



7. LA «COLONNE» qui sert aux interventions par vidéo-chirurgie comporte une source lumineuse, un dispositif de contrôle de la pression du gaz injecté sous la paroi abdominale, un dispositif de reconstruction des images enregistrées par le télescope d'observation, un écran qui projette ces images et un magnétoscope qui les enregistre.

supprimés. Le travail du chirurgien sera facilité par l'utilisation d'instruments plus aisés à manier. Des procédés simples permettront aux chirurgiens de voir en trois dimensions : les techniques actuelles nécessitent le port de lunettes inconfortables ou un recours peu satisfaisant à l'holographie.

Chirurgie sans chirurgien ?

Les futurs dispositifs optiques amélioreront la résolution et élargiront le champ d'observation pour les trocars de faible diamètre. Des porte-caméra télécommandés réagiront à des capteurs fixés sur la tête de l'opérateur ou seront commandés par la voix : il suffira au chirurgien de tourner la tête vers la droite ou d'ordonner «droite» pour que l'instrument ainsi commandé «obéisse». La télémanipulation fait également l'objet d'un programme de recherche européen dans le cadre du projet *Eurêka* ; des micromoteurs et des microcapteurs devraient permettre d'automatiser certaines interventions.

Ainsi quelques prothèses de hanche ont déjà été posées avec davantage de

précision grâce à des ordinateurs : l'image tridimensionnelle de l'os sur lequel l'intervention doit avoir lieu est numérisée grâce à des radiographies et à des images obtenues par scanner ; l'ordinateur définit le canal à percer pour que la prothèse s'ajuste parfaitement ; grâce à des micromoteurs commandés par l'ordinateur, l'os est percé, et la prothèse est mise en place.

Reste un pas à franchir : si l'homme est assisté de machines suffisamment performantes pour le remplacer, si le chirurgien n'observe plus l'organe qu'il opère, mais une image de cet organe sur un écran de télévision, il n'est plus nécessaire qu'il soit dans la salle d'opération, ni même à proximité : il pourrait être à des milliers de kilomètres. Les systèmes de transmission des images par satellite pourraient permettre de s'affranchir de la présence directe de l'opérateur, qui officierait à distance. Toutefois, le temps de transmission de l'information (un dixième de seconde pour que l'image parvienne au chirurgien et un dixième de seconde pour que l'ordre soit transmis) risque d'être supérieur à ce que l'on tolère si, par exemple, une hémorragie se déclenche.

Enfin, le chirurgien peut décider à tout moment de recourir à la chirurgie ouverte, si bien que la vidéo-chirurgie à distance, réalisable en théorie, ne sera peut-être jamais pratiquée couramment. Les progrès de la robotique, de l'intelligence artificielle et de la télématique aideront sans doute les chirurgiens à réaliser avec sécurité des actes dont la simple évocation paraît aujourd'hui osée, mais la chirurgie sera encore longtemps pratiquée par des chirurgiens.

François DUBOIS, membre de l'Académie de chirurgie, est professeur à la Faculté et chirurgien des Hôpitaux de Paris.

F. DUBOIS, *Cholécystectomie sous cœlioscopie*, in *Nouvelle Presse Médicale*, n° 18, p. 980, 1989.

J. TESTAS et B. DELAITRE, *Chirurgie digestive par voie cœlioscopique*, éditions Maloine, 1991.

Ph. MOURET, *La cholécystectomie endoscopique à 4 ans*, Lyon Chirurgical, 87, 179, 1991.

M.A. BRUHAT et F. DUBOIS, *Cœlio-chirurgie abdomino-pelvienne*, Springer, 1992.

A. CUSHIERI, G. BUSS et J. PERISSAT, *Operative Manual of Endoscopic Surgery*, Springer-Verlag, 1992.

Lumière et trous noirs

NORBERT QUIEN • RAINER WEHRSE • CHRISTOPH KINDL

L'exemple d'un disque de matière qui tourne autour d'un trou noir illustre l'effet d'un fort champ de gravitation sur la propagation de la lumière. Des simulations sur ordinateur font apparaître comment les images se déforment et se multiplient.

«Très bien, dit le Chat, et cette fois il s'évanouit lentement, en commençant par le bout de sa queue pour finir par le sourire qui demeura en suspens quelque temps après tout le reste.

«Eh bien, j'ai souvent vu un chat sans sourire, pensa Alice, mais un sourire sans chat ! C'est bien la chose la plus étrange que j'aie jamais vue !».

Lewis CARROLL,
Alice au pays des merveilles

Une étoile très massive, qui s'effondre en trou noir à la fin de sa vie, illustre une propriété essentielle des objets physiques : le couplage de la matière et de la masse. Tout comme le chat du Cheshire de Lewis Carroll, qui disparaît dans le néant en ne laissant que son sourire, la matière de l'étoile s'évanouit, ne laissant que la masse et son champ gravitationnel. La matière située à proximité tombe vers le centre immatériel de la masse, où elle disparaît ; ainsi la masse du trou noir et l'intensité de son champ gravitationnel ne cessent de croître avec le temps.

Les objets massifs et compacts comme les trous noirs engendrent des effets spectaculaires et singuliers. La matière, aspirée dans un tel maelström cosmique, n'en échappe plus jamais ; la gravitation est si intense que même la lumière y est piégée. Comme il est impossible d'extraire la moindre information sur ce qui se produit à l'intérieur d'une sphère dite de Schwarzschild entourant la masse, cette sphère est un horizon infranchissable. À l'intérieur de cette sphère de Schwarzschild, les rayons lumineux sont si courbés qu'ils bouclent sur eux-mêmes.

Même à l'extérieur de cet asile interdit, on observe des phénomènes étranges. Les rayons lumineux qui passent à proximité sont fortement déviés et peuvent même tourner plusieurs fois autour du trou noir.

Au XVIII^e siècle déjà, on supputait l'existence d'objets qui, par leur masse imposante, captureraient la lumière qu'ils émettaient et restaient invisibles pour un observateur éloigné. Le géologue et astronome britannique John Mitchell (1724-1793), puis le mathématicien et physicien Pierre Simon de Laplace (1749-1827) ont élaboré les premières représentations de ces corps célestes. Il y a 30 ans, lorsque les théories modernes de la physique permirent des calculs plus précis, la majorité des astronomes se persuadèrent que les trous noirs existaient.

Comme aucun rayonnement ne peut s'en échapper, il est difficile de prouver l'existence de ces objets étranges : on ne peut qu'observer l'effet de leur énorme champ gravitationnel sur la matière proche. Ainsi l'afflux des nuages de gaz, ou les étoiles déchirées par les marées induites par le trou noir, doivent former un disque d'accrétion autour du trou et tourner à très grande vitesse. Au cas où, selon une hypothèse vraisemblable, on trouverait des trous noirs dans le noyau de certaines galaxies, ils devraient se manifester par la vitesse de rotation particulièrement élevée de la matière

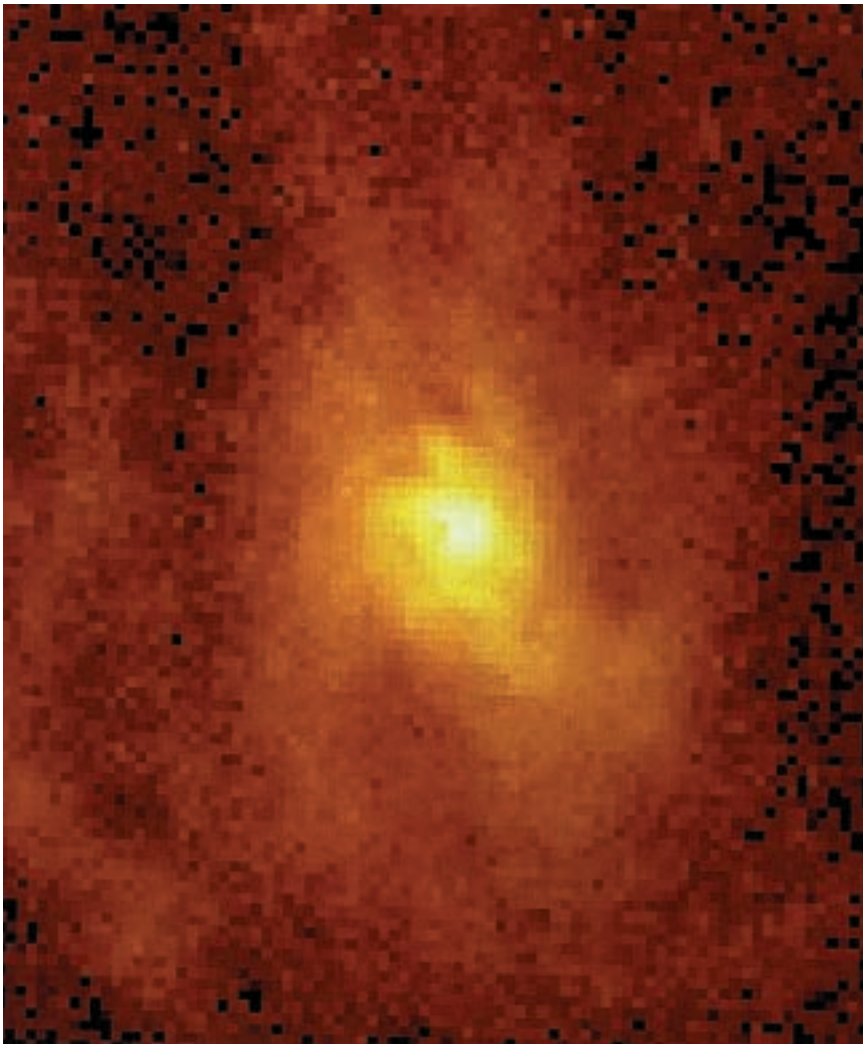
présente dans cette zone. Les observations récentes incitent à penser qu'il existe des trous noirs dans notre Voie lactée et dans d'autres galaxies.

Le frottement et d'autres processus chauffent les gaz du disque d'accrétion jusqu'à plusieurs millions de degrés, de sorte que ces gaz émettent un rayonnement intense et de très forte énergie, jusqu'aux fréquences des rayons X. Les astronomes supposent aujourd'hui que l'extrême intensité lumineuse des noyaux de galaxies résulte de la présence de trous noirs, de masses égales à 100 millions, voire un milliard de masses solaires. Les quasars, qui ont en leur centre un trou noir, émettent un rayonnement 1 000 à 10 000 fois plus intense qu'une galaxie ordinaire. Chaque année, l'équivalent d'une masse solaire est engloutie dans le trou noir central.

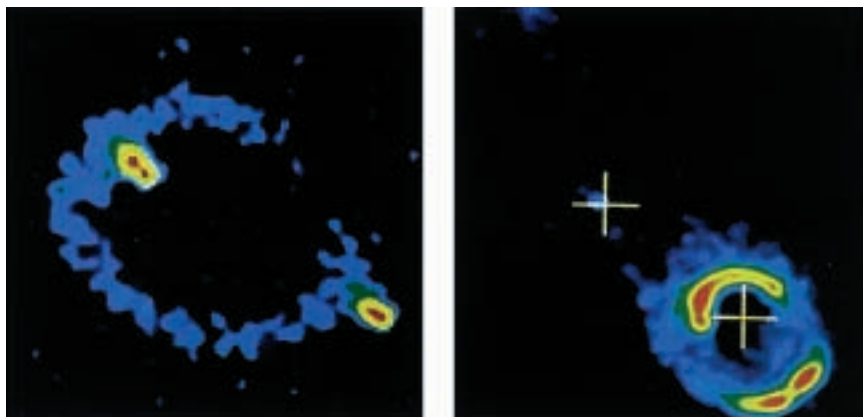
Comme la luminosité des noyaux de galaxies où se trouverait le trou noir varie en quelques heures, le diamètre du dispositif rayonnant n'est pas plus grand que la distance que parcourt la lumière dans le même temps : il devrait avoir, quelques heures-lumière environ, la taille de notre Système solaire.

Étant donné la grande distance qui sépare ces objets de la Terre (plusieurs millions à quelques milliards d'années-lumière) et leur faible étendue, même les meilleurs télescopes ne pourront en distinguer les détails.

1. PERCEPTION DE L'ENVIRONNEMENT D'UN TROU NOIR. La série de clichés se lit de gauche à droite, et de haut en bas ; elle représente ce que verrait un observateur qui se déplacerait progressivement du pôle Nord du système constitué d'un trou noir en rotation et de son disque d'accrétion, à travers l'équateur jusqu'au pôle Sud. La simulation sur ordinateur est réalisée en intégrant les équations de la géométrie de Kerr. La masse du trou noir représente 100 millions de masses solaires, le diamètre du disque d'accrétion, un milliard de kilomètres (soit le double de la longueur de la trajectoire de la planète Mars).



2. PHOTOGRAPHIE DE LA GALAXIE M87, distante de 50 millions d'années-lumière : un grand disque de gaz chauds de 60 années-lumière de diamètre tourbillonne autour d'un centre, à 550 kilomètres par seconde. Ces données sont caractéristiques de la présence d'un trou noir gigantesque dont la masse est deux à trois milliards de fois celle du Soleil.



3. EFFETS OPTIQUES DE DEUX LENTILLES GRAVITATIONNELLES. L'objet céleste MG1131+049 (à gauche) émet un jet de matière qu'une galaxie située entre l'observateur terrestre et l'objet émetteur transforme en un anneau (en bleu) ; cet effet optique a été prédit par Einstein, et l'on dénomme cette structure «anneau d'Einstein». Une composante du jet (jaune et rouge) est dédoublée. L'image de l'objet céleste MG1654+1346 (à droite) a aussi une forme annulaire. La croix au centre de l'anneau indique la position de l'image de l'objet céleste dont une partie de la lumière est transformée et décalée par la galaxie intermédiaire. La croix centrale, indique la position de la galaxie active qui émet le jet, cette image n'étant pas déformée par la galaxie intermédiaire. Les radiographies ont été réalisées par J. Hewitt et G. Langston avec le Very Large Array de Socorro (Nouveau-Mexique).

Aussi, pour comprendre la répartition spectrale et spatiale de la lumière émise, nous sommes tributaires des simulations sur ordinateur. Ces dernières sont, comme on peut s'y attendre, complexes, car elles doivent tenir compte de nombreuses lois physiques : l'hydrodynamique des courants de matière, l'électromagnétisme pour l'émission et la propagation de la lumière, la physique quantique et les théories de la relativité, restreinte et généralisée.

Déformation des images par la courbure de l'espace-temps

Comment un observateur verrait-il un trou noir et son disque d'accrétion toroïdal s'il pouvait s'en approcher ? Pour illustrer les effets déterminants, nous avons utilisé la méthode informatique du lancer de rayons. Cette méthode permet de calculer le trajet des rayons lumineux dans un environnement spécifié. Dans le cas des trous noirs, on ne peut suivre, comme c'est l'usage, la trajectoire des rayons de la source émettrice à l'observateur (la plupart des rayons émis ne lui parviendrait pas), aussi tire-t-on profit de la réversibilité du trajet de la lumière et calcule-t-on les trajets de l'observateur à la source.

Dans un décor familier – par exemple la vue intérieure d'une chambre –, les rayons lumineux se propagent selon une géodésique, la trajectoire qui minimise la distance parcourue. En l'absence de masse très importante, la lumière se propage en ligne droite, et atteint l'œil de l'observateur après un certain nombre de réflexions sur les objets du décor. Dans cet espace plan, c'est-à-dire sans courbure (au sens de la théorie de la relativité), la géométrie euclidienne s'applique, et deux droites parallèles ne se rencontrent jamais.

Or ces lois simples ne s'appliquent pas à notre cas en raison des propriétés de l'interaction matière-lumière. La lumière se propage dans le vide à vitesse constante (300 000 kilomètres par seconde) et indépendamment du système de référence. Autrement dit, la vitesse de la lumière est toujours la même pour un observateur, qu'il soit immobile ou se déplace dans l'espace à une vitesse quelconque.

Les conséquences de cette invariance furent résumées par Einstein