

Astrophysique observationnelle

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

ENSEIGNEMENT

Cours : Exo-planètes, étoiles et galaxies : progrès de l'observation

Le cours donné au printemps 2013 concerne quelques résultats récents de l'observation astronomique, et l'émergence des nouvelles techniques et instruments visant une amélioration majeure de sa pénétration, notamment en ce qui concerne la résolution et la limite de magnitude. Les cours, disponibles en vidéo sur le site du Collège de France^a, ont porté sur les sujets suivants :

- 1) Quelques résultats récents de l'observation ;
- 2) Haute résolution angulaire et avancées de la science ;
- 3) Essais entamés pour « Hypertélescope Ubaye » (suite) ;
- 4) Concept pour un hypertélescope terrestre de 1000 à 1200 m (suite) ;
- 5) Planètes perdues en tant que lentilles gravitationnelles : observabilité de la focalisation diffractive ;
- 6) Rechercher la présence de vie au delà du système solaire.
- 7) Trois cours ont été donnés à l'Observatoire de la Côte d'Azur, rattaché à l'université de Nice-Sophia Antipolis. Ils concernent les sujets suivants :
 - 8) Essais en cours d'un hypertélescope prototype en Ubaye.
 - 9) Hypertélescope en Ubaye : possibilités d'agrandissement à 200 m pour la méta-ouverture de 57 m.
 - 10) Faisabilité d'hypertélescopes terrestres à méta-ouverture kilométrique et de versions spatiales plus grandes.

Ces cours ont abordé les découvertes majeures de l'observation astronomique ces dernières années et discuté leurs implications concernant notre compréhension d'objets proches et lointains, ainsi que l'Univers dans son ensemble. Ils ont aussi présenté les principes des nouveaux instruments, dont la construction est entamée ou prévue, les gains observationnels qu'ils devraient permettre, et les innovations techniques qu'implique leur construction.

a. <http://www.college-de-france.fr/site/antoine-labeyrie/course-2012-2013.htm> [Ndlr].

Séminaire général d'astrophysique

Les séminaires suivants, également disponibles en vidéo^b, ont été présentés :

– François Reynaud (université de Limoges) : « Méthodes innovantes pour l'imagerie à haute dynamique et haute résolution : les hypertélescopes temporels et la conversion de fréquence des rayonnements lumineux ».

– Paul Nunez (Collège de France) : « Perspectives offertes par l'imagerie à haute résolution angulaire grâce aux futurs interféromètres permettant d'étudier l'amplitude et l'intensité ».

– Martine Roussel (Éducation nationale) et Jérôme Maillot (Dassault Systèmes) : « Mesures topographiques et application à l'*hypertélescope Ubye* ». Projection du film de M. Roussel.

– Valerio Bozza (Università degli Studi di Salerno, Italie) : « Le grand Trou noir au centre de notre galaxie : une macrolentille spectaculaire ».

– Pierre Kervella (Observatoire de Paris-Meudon) : « Techniques innovantes pour l'étalonnage de l'échelle des distances des Céphéides ».

– Philippe Delorme (Observatoire de Grenoble) : « Planètes et naines brunes ».

Séminaires du cours délocalisé à l'observatoire de la Côte d'Azur

Claude Aime (université de Nice-Sophia Antipolis) : « Coronographes à occulteurs externes pour l'étude de la couronne solaire et des exoplanètes ».

Paul Nunez (Collège de France) : « Feasibility and performance studies of adaptively phased hypertelescopes ».

Frantz Martinache (Télescope Subaru) : « Imagerie super-résolution et haut contraste avec les noyaux de phase ».

Françoise Le Guet Tully et David Mary : « Haute résolution et interférométrie : éléments d'histoire ».

Autres enseignements

Une conférence publique « L'hypertélescope dans l'Ubaye » a été faite le 18 septembre par A. Labeyrie au centre Seolane de Barcelonnette, dans le cadre de l'école « High Angular Resolution for Stellar Astrophysics » organisée par l'Observatoire Européen Austral.

PUBLICATIONS

Articles originaux

Nunez P. & Labeyrie A., « Laser Guide Stars for Hypertelescopes » ; proc. Florence conf. « On Adaptive Optics for Extremely Large Telescopes », 26-31 mai 2013.

b. <http://www.college-de-france.fr/site/antoine-labeyrie/seminar-2012-2013.htm> [Ndlr].

Nunez P. « Laser Guide Stars for Hypertelescopes » ; proc. coll. « Improving the performances of current optical interferometers and future designs », Observatoire de Haute Provence, septembre 2013.

Nunez P., Labeyrie A. & Riaud P. « Towards Laser-Guide-Stars for Multi-Aperture Interferometry: an application to the hypertelescope », à paraître dans *Monthly Notices*, 2014.

Proposition soumise à l'Agence Spatiale Européenne (ESA) le 24 mai 2013 : A. Labeyrie, P. Riaud, S. Residori, U. Bortolozzo, F. Vakili. « Hypertelescope Optical Observatory (HOO). 1 to 100 km flotilla for direct images at microarc-second resolution on stars, exo-planets and deep fields ». <https://lise.oca.eu/IMG/file/WhitepaperProposalHypertelescope.pdf>.

Chapitres de livres

Labeyrie A., « Hypertelescopes : the challenge of direct imaging at high resolution », in proc. D. Mary, C. Theys and C. Aime (eds), *New Concepts in Imaging : Optical and Statistical Models*, *EAS Publications Series*, 59 (2013), 5-23.

AUTRES ACTIVITÉS

Principales conférences invitées

Conférence publique à Barcelonnette par Martine Roussel, avec projection de son film « Hypertélescope de l'Ubaye ».

Présentation faite par A. Labeyrie à l'Agence Spatiale Européenne le 3 septembre 2013 : « Hypertelescope Optical Observatory » <https://lise.oca.eu/IMG/file/HypertelescopeOpticalObservatoryLabeyrieESA.pdf>

Participation aux programmes nationaux et internationaux

Une collaboration internationale est envisagée pour initier le projet majeur « Extremely Large Hypertelescope » (ELHyT, évoqué ci-après), dont la méta-ouverture pourrait atteindre un diamètre de l'ordre du kilomètre en exploitant la topographie favorable que présentent certaines hautes vallées de l'Himalaya ou des Andes. Des contacts ont été pris avec des astronomes de divers pays concernés, Inde, Chine, Chili, pour étudier cette possibilité.

En réponse à l'appel à propositions émis par l'Agence Spatiale Européenne, une proposition spatiale intitulée « Hypertelescope Optical Observatory (HOO) : 1 to 100 km flotilla for direct images at microarcsecond resolution on stars, exo-planets and deep fields » a été soumise par Antoine Labeyrie, Stefania Residori, Umberto Bortolozzo, Denis Mourard et Pierre Riaud.

Avec d'autres propositions reçues par l'Agence, celle-ci a fait l'objet d'une présentation orale par A. Labeyrie, lors des journées ESA organisées à Paris les 8 et 9 septembre 2013 (<https://lise.oca.eu/IMG/file/HypertelescopeOpticalObservatoryLabeyrieESA.pdf> et : <https://lise.oca.eu/IMG/file/WhitepaperProposalHypertelescope.pdf>).

1. Essais exploratoires d'un hypertélescope en Ubaye

(Roussel, Maillot, Mourard, Prudhomme, Bondoux, Riaud, Rochaix, Dali-ali, Labeyrie)

Depuis la description initiale des nouveaux instruments appelés « hypertélescopes » (Labeyrie 1996), différents auteurs ont exploré leurs propriétés d'imagerie par analyse théorique, simulation numérique et expérimentation de laboratoire sur banc d'optique. Les résultats indiquent leur intérêt comme candidats à la succession des télescopes conventionnels, pour accroître leur résolution. Après des essais célestes, à échelle miniature, ils justifient maintenant des essais de mise en œuvre, à une échelle représentative des possibilités et besoins des programmes observationnels, avec un diamètre de méta-ouverture dépassant celui des plus grands télescopes existants ou en projet.

La construction, dans une haute vallée des Alpes du Sud, d'un prototype « Ubaye Hypertélescope » de ce nouveau type d'instrument astronomique a été entamée en 2011, et poursuivie cette année. L'implantation de deux premiers éléments, espacés de 16 m, d'un miroir géant « dilué » a été complétée par la mise au point de procédures d'alignement.

En juillet 2013, la focalisation de l'étoile Véga sur la nacelle focale a pu être obtenue. Et l'alignement du faisceau coudé, destiné à renvoyer au sol la lumière de l'étoile ainsi focalisée sur la nacelle, a pu être expérimenté avec des rayons de laser émis à partir des miroirs primaires. Après des essais statiques, la nacelle occupant une position fixe, son mouvement programmé de poursuite de l'image focale a été activé et la capture des faisceaux laser au foyer coudé a encore pu être obtenue. Le mouvement de poursuite stellaire de la nacelle a lui-même pu être vérifié.

Ces essais ont ainsi permis de vérifier la faisabilité du concept d'hypertélescope à géométrie sphérique, lequel est en quelque sorte une version optique et diluée du grand radiotélescope d'Arécibo. La stabilité obtenue, à l'échelle du millimètre pour le mouvement de la nacelle focale, correspond aux prévisions et devrait convenir pour l'exploitation astrophysique, notamment lorsque des asservissements d'autoguidage auront été mis en place.

D'avantage encore que l'année précédente, la campagne d'été à grandement bénéficié de contributions par des astronomes amateurs, des étudiants stagiaires et des bénévoles.

Pour la campagne prévue durant l'été 2014, les ajouts prévus concernent notamment une nouvelle optique focale conçue pour recevoir les faisceaux d'une centaine de miroirs primaires, et comportant une caméra à haute sensibilité.

2. Faisabilité d'une étoile guide laser pour hypertélescopes

(Nunez, Labeyrie)

Dans le cadre de son séjour postdoctoral, P. Nunez a exploré, par des simulations numériques et un montage optique en laboratoire, la possibilité d'adapter aux hypertélescopes, sous une forme modifiée, les techniques d'étoile guide laser qui permettent de cartographier les erreurs de phase sur l'onde lumineuse reçue d'une

étoile à travers l'atmosphère. En attendant les versions d'hypertélescope dans l'espace, cette technique pourrait permettre de corriger adaptivement l'effet de la turbulence atmosphérique sur des sources faibles, et donc d'étendre les possibilités de haute résolution angulaire aux galaxies lointaines et autres sources cosmologiques. P. Nunez a présenté ses premiers résultats aux colloques de Florence et de l'Observatoire de Haute Provence. Les articles correspondants indiquent que la méthode est applicable en principe, mais nécessite une puissance de laser élevée.

3. Faisabilité d'un « Extremely large hypertelescope » (ELHyT) (suite)

(Mourard, Nunez, Labeyrie)

Les essais entamés, visant sur le site de la Moutière un diamètre de méta-ouverture de 57 m, extensible à 200 m, indiquent que des dimensions bien supérieures peuvent être envisagées dans d'autres sites de vallées possédant un plus grand rayon de courbure. Quelques unes, repérées sur les images satellitaires dans les Andes chiliennes et l'Himalaya, pourraient permettre de dépasser un kilomètre. Une collaboration amorcée avec des astronomes indiens prévoit une prospection de ce dernier massif. La perspective d'exploiter les progrès récents de petites machines volantes électriques finement stabilisables, par exemple des hélicoptères miniature à rotor multiple, semble intéressante pour faciliter l'emport de la nacelle focale, en évitant l'utilisation d'un câble porteur ou d'un ballon captif.

4. Étude et proposition d'un « Hypertelescope optical observatory » dans l'espace

(Labeyrie et al.)

Après plusieurs propositions faites depuis une décennie à la NASA et l'Agence spatiale Européenne (ESA) pour des hypertélescopes dans l'espace, sous la forme d'une flottille de miroirs, la proposition d'un « Hypertelescope optical observatory » a été soumise en réponse au dernier appel de l'ESA. Elle concerne un instrument polyvalent, modulaire et extensible, capable d'accroître fortement la pénétration optique des observations astronomiques. Trois options de pilotage sont proposées, utilisant respectivement des micro-fusées, des micro-voiles solaires, ou encore une technique de piégeage laser dans des ondes stationnaires. Cette dernière permettrait d'utiliser des miroirs très petits, typiquement 30 mm, mais très nombreux, qui semblent avantageux pour la qualité d'imagerie théorique et la mise en œuvre technique. Des essais en laboratoire ont été entamés sous-ultra vide.

5. Méthodes de déconvolution des images produites par les hypertélescopes

(Aime, Mary, Nunez)

Les simulations numériques entamées l'année précédente par D. Mary et C. Aime en modifiant des algorithmes classiques de déconvolution pour les adapter au cas des images directes que produisent les hypertélescopes, ont été poursuivies par eux et par P. Nunez qui a reprogrammé les algorithmes et confirmé les possibilités de la méthode.