

## Jeux de lumière

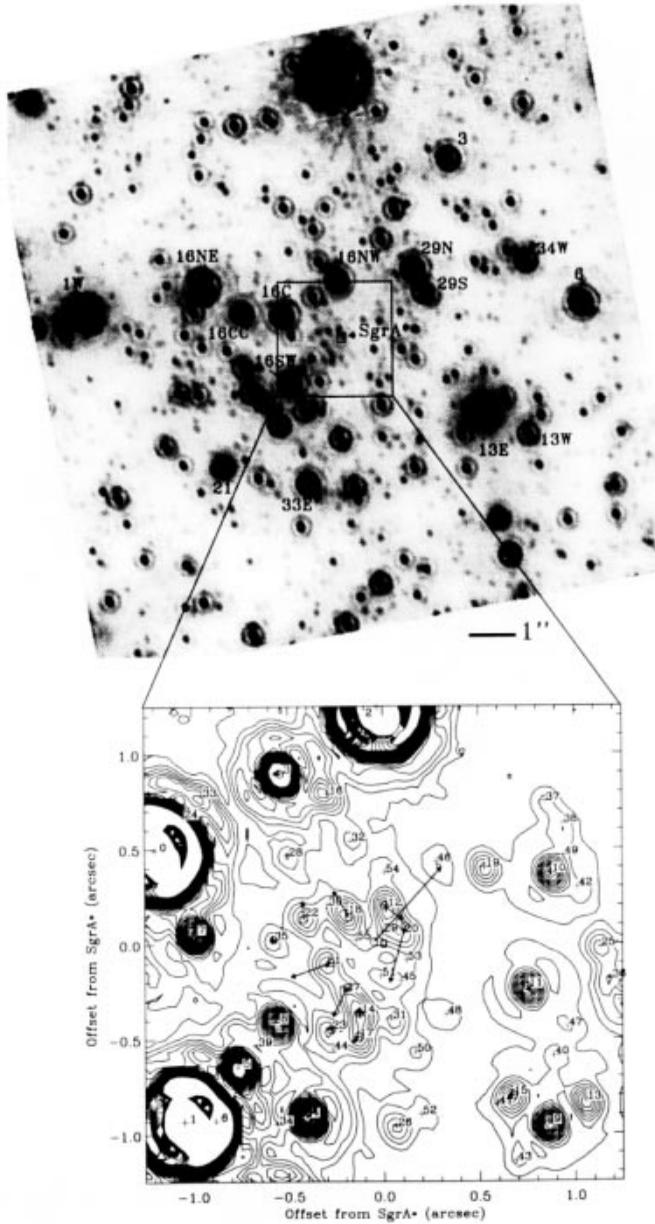
par Pierre LÉNA

Professeur à l'Université Paris VII-Denis Diderot

---

Le prodigieux de la physique, c'est la fécondité d'une idée simple, dans ces cas rares et superbes où elle repose sur l'acuité exceptionnelle d'un regard sur les choses, sur une intuition qui sonde le réel à d'insoupçonnables profondeurs, sur une expérience dont la simplicité n'égale que la richesse. Sans doute le génie n'est-il rien d'autre que cela, sinon peut-être le courage d'accepter qu'il ne soit que cela. Nous en donnerons ici deux illustrations, à propos du formidable renouvellement de l'observation astronomique dans le domaine optique (longueurs d'onde du visible et du proche infrarouge), un renouvellement lié à des idées si anciennes qu'elles paraissent tenir du pont-aux-ânes pour potache, mais marquées du génie visionnaire d'Isaac Newton et de Thomas Young. Méditer sur cette fécondité contient sans doute bien des leçons pour une pédagogie, et pour un anniversaire aussi essentiel que celui du *Bulletin de l'Union des Physiciens*.

Il existe un beau texte de Newton dans son *Optique*, trop long pour être ici cité dans son intégralité<sup>1</sup> : après Niccolo Zucchi et Marin Mersenne qui ont suggéré de réaliser un instrument réflecteur, Isaac Newton construit le télescope qui porte son nom (système à miroirs, donc achromatique, supérieur en cela à la lunette de Galilée qui le précéda) et s'interroge sur l'aspect flou des images astronomiques (...*those many trembling points...cause the Star to be appear broader than it is*) et sur le fait qu'une image d'étoile, donnée par un télescope, ne scintille plus. Il propose l'explication correcte, à partir des effets des inhomogénéités de température, donc d'indice de l'atmosphère terrestre (...*confusion of the Rays which arises from the Tremors of the Atmosphere.*), dont il souligne la rapidité d'évolution. Faute de pouvoir envisager de placer les télescopes dans l'espace, il suggère de les mettre sur de hautes montagnes pour améliorer ce que les astronomes aujourd'hui nomment le «seeing». L'étalement des images, ainsi qualifié, a pour conséquence qu'en passant d'un télescope de quelques pouces de diamètre au XVII<sup>e</sup> siècle aux géants du milieu du XX<sup>e</sup> siècle (Palomar, Zelentchuk, Hawaïi), la qualité d'image demeure limitée à une dimension angulaire d'une seconde d'angle, une demi- au mieux, soit cinquante fois inférieure à ce qu'autoriserait la limite de diffraction des grands télescopes. Le mal semblait incurable, et le télescope spatial Hubble fut décidé, au début des années 1960, non seulement pour collecter l'ultraviolet (et notamment la raie de résonance Lyman  $\alpha$  de l'hydrogène) absorbé par l'atmosphère terrestre, mais aussi avec l'ambition de



débarrasser le trajet lumineux de cette fâcheuse traversée d'une atmosphère terrestre hétérogène. A grand renfort de dollars, il y a admirablement réussi, comme chacun sait, après quelque aberration de sphéricité corrigée depuis la mission de réparation de décembre 1994.

Peut-être Horace Babcock, ce physicien solaire américain, ou bien Vladimir Linnick, cet opticien soviétique, avaient-ils lu Newton plus attentivement que d'autres ? Indépendamment, l'un et l'autre suggérèrent en effet, au cours des années 50, que ce que l'atmosphère terrestre faisait aux images astronomiques, un dispositif correcteur pourrait le défaire. A l'image du carrossier décabossant une tôle en aplanissant ses bosses et en comblant ses creux, le front de l'onde lumineuse pourrait être redressé (ou les rayons remis sur le droit chemin), pourvu que l'on sache en mesurer creux et bosses. Il faudra vingt ans pour y croire, dix de plus à peine pour y parvenir en déployant des ressources d'informatique et d'automatique d'ailleurs modestes, jusqu'à ce que la première image astronomique, séparant une étoile double serrée jusque là noyée dans la confusion de l'étalement atmosphérique, soit obtenue en novembre 1989 à l'Observatoire de Haute-Provence<sup>2</sup>. Depuis cette date, la technique s'est perfectionnée, et le rêve de Newton (...to take away that confusion.) est presque réalisé : on n'envisage plus de construire un grand télescope qui ne soit équipé de cette «optique adaptative» : tous ceux de la génération des 8-10 mètres, aujourd'hui achevés ou en construction<sup>3</sup> vont en bénéficier, et des images possédant une résolution de quelques dizaines de millisecondes d'angle, effectivement limitées en résolution par l'ultime et incontournable diffraction<sup>4</sup> donc entourées des anneaux d'Airy bien connus, sont aujourd'hui obtenues (figure 1).

👉 **Figure 1** : Performances de l'optique adaptative. Elle montre une petite partie de la région centrale de notre Galaxie (le Centre galactique), distante d'environ 30 000 années-lumière du Soleil. Cette partie contient le centre de rotation de la Galaxie, repéré par la flèche et la mention SgrA\*, où se trouve une intense radio-source.

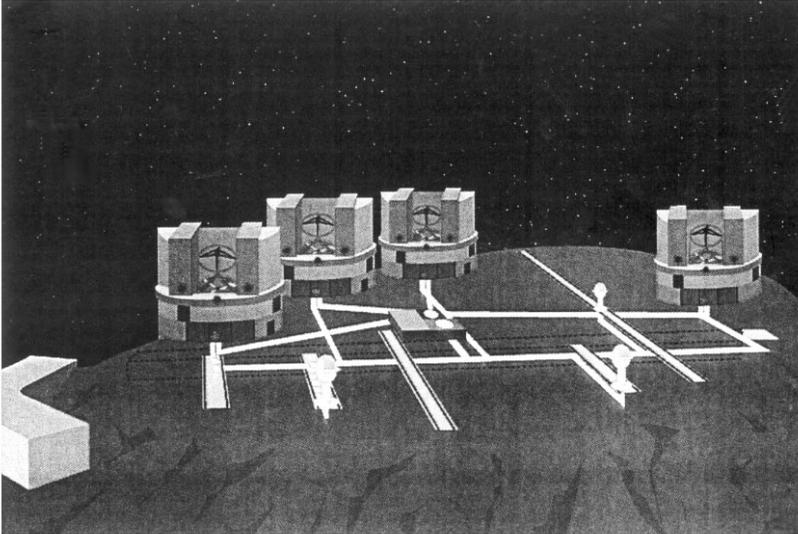
L'image fait  $13 \times 13$  secondes d'angle et représente la partie la plus centrale ( $1,6 \times 1,6$  année-lumière). Elle est obtenue à la longueur d'onde de  $2,2 \mu\text{m}$  (proche infrarouge) à l'aide du télescope Canada-France-Hawaii de 3,6 m, installé au sommet du Mauna Kea (Hawaii). A cette longueur d'onde et contrairement à ce qui se passe aux longueurs d'onde de la lumière visible, la lumière n'est que peu absorbée par les poussières présentes entre le Centre et nous. La résolution angulaire obtenue est de  $0,13''$ , pratiquement limitée par la diffraction comme le montrent les anneaux d'Airy entourant l'image de chaque étoile. Pour mesurer en temps réel les déformations de l'onde et informer le dispositif de correction, une étoile, plus brillante que celles de l'image, est sélectionnée à une distance angulaire de  $23''$ .

La partie inférieure est un agrandissement de la partie centrale, représenté en contours diso-intensité. La position du Centre (SgrA\*) est reportée comme un petit carré dont les côtés donnent l'incertitude (à un écart-type). Les positions des étoiles sont marquées par des (+) et ont pu être comparées à celles obtenues sur un autre cliché, antérieur de plusieurs mois. Le mouvement propre des étoiles s'en déduit, et les flèches sont proportionnelles aux vitesses calculées : la vitesse la plus élevée mesurée atteint  $2\,500 \text{ km s}^{-1}$ . De telles vitesses laissent penser que le Centre de la Galaxie pourrait contenir un trou noir très massif (un million de fois la masse du Soleil) autour duquel ces étoiles sont en orbite (François Rigaut, David Crampton, Daniel Rouan et al, *Astronomy & Astrophysics*, 1997, sous presse).

Thomas Young, physicien et médecin (c'est-à-dire homme de nature, φυσικς, comme l'explicite l'anglais par *physicist* et *physician*), est en 1801 l'auteur de l'expérience élémentaire et célèbre qui associe son nom à deux trous (ou deux fentes) éclairées par une source lumineuse et formant une figure d'interférence sur un écran placé en aval de cet obstacle. Les rôles joués par des versions successives de ce dispositif dans l'adoption d'un modèle ondulatoire pour la lumière, puis dans la mise en évidence du caractère quantique de l'interaction lumière-matière, enfin dans la démonstration d'une onde associée à l'électron sont trop connus pour être détaillés ici. Nous rappellerons simplement que le contraste (appelé *visibilité*) des franges obtenues s'affaiblit lorsqu'augmente la dimension angulaire de la source, vue depuis les fentes, ou bien à dimension angulaire donnée lorsqu'augmente l'écart entre les deux fentes : ce que l'on interprète en termes de cohérence de la lumière qui les illumine, le dispositif fonctionnant alors comme un simple système à mesurer la cohérence spatiale d'un rayonnement. On sait combien le génie d'Albert Michelson, au début de ce siècle, utilisa dans de multiples dispositifs expérimentaux cette souplesse des interférences lumineuses et la prodigieuse fécondité des idées qu'il émit<sup>5</sup>. Mais il est un point où Michelson ne fit que suivre, c'est celui de la mesure du diamètre des étoiles. C'est en effet Hyppolite Fizeau qui en proposa le principe en 1868, selon une simple extrapolation de l'expérience d'Young. Constatant l'impossibilité, mentionnée ci-dessus, d'obtenir avec un télescope terrestre des images précisément limitées par la diffraction, il propose de placer sur le miroir deux ouvertures assez petites<sup>6</sup> pour que se forment des franges d'Young dans le plan focal du télescope pointant une étoile. Pour une étoile de diamètre assez important, la visibilité des franges devait s'atténuer en écartant les ouvertures. Malheureusement Edouard Stephan, qui ne disposait que du télescope de 80 cm de l'Observatoire de Marseille, constate en 1874 que la distance des deux ouvertures est insuffisante : c'est donc Michelson, mobilisé sur le sujet dès 1890, qui, avec un ingénieux dispositif de bras augmentant la base utile sur le télescope de 2,5 m du Mont-Wilson, mesure en 1920, avec Pease, le premier diamètre stellaire, celui de l'étoile Bételgeuse ( $\alpha$  Orionis), soit 44,2 milli-secondes d'angle. Cet exploit reste sans lendemain<sup>7</sup> jusqu'à ce que le défi expérimental de coupler deux télescopes indépendants soit relevé en 1976 par le Français Antoine Labeyrie. L'interférométrie optique astronomique renaît alors, et plusieurs interféromètres à caractère expérimental, en France, en Australie, aux États-Unis, au Royaume-Uni résolvent aux longueurs d'onde du visible ou du proche infrarouge des disques d'étoiles, en mettent directement en évidence des pulsations de taille et des éjections de matière avec une précision sans précédent.

Aujourd'hui, l'idée de Young et de Fizeau s'est imposée dans la conception des télescopes géants dont cette fin de siècle voit l'achèvement. Ils ne sont plus réalisés à l'unité, mais par couples (les deux Keck-Telescopes de 10 m, le Large Binocular Telescope de 6.5 m) ou même par quatre, s'agissant du VLT européen avec ses quatre

télescopes de 8,2 m. La résolution de ces interféromètres, comparée à celle obtenue avec un télescope unique équipé d'optique adaptative, croît comme le rapport de la base utilisée (de l'ordre de cent à deux cents mètres) au diamètre du télescope, soit d'un facteur 25 environ. La surface des étoiles, mais aussi les disques qui les entourent et où se forment les planètes, les exo-planètes ou planètes situées autour d'autres étoiles que le Soleil, les noyaux des quasars, tous ces objets deviennent accessible à la détection ou à une cartographie détaillée.



**Figure 2 :** *Interférométrie optique avec le Very Large Telescope européen.* Cette vue d'artiste présente le sommet du Cerro Paranal, situé à 2635 m dans la cordillère côtière au Chili et sur lequel s'achève la construction du VLT. Quatre télescopes de 8,2 m de diamètre sont disposés approximativement en trapèze. Dans un mode d'observation particulier (dit interférométrique), la lumière de ces télescopes peut être acheminée dans un laboratoire central par des tunnels, la phase des ondes étant préservée jusqu'à la recombinaison de chacun des signaux dans ce laboratoire, où un détecteur va analyser la figure d'interférence obtenue (contraste des franges à différentes longueurs d'onde). Les télescopes de 8,2 m n'étant pas mobiles, ils ne peuvent explorer qu'une fraction de l'information spatiale issue de l'objet astronomique. Pour augmenter la capacité de l'instrument, plusieurs télescopes moins grands (1,8 m de diamètre) mais mobiles peuvent occuper l'une quelconque de trente positions où ils viennent se positionner, alimenter de leur lumière le foyer commun et contribuer à la figure d'interférence (trois d'entre eux, ressemblant à des coquetiers, sont représentés). Le dispositif doit entrer en service progressivement à partir de l'an 2000 (Document fourni par l'Observatoire Européen Austral).

Puissent ces quelques lignes éveiller le désir de ceux qui rêvent de laisser une trace dans cette longue histoire de la création scientifique, et leur donner la confiance qui permet d'aboutir. La beauté de la physique est inépuisable !

**BIBLIOGRAPHIE**

«*Adaptive optics in astronomy*», ouvrage collectif sous la direction de F. RODDIER, Cambridge University Press, 1997, sous presse.

H. FIZEAU : Comptes-rendus Académie des Sciences, Paris, **66**, 934, 1868.

P. LÉNA et A. BLANCHARD : «*Lumières, une introduction aux phénomènes optiques*», InterEditions, Paris, 1990.

«*Les Sciences du Ciel*», ouvrage collectif sous la direction de P. LÉNA, Flammarion, 1996.

S. LOISEAU et G. PERRIN : «*Interférométrie optique : ombres et lumières sur l'univers*», La Recherche, n° 292, novembre 1996.

A.A. MICHELSON, *Astrophysical Journal*, **51**, 257, 1920.

A.A. MICHELSON : «*Studies in optics*», Dover, 1995.

Sur la Toile :

*optique adaptative* : le site <http://hplyot.obspm.fr> donne des liens avec tous les systèmes en action dans le monde.

*interférométrie du VLT* : le site [www.hq.eso.org/eso-homepage.html](http://www.hq.eso.org/eso-homepage.html) montre le développement du VLT et le site : <http://huey.jpl.nasa.gov/olbin/> celui des programmes interférométriques des États-Unis au sol et dans l'espace.

**NOTES**

1. Newton, *Opticks*, dans l'édition de 1730.
2. Par une équipe de physiciens et d'astronomes français (Office national d'études et de recherches aérospatiales, Observatoire de Paris, Université Paris VII) associés à un physicien de l'Observatoire européen austral (ESO).
3. Citons par ordre de mise en service entre 1993 et 2002 les jumeaux du Keck-Telescope (10 m, Hawaï), le Very Large Telescope européen (4 fois 8,2 m, Chili), le Subaru japonais (8,4 m, Hawaï), le Large Binocular Telescope (2 fois 6,5 m, Arizona), les deux Gemini (8 m, Hawaï et Chili), etc.
4. Les microscopes optiques ont rencontré la même limite. On sait comment ils l'ont dépassée : faute de pouvoir fonctionner à des longueurs d'onde plus courtes (rayons X) où le maniement des éléments optiques devient impraticable à la précision recherchée, ils mettent à profit l'onde associée aux électrons, de plus courte longueur d'onde encore. Enfin, le microscope à effet de champ représente une autre révolution, exploitant une piste radicalement nouvelle par rapport à l'imagerie traditionnelle. Les astronomes ne peuvent pas entièrement suivre cette voie, l'imagerie à une longueur d'onde donnée s'imposant pour comprendre les mécanismes d'émission de telle ou telle raie spectrale essentielle. En outre, à la différence des microscopistes, les astronomes ne peuvent éclairer leur objet d'étude.

5. Un petit livre d'Albert Michelson, *Studies in optics*, pose avec la plus simple élégance les principes de ses dispositifs interférométriques ou spectroscopiques. Le plus grand interféromètre optique jamais réalisé est aujourd'hui en construction près de Pise (Italie) avec des bras de trois kilomètres de longueur, en vue de détecter les ondes gravitationnelles. Un dispositif analogue pourrait fonctionner dans l'espace, avec des bras un million de fois plus longs !
6. Nous savons aujourd'hui qu'il suffit que leur diamètre soit inférieur à une dizaine de centimètres pour que la cohérence spatiale de l'onde n'y soit pas significativement dégradée par l'effet de l'atmosphère.
7. Sans lendemain quant à l'interférence directe de faisceaux optiques «à la Young». La mesure, faite sur de longues bases, de la cohérence mutuelle de rayonnements issus d'objets astronomiques, ne cessera de se développer dès 1950 aux radiofréquences, plus aisées à manipuler, puis à la même époque aux fréquences optiques par l'interférométrie d'intensité aujourd'hui abandonnée, avec Robert Hanbury-Brown et Richard Twiss.