemble du dispositif optique de l'hypertélescope est actuellement réalisé par des techniciens et ingénieurs de l'Observatoire de Haute-Provence. La mise en service du prototype Carlina à l'Observatoire de Haute-Provence, prévue pour 2009/2010, permettra de valider l'intégralité de la chaîne optique de l'hypertélescope, et d'évaluer les performances intrinsèques de l'instrument, notamment en observant des objets faibles (magnitude  $> 12$ ). Elle devrait ouvrir la voie pour un projet ultérieur à plus grande échelle.

### **Etude d'un hypertélescope à ouverture de 100 à 200 m**

(A. Labeyrie, J. Dejonghe, H. Le Coroller, D. Vernet, P. Rabou)

Une version agrandie, destinée à entreprendre un programme scientifique d'imagerie directe sur de nombreuses étoiles et sources extra-galactiques, est simultanément étudiée. Elle pourrait comporter, au foyer d'un miroir primaire dilué dont le diamètre atteindrait 100 ou 200 m et l'ouverture relative  $F/1$ , un correcteur compact d'aberration sphérique et un densifieur de pupille. L'utilité d'entamer, à cette échelle, des essais préalables sur une étoile artificielle ou bien sur l'étoile Polaire visée en exploitant la pente d'une falaise, est également étudiée. De tels essais sont peut-être évitables par une modélisation poussée du système (le télescope Hubble de la NASA n'avait pas été validé en visant une étoile avant son lancement, ce qui aurait révélé l'erreur catastrophique de fabrication optique apparue plus tard dans l'espace).

Après la construction, l'observation pourrait débiter avant de disposer d'optique adaptative corrigeant la turbulence atmosphérique, laquelle affecte la mise en phase des faisceaux. Il faudrait alors recourir à la méthode d'interférométrie des tavelures, qui a permis de retrouver la résolution théorique des grands télescopes classiques. Dans un second temps, une optique adaptative devrait former directement des images à haute résolution, riches en information. S'il s'avère possible d'ajouter un système d'étoile guide laser, mentionné ci-après, l'instrument deviendrait utilisable sur des sources faibles, telles que les galaxies lointaines observées par les ELTs.

### **Version pour hypertélescope d'une optique adaptative avec étoile guide laser** (A. Labeyrie)

Les systèmes d'étoiles guide laser, dont le principe fut d'abord publié par Foy et Labeyrie en 1985, ont été mis en œuvre sur les plus grands télescopes, sur lesquels elles permettent depuis quelques années d'étendre à des sources très faiblement lumineuses les techniques d'optique adaptative, et donc d'observer des objets très lointains avec une résolution améliorée. Il ne semblait pas facile d'adapter une étoile laser à un hypertélescope, pour étendre à des sources très faibles ses capacités d'imagerie à haute résolution. Cependant, une possibilité de solution, utilisant un système laser modifié, est apparue. La théorie a pu être vérifiée en partie avec un montage de laboratoire. En attendant la construction d'hypertélescopes dans l'espace, des versions terrestres pourraient donc devenir utilisable pour les observations de cosmologie sur les galaxies faibles et lointaines.

### **Faisabilité d'un hypertélescope couplé à un « Extremely Large Telescope » (ELT)**

Les projets actuels de construction d'ELTs, notamment par l'Europe, soulèvent la question des possibilités de couplage avec un hypertélescope. L'un des sites candidats étudiés par l'Europe, sur la sierra Macon dans les Andes d'Argentine, est une longue crête orientée nord-sud, interrompue par un col dont la topographie pourrait convenir pour un hypertélescope Carlina, lequel pourrait être couplé interférométriquement avec l'ELT. Ce dernier y gagnerait beaucoup quant à la science accessible, avec une résolution améliorée d'un facteur 10 à 20 ([www.oamp.fr/lise/](http://www.oamp.fr/lise/)).

### **Prospection de sites pour un hypertélescope**

(A. Labeyrie, J. Dejonghe, H. Le Coroller, D. Vernet, O. Lardière)

La prospection entamée les années précédentes a été poursuivie en mesurant la turbulence sur l'un des sites visités, à Barrosa dans les Pyrénées espagnoles. Une seule nuit d'observation avec un petit télescope portant une caméra a montré que la turbulence locale peut atteindre une bonne qualité, sans toutefois renseigner sur la fréquence des nuits utilisables. Mais les données météorologiques ont permis d'en avoir une idée grossière en précisant les statistiques de vent et de nébulosité sur ce site, lesquelles sont plus favorables qu'aux latitudes plus basses pour le vent,

et raisonnablement favorables pour la nébulosité. L'Observatoire du Pic du Midi, situé non loin sur le versant français de la chaîne, est réputé pour fournir occasionnellement des images exceptionnelles.

### **Etude d'un hypertélescope dans l'espace** (A. Labeyrie)

Après la proposition faite l'année précédente à l'Agence Spatiale Européenne ([www.oamp.fr/infoglueDeliverLive/www/OHP/Actualit%E9s?contentId=1148](http://www.oamp.fr/infoglueDeliverLive/www/OHP/Actualit%E9s?contentId=1148)), est apparue la possibilité d'une version « éthérée », utilisant de petits miroirs piégés par des faisceaux de laser. De grands miroirs formés de nano-particules piégées par laser avaient été étudiés les années précédentes, mais il s'agirait maintenant de constituer un grand miroir dilué en piégeant de petits miroirs solides. Le calcul de leur comportement est plus facile, ainsi que leur mise en œuvre, laquelle peut être expérimentée en laboratoire. Cette version est mentionnée de façon préliminaire dans une publication résumant la proposition (Labeyrie et al., 2008, <http://dx.doi.org/10.1007/s10686-008-9123-8>).

### **Astrophysique théorique et relativité générale** (R. Krikorian)

R. Krikorian a poursuivi l'étude de certains aspects de la supraconductivité dans un espace-temps courbe. L'interprétation physique des équations tensorielles décrivant la supraconductivité dans le cadre de la relativité générale présente des difficultés dues au fait que les relations permettant de passer des grandeurs tensorielles absolues aux grandeurs physiquement mesurables ne sont pas définies de manière univoque. Par exemple, il n'existe pas de façon unique de déduire du tenseur absolu champ électromagnétique les champs électrique et magnétique physiquement mesurables. Une première approche adoptée pour la formulation des équations tensorielles en terme de grandeurs physiquement mesurables a été la méthode des tétrades. Dans cette approche les équations sont écrites à l'aide d'invariants vis-à-vis des transformations générales des coordonnées d'espace-temps. Les champs électrique et magnétique, définis à l'aide des composantes anholonomiques du tenseur champ électromagnétique sont donc des scalaires qui se transforment selon les lois de la relativité restreinte dans un changement de repères orthonormés. Cette méthode a été notamment utilisée pour obtenir les expressions des champs électrique et magnétique à l'intérieur des supraconducteurs de type I et II (Nuovo Cimento, 2007, Astrophysics, 2008).

Il existe dans la littérature une autre approche pour l'interprétation des équations tensorielles absolues de la relativité générale, la méthode des projections de Cattaneo. Cette méthode, contrairement à l'approche anholonomique, a un caractère purement tensoriel ; les équations tensorielles absolues sont écrites sous une forme semblable à celle de la physique newtonienne et interprétées en employant le langage de la physique classique. Ce résultat est atteint : (i) par l'introduction, au moyen d'opérateurs de projections convenablement définis, de grandeurs « standard » relatives au système de référence associé au système de

coordonnées physiquement admissibles ; ces grandeurs se transformant selon les lois tensorielles classiques vis-à-vis des changements de coordonnées internes au système de référence ; (ii) en définissant un opérateur de dérivation transverse, partielle ou covariante. Les équations tensorielles absolues de London écrites à l'aide de ces grandeurs « standard » ont donc la même forme que les équations vectorielles classiques reliant la vitesse du superélectron au champ électromagnétique avec des termes supplémentaires représentant l'influence du champ de gravitation. Les expressions des champs électrique et magnétique déduites des équations « standard » ont été comparées à celles obtenues par la méthode anholonomique. Ce travail a fait l'objet d'une publication. En collaboration avec D. Sedrakian, Université d'état d'Erevan, la méthode de Cattaneo a été utilisée pour l'interprétation physique des équations covariantes décrivant les propriétés des supraconducteurs de type II. Ce travail sera soumis à la revue Phys. Rev. D.

### III. Publications, séminaires et conférences

Krikorian R.A., « Superconductivity in curved space-time and the object of anholonomy », *Nuovo Cimento B* 122, 401, 2007.

Krikorian R.A. & Sedrakian D.M., « Tetrad formulation of the dynamical equations of type II superconductors in curved space-time », *Astrophysics* 51, 58, 2008.

Sedrakian D.M. & Krikorian R.A., « Covariant formulation of the basic equations of quantum vortices in type2 superconductors », *Phys Rew B* 76, 184501-1, 2007.

Krikorian R.A., « Superconductivity in curved space-time and Cattaneo's projection method », *Nuovo CimentoB*, 123, 217, 2008.

Labeyrie et al., 2008, « Luciola hypertelescope space observatory: versatile, upgradable high-resolution imaging, from stars to deep-field cosmology », à paraître dans *Experimental Astronomy*, <http://dx.doi.org/10.1007/s10686-008-9123-8>.

Labeyrie A., Le Coroller H. & Dejonghe J., « Steps toward hypertelescopes on Earth and in space », *proc. SPIE conf.*, Marseille 2008

Deux journées de discussion sur le « Cophasage des ELTs, interféromètres et hypertelescopes », organisées au Collège de France par H. Le Coroller et A. Labeyrie les 18 et 19 mars 2008, ont rassemblé une vingtaine de chercheurs français et étrangers.

### Présentations invitées et séminaires

A. Labeyrie, invité à faire une présentation au colloque « Extremely Large Telescopes at Different Wavelengths » à Lund (Suède) les 29 et 30 novembre 2007, s'en est acquitté par vidéo-conférence.

A. Labeyrie, « Etoile guide laser pour hypertelescope », séminaire à l'Observatoire de Lyon, 21 mars 2008.

### Conférence publique et site web

A. Labeyrie, « Le regard des géants : les grands télescopes du futur changeront-ils notre conception actuelle de l'Univers ? » Planétarium de Vaulx-en-Velin, 20 mars 2008.

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.