

d'optique adaptative fonctionne «à l'envers»: il prépare le faisceau laser en déformant exprès sa lumière avant qu'il ne traverse les turbulences de l'atmosphère. Nous calculons les distorsions de telle sorte qu'elles annulent les effets des turbulences. Et le faisceau laser est bien focalisé lorsqu'il sort de l'atmosphère, comme s'il n'avait pas été perturbé.

En plus de suivre les débris spatiaux, nous espérons être capables de mettre à profit cette technique pour dévier des objets dont la trajectoire pourrait conduire à une collision. Nous voulons utiliser la pression de radiation exercée par la lumière quand elle est réfléchie sur un objet afin d'en modifier le mouvement. Pour que l'effet soit le plus efficace possible, nous avons besoin de l'optique adaptative afin de focaliser le faisceau laser précisément où nous voulons qu'il agisse. Des lasers d'une puissance de 10 kilowatts pourraient ainsi dévier les débris (les lasers de soudage ont typiquement une puissance de 50 kilowatts). Cette stratégie ne réduirait pas la quantité de débris en orbite, mais elle contribuerait à éviter les collisions entre débris, et peut-être retarder la réalisation du scénario catastrophe de Kessler. À terme, de tels systèmes pourraient être mis en œuvre tout autour de la Terre pour aider à gérer l'environnement spatial.

ÉPAULER LES TRANSMISSIONS QUANTIQUES

L'optique adaptative pourrait encore aider à une autre forme de sécurité, celle des communications. Pour éviter que des données sensibles ne soient interceptées et lues par un tiers, l'information est aujourd'hui chiffrée par des techniques qui reposent sur des problèmes mathématiques difficiles à résoudre en temps utile. Les systèmes de paiement en ligne et diverses autres applications utilisent de telles technologies de communications rapides et sécurisées. Mais ces méthodes fonctionnent uniquement parce que les ordinateurs actuels ne sont pas capables de résoudre assez vite les problèmes mathématiques sous-jacents. Or les ordinateurs quantiques, dont les performances ne cessent de progresser, seront bientôt en mesure de les mettre en défaut. Malgré le développement d'autres techniques de chiffrement innovantes pour sécuriser les données, personne n'a encore trouvé de protocole infaillible. La physique quantique pourrait apporter une solution.

La cryptographie quantique (ou distribution quantique de clé) repose sur les propriétés des photons, les particules de la lumière, et sur les lois de la physique quantique. L'élément central de tout système de chiffrement quantique est la «clé»: une suite de 0 et de 1 que les interlocuteurs se partagent pour chiffrer et déchiffrer leurs messages. Des générateurs quantiques de

nombres aléatoires peuvent ainsi fournir des clés robustes (les générateurs classiques peuvent au mieux produire un pseudoaléa dont les clés peuvent être prédites). Ces clés sont générées à un rythme élevé, ce qui permet un usage unique. La difficulté pour deux interlocuteurs qui veulent établir une communication sécurisée est de s'échanger la clé sans qu'elle soit interceptée. La clé est transmise grâce à des photons. Or les lois de la physique quantique indiquent que si une personne tente de mesurer ce signal, il en modifie inévitablement la teneur. Les deux interlocuteurs se rendent alors compte que la clé a été compromise, ils l'éliminent et en réémettent une nouvelle jusqu'à ce qu'ils aient



Les communications optiques pourront rivaliser avec celles par ondes radio



la certitude d'être les seuls détenteurs de la clé pour chiffrer leurs messages.

La clé peut être transmise par fibre optique ou à travers l'atmosphère grâce à un faisceau laser émis depuis un télescope optique et relayée par des satellites, qui renvoient ensuite le signal vers le sol. Or, comme dans le cas des débris spatiaux, les perturbations atmosphériques dévient la lumière du laser. Avec la technique d'optique adaptative, on peut corriger les effets des perturbations atmosphériques pour mieux cibler le satellite relais. En focalisant ainsi le faisceau, on est en mesure d'augmenter de façon considérable la quantité de données transférées par ce biais.

Cette stratégie permettra aux télécommunications optiques de concurrencer les grandes antennes paraboliques radio, en y ajoutant l'avantage d'être compatible avec une utilisation quantique. Il y a bien sûr d'autres obstacles à surmonter avant d'implémenter des télécommunications quantiques; par exemple, il est nécessaire de savoir stocker et acheminer l'information quantique sans perturber l'état quantique. Mais les chercheurs travaillent activement sur ces défis, et nous espérons parvenir à terme à créer un réseau global sécurisé grâce à la physique quantique. L'optique adaptative est un élément clé pour concrétiser ce rêve.

Ainsi, une technique auparavant réservée à l'étude du cosmos pourrait bientôt nous aider

à atteindre certains des grands défis technologiques de demain: le maintien de la sécurité dans l'espace et la sécurisation des communications. Mais, à leur tour, ces nouvelles applications feront progresser l'optique adaptative, pour le bénéfice de l'astronomie.

DE NOUVEAUX USAGES POUR LES TÉLESCOPES

Traditionnellement, à cause de son coût, l'optique adaptative était un investissement qui ne se justifiait que pour les plus grands observatoires. Mais la surveillance de l'espace et les communications gagneront beaucoup à utiliser l'optique adaptative même sur des télescopes de diamètre plus modeste. Dans cette situation, toutes ces communautés auront intérêt à s'entraider et à mutualiser leurs équipements. Les télescopes sous-utilisés trouveront une nouvelle vie quand ils seront équipés de systèmes d'optique adaptative. De leur côté, les contrôleurs de débris spatiaux sont à la recherche d'accès à des télescopes leur permettant de couvrir autant de latitudes et de longitudes que possible. Dans le cahier des charges de futurs observatoires, les astronomes pourraient envisager dès le début d'y ajouter des fonctionnalités permettant non seulement de faire de la recherche

BIBLIOGRAPHIE

N. Gisin, « **L'internet quantique est pour le physicien un défi fascinant** », *Pour la Science*, n° 528, pp. 22-27, octobre 2021.

N. Martinez et al., **Australia's first laser guide star : design and telescope integration at Mount Stromlo Observatory**, *Proc. SPIE, Adaptive Optics Systems VII*, vol. 11448, article 114481U, 2020.

J. C. Gonzalez Herrera et al., **L'ELT, le plus grand œil de la planète**, *Pour la Science*, n° 511, pp. 32-41, mai 2020.

astronomique, mais aussi d'étudier la situation spatiale et de réaliser des communications sécurisées. Cette ouverture pourrait donner accès à de nouvelles sources de financement, dont des partenariats avec des entreprises privées.

Nous abordons une époque multidisciplinaire dans laquelle le ciel est une ressource commune. Alors que nous avons rendu plus nets les contours des objets célestes, nous floutons les lignes de démarcation entre les diverses activités susceptibles d'utiliser les télescopes comme principal outil. Les chercheurs et ingénieurs qui développent les systèmes d'optique adaptative élargissent désormais leurs cercles de collaboration et occupent une place centrale dans cette nouvelle dynamique.

L'optique adaptative s'installe aussi dans de nouvelles applications... sans télescopes. L'une d'elles, maintenant assez répandue, est l'imagerie médicale et l'ophtalmologie, pour corriger les aberrations optiques produites par la traversée de tissus vivants et de l'œil. D'autres utilisations incluent l'optimisation de la focalisation du faisceau pour les outils laser industriels et même pour les lasers militaires antimissiles. Il n'a jamais été aussi passionnant d'explorer le potentiel de l'optique adaptative, que ce soit dans l'espace ou sur Terre. ■



PORTONS LA VOIX DE LA NATURE

Partagez notre
engagement !

Pour la
Science

Écoutez **Pour que nature vive**, des podcasts incarnés par des scientifiques pour comprendre le vivant.

18 épisodes en ligne sur le site du Muséum et sur les plateformes d'écoute.

Lisez les **Manifestes du Muséum**, une collection d'ouvrages qui offrent un éclairage scientifique sur des sujets d'actualité.

4 ouvrages déjà disponibles en librairie, nouvelle parution en novembre.

Participez aux **Tribunes du Muséum**, le rendez-vous qui remet la science au cœur du débat politique et social.

2 rencontres par an, captations vidéos sur le site du Muséum et sur Youtube.

Plus d'informations sur **mnhn.fr**