

émises par la source. L'astronome regarde à travers un interféromètre comme quelqu'un qui observerait une maison dissimulée derrière une palissade ajourée. Il verrait une image partielle de la maison, mais, en se déplaçant à bicyclette devant la palissade, la maison défilerait entre les planches de la clôture. De même, les astronomes combinent plusieurs lignes de base, de sorte que les images sont plus précises.

Difficultés de mise en œuvre

Un interféromètre optique évite les difficultés de construction et les coûts exorbitants des télescopes géants, mais pose des difficultés spécifiques. Ainsi, les faisceaux lumineux de chaque télescope sont convoyés sur des dizaines, voire sur des centaines de mètres jusqu'au laboratoire où ils interfèrent. Or, des ondes lumineuses de différentes longueurs d'onde ne se propagent pas à la même vitesse dans l'air. Pour préserver les

interférences, les faisceaux sont donc convoyés dans le vide. Ces difficultés impliquent que le coût de l'infrastructure d'un interféromètre augmente rapidement avec la longueur de sa ligne de base et le nombre de ses composants.

Un interféromètre de plus de deux télescopes engendre des images plus précises de l'objet étudié, car il produit des franges pour plusieurs lignes de base simultanément. Toutefois, la multiplication des télescopes a aussi sa limite. Ainsi, dans un interféromètre à dix télescopes, chaque faisceau devrait être séparé en neuf sous-faisceaux que l'on combinerait avec les sous-faisceaux des autres télescopes. Ces séparations successives diminuent la sensibilité de l'interféromètre, car chaque groupe de franges est produit avec un nombre réduit de photons. Pour cette raison, le nombre maximum de télescopes utilisables est compris entre 5 et 20. Par ailleurs, la complexité du système optique nécessaire pour combiner tous ces faisceaux croît rapidement,

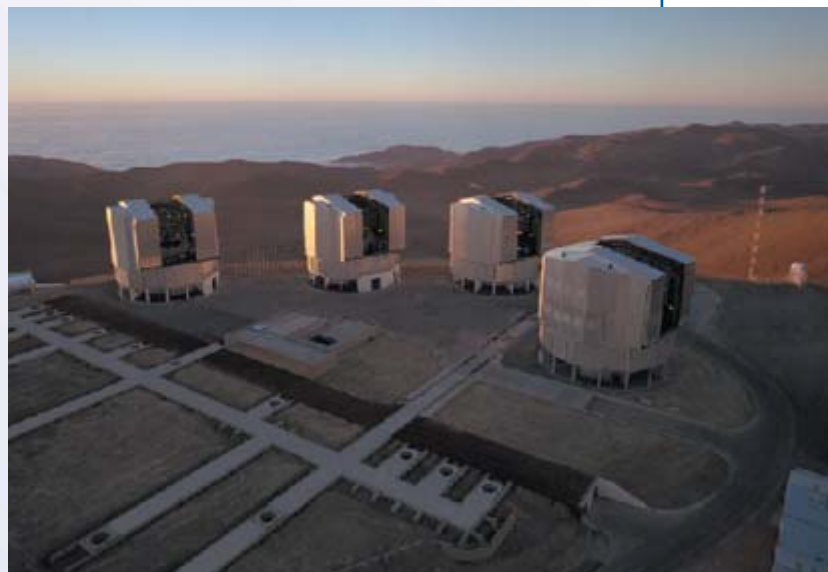
car le nombre de lignes de base disponibles augmente très vite avec le nombre de télescopes. Ainsi, deux télescopes ont une seule ligne de base, mais 10 en ont 45 possibles. Notons en outre que, sur chaque trajet lumineux, chacun des nombreux miroirs absorbe environ un pour cent des photons qu'il reçoit...

Si la turbulence atmosphérique est la plaie des grands télescopes, elle est aussi celle des interféromètres. Son effet est de faire trembloter les étoiles dans le ciel, introduisant ainsi une fluctuation constante des positions stellaires. Le recouvrement des paires de faisceaux est alors imparfait, voire insuffisant. Pour cette raison, les astronomes placent sur le chemin de chaque faisceau des miroirs qui corrigent l'orientation en fonction de la mesure que des capteurs font de la turbulence. Ces corrections ressemblent à celles qu'utilise l'optique adaptative, mais sont loin de résoudre tous les problèmes. La turbulence atmosphérique crée un autre obstacle : elle retarde chaque faisceau d'une façon

Comme la réalisation d'un tel instrument s'est heurtée à des obstacles quasi insurmontables, les astronomes ont opté à partir de 1987 pour un ensemble de quatre télescopes de 8 mètres de diamètre : le VLT. Un tel dispositif est tout aussi sensible qu'un télescope de 16 mètres de diamètre, puisque sa surface collectrice est la même. En outre, sa conception marie l'exploitation conventionnelle des télescopes avec une utilisation sur le mode interférométrique. Quand il est utilisé ainsi, le VLT devient le VLTI et constitue l'interféromètre optique le plus sensible du monde. Sa résolution équivaut à celle d'un télescope géant de 130 mètres de diamètre !

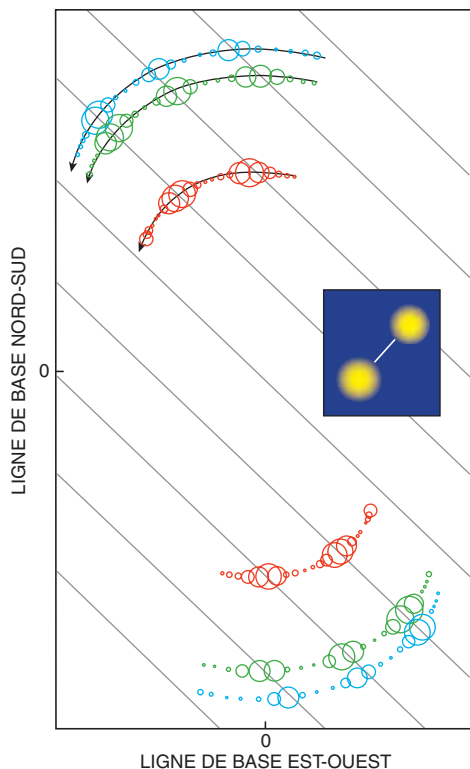
Les astronomes européens ont décidé de rendre le VLTI encore plus performant en lui adjoignant trois télescopes de 1,80 mètre mobiles sur une base de 200 mètres de long. Ainsi, le VLTI exploitera sept télescopes, dont quatre géants. Toute l'installation sera automatique, et il suffira aux astronomes de programmer leurs séquences de mesure pour l'exploiter. Le VLT vient de subir un premier test de fonctionnement à partir de deux sidérostats. Les astronomes ont mesuré le diamètre apparent de l'étoile de Sirius et trouvé $0,00929 \pm 0,00017$ seconde d'angle, un résultat en parfait accord avec la valeur du diamètre de l'étoile géante.

Aujourd'hui, les astronomes s'intéressent à l'interférométrie de très près, car c'est la seule méthode disponible pour rechercher et étudier les planètes extra-solaires de type terrestre. La NASA en a fait la pierre angulaire de son programme *Origins*, consacré à la recherche de la vie en dehors du Système solaire. Dans ce cadre, ses efforts en interférométrie au sol portent principalement sur l'interféromètre *Keck*. L'Agence spatiale prépare aussi pour la fin de la décennie le satellite *Space Interferometry Mission*. Il tentera de détecter de façon indirecte des planètes de type terrestre depuis l'espace, grâce à son interféromètre embarqué. Pour sa part, l'Agence spatiale européenne prépare la mission *DARWIN* de recherche de vie extrasolaire pour 2020. L'idée est de créer simultanément des interférences à partir de la lumière des astres lumineux du voisi-



nage solaire et à partir d'un autre signal beaucoup plus faible. Normalement indécélables dans le bruit de fond, les franges d'un objet peu lumineux deviendront visibles si elles sont placées à l'intérieur des franges sombres d'un astre lumineux, qui normalement nous aveugle. Grâce à cette astuce, les astronomes espèrent percevoir des signaux environ un million de fois plus faibles que les signaux stellaires habituels, ce qui devrait rendre les exoplanètes directement observables. Si une éventuelle exo-Terre était observée ainsi, son spectre serait analysé dans l'espoir d'y détecter la raie de l'ozone, la signature de la présence d'une forme de vie utilisant le carbone et l'oxygène.

Fabien MALBET, CNRS, Observatoire de Grenoble est responsable scientifique du projet AMBER.



5. L'ÉTOILE BINAIRE CAPELLA de la constellation du Cocher produit ce type de franges obtenues par l'Interféromètre Mark III. À mesure que la Terre tourne, la ligne de base de l'interféromètre décrit un arc d'ellipse. La taille des cercles indique l'intensité des franges d'interférence observées pour trois longueurs d'onde (les trois couleurs). Les positions où la visibilité est maximale sont situées sur des lignes régulièrement espacées. Les deux étoiles de Capella sont orientées perpendiculairement à ces lignes et sont séparées d'une distance qui varie en sens inverse de la distance entre les lignes.

non seulement aléatoire, mais très variable, car les télescopes reçoivent des ondes qui ont traversé des zones de turbulence différentes. La qualité des interférences et des franges est dégradée. Cet effet doit être éliminé aussi bien que possible, tout particulièrement lorsqu'on scrute des étoiles peu brillantes ou si l'on veut améliorer la précision.

Toutes ces indispensables corrections limitent la sensibilité des interféromètres, et l'augmentation de la taille des télescopes ou des temps de pose n'y fait rien. L'information nécessaire aux corrections est mesurée sur le signal émis par l'objet étudié ou par un de ses tout proches voisins. Les ouvertures des télescopes utilisés pour cette mesure doivent ne pas excéder 20 centimètres, ce qui permet de suivre une seule tavelure à la fois ; de plus, l'information doit être obtenue en moins de 10 millisecondes, de

sorte que la turbulence atmosphérique n'ait pas le temps de faire bouger notablement les franges ni les tavelures. L'image des franges doit être enregistrée en quelques millisecondes, là encore pour éviter que la turbulence atmosphérique ne brouille les franges.

Au final, l'interférométrie optique nécessite la maîtrise de techniques complexes et nombreuses. Elles vont de l'emploi de photo-détecteurs ultrarapides à celui d'ordinateurs capables d'enregistrer plusieurs gigaoctets par nuit, en passant par l'utilisation de lasers à fréquences stabilisées pour le contrôle des lignes de retard une fois par milliseconde. Ces diverses techniques sont progressivement devenues disponibles au cours des vingt dernières années, mais les astronomes ne savent les utiliser de façon optimale que depuis peu.

Quelles perspectives pour l'interférométrie optique ?

Cette complexité technique confère aux interféromètres optiques actuels une limite incontournable : ils sont peu sensibles. En fait, ils le sont à peine plus que l'œil nu, malgré leur excellente résolution angulaire ! Même si cet état de fait limite les observations à quelques milliers d'étoiles parmi les plus brillantes, les interféromètres procurent aux astronomes des données si intéressantes qu'elles justifient à elles seules les efforts déployés. Heureusement, ces limites seront dépassées dès que des dispositifs d'optique adaptative plus performants seront disponibles sur les groupes de télescopes géants.

Les interféromètres optiques et infrarouges que les astronomes sont en train de construire sont déjà plus perfectionnés. Ainsi, des interféromètres à plusieurs télescopes devraient bientôt fonctionner. C'est le cas, par exemple, du NPOI (*Navy Pro-*

totype Optical Interferometer) construit en Arizona, avec six télescopes et 15 lignes de base disponibles. S'ils disposent de suffisamment de données, les astronomes pourraient, en principe, dès aujourd'hui cartographier la surface d'une étoile, s'ils employaient des méthodes inspirées de celles de l'interférométrie radio. Dans la pratique, l'interférométrie optique ne s'applique pour le moment qu'aux objets qui ont la structure la plus simple : les étoiles binaires. Cependant, les astrophysiciens mettent déjà au point les algorithmes nécessaires à la cartographie d'étoiles elliptiques, d'étoiles tachées, d'étoiles qui éjectent de la matière, etc. Un long chemin doit néanmoins être encore parcouru avant que les interféromètres optiques n'atteignent l'efficacité de leurs cousins opérant aux grandes longueurs d'onde du domaine radio.

Deux interféromètres équipés d'optiques adaptatives de pointe rendront possible d'ici peu l'observation d'objets de faible luminosité avec une résolution angulaire exceptionnelle. Il s'agit du VLT (le *Very Large Telescope* de l'Observatoire européen austral, au Chili) qui exploite un réseau de quatre télescopes de huit mètres, et de l'Interféromètre *Keck* composé de deux télescopes de dix mètres espacés de 85 mètres. Ces installations seront bientôt complétées à l'aide de petits télescopes plus espacés. On pense aussi utiliser des interféromètres satellisés, ce qui éviterait les difficultés liées à la turbulence atmosphérique. Trois projets sont en cours : *Space Interferometer Mission*, *Terrestrial Planet Finder* et *MicroArcsecond X-ray Imaging Mission*, qui visent à doter l'astrométrie, c'est-à-dire la branche de l'astronomie qui mesure les positions des étoiles, d'une précision de l'ordre du millionième de seconde d'angle, laquelle est nécessaire à la détection des exoplanètes.

Arsen Hajian est astronome à l'Observatoire naval des États-Unis, et a rejoint le groupe du NPOI en 1995. Thomas Armstrong est astronome au Laboratoire de recherche navale de Washington. Il est l'un des concepteurs du NPOI. Pierre LÉNA, *Méthode de physique de l'Observation*, éditions du CNRS, 1996. John W. Hardy, L'optique adaptative, in *Pour la Science*, n° 202, août 1994.

M. SHAO et COLAVITA, *Long-Baseline Optical and Infrared Stellar Interferometry*, in *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics*, vol. 30, pp. 457-498, 1992.

Thomas ARMSTRONG, Donald HUTTER, Kenneth JOHNSTON et David MOZURKEWICH, *Stellar Optical Interferometry in the 1990s*, in *Physics Today*, vol. 48, n° 5, pp. 42-49, mai 1995.