

Plongeon dans un trou noir

Jean-Alain MARCK et Jean-Pierre LUMINET

Un voyageur intrépide décide de plonger dans un trou noir pour voir de ses yeux à quoi cela ressemble. Il découvre que ce n'est pas un trou, et qu'il n'est pas noir...

*La plaque du foyer noir,
de réels soleils des grèves :
ah! puits des magies.
Arthur Rimbaud*

En physique, on aime visualiser concrètement l'objet que l'on étudie. Hélas il semble impossible de filmer ou de photographier un trou noir, car il ne laisse échapper aucune matière, aucun rayon lumineux. Pourtant il n'est pas nécessaire qu'un objet, quel qu'il soit, émette de la lumière pour qu'on puisse le distinguer ; on peut aussi l'éclairer, de manière à ce qu'il renvoie la lumière qu'il reçoit. Nous allons montrer comment les trous noirs peuvent être visualisés grâce aux trajets particuliers suivis par la lumière émise dans leur voisinage.

Ainsi les trous noirs, qui ne sont pas des trous mais des régions de l'espace-temps aux propriétés physiques spécifiques, ne sont pas non plus vraiment noirs. En ce sens, l'ancienne désignation d'«astres occlus» (astre comme objet stellaire, occlus signifiant refermé sur lui-même) donnait une meilleure description de ces objets.

Une question d'éclairage

Chaque corps naturel absorbe et réfléchit à sa façon le rayonnement électromagnétique. L'expérience de pensée illustrée sur la figure 2 consiste à éclairer d'un faisceau de rayons parallèles diverses espèces de corps sphériques et à observer la lumière réfléchie dans une direction perpendiculaire. L'aspect de l'image reçue révèle la façon dont les corps réagissent aux ondes électromagnétiques.

On s'aperçoit que, parmi les diverses espèces de corps qui ne brillent pas par eux-mêmes, le trou noir n'est

pas le plus sombre. Il renvoie même mieux l'éclairage qu'une sphère peinte en noir et qu'une sphère parfaitement réfléchissante!

Une variante de l'expérience de pensée précédente consiste à éclairer le trou noir par des rayons parallèles et à observer la lumière réfléchie dans la même direction (voir la figure 3). L'image du trou noir proprement dit est agrandie, son diamètre apparent étant 2,6 fois plus grand que son diamètre réel. Cela vient du fait que tous les rayons passant à moins de $5,2 U$ du centre (le rayon propre du trou noir étant égal à $2 U$, où U est une unité qui dépend de la masse du trou noir) sont capturés par le trou noir. D'autre part, le trou noir est entouré d'une auréole lumineuse constituée d'anneaux concentriques ; après un demi-tour autour du trou noir, les rayons engendrent l'anneau extérieur, puis, à chaque demi-tour supplémentaire, les rayons forment un nouvel anneau à l'intérieur du précédent. En pratique, seul l'anneau extérieur serait visible, la résolution n'étant pas suffisante pour distin-

guer les retours de lumière d'ordre plus élevé.

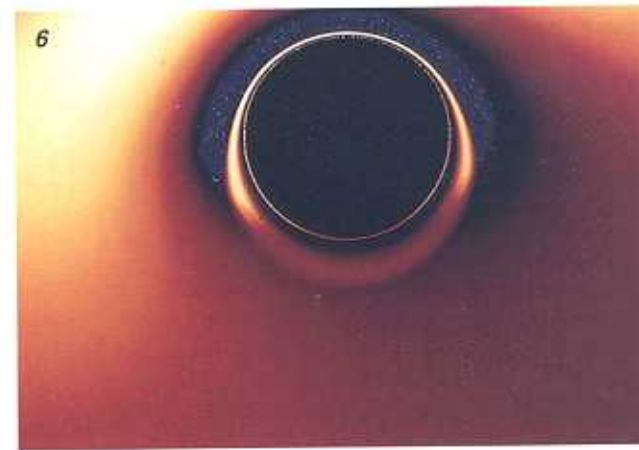
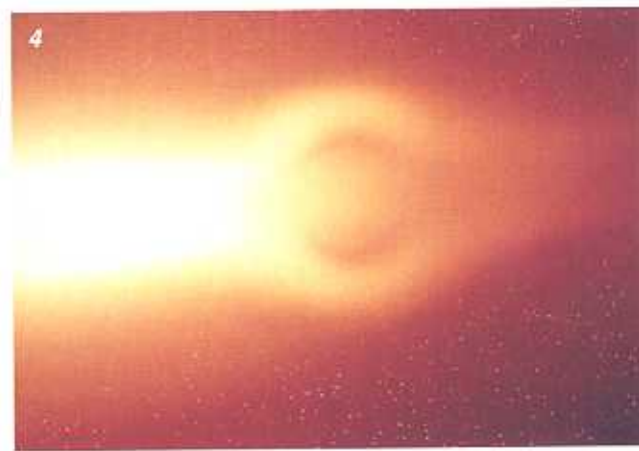
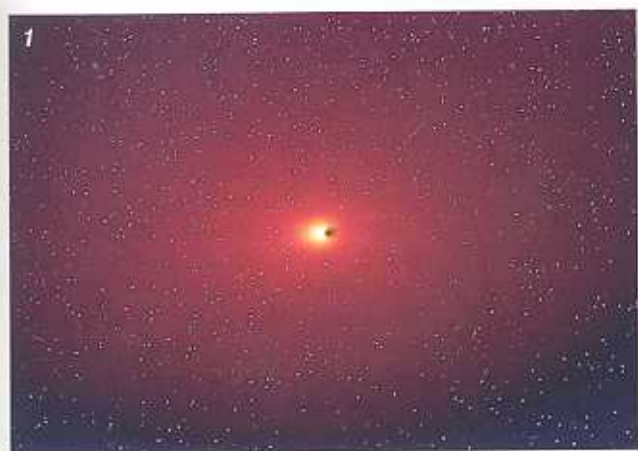
Quelle est la justification de cette surprenante «optique géométrique» du trou noir? Cette optique qui considère des rayons lumineux courbés est une caractéristique fondamentale de la théorie de la relativité générale, selon laquelle la propagation des rayons lumineux dépend des champs de gravitation. La théorie gravitationnelle d'Einstein décrit l'Univers comme un espace-temps à quatre dimensions courbé par la gravitation, c'est-à-dire par les corps massifs qu'il contient.

Optique dans l'espace-temps courbe

Puisque la matière et l'énergie sont équivalentes (liées par la célèbre formule $E = mc^2$), elles engendrent toutes deux un champ gravitationnel. Réciproquement la matière et l'énergie subissent les effets de la gravitation. Notamment les particules sans masse mais en mouvement, tels les corpuscules de lumière nommés photons, possèdent une énergie ; leurs trajectoires sont donc modifiées par la gravitation. Ainsi les rayons lumineux suivent des trajectoires d'autant plus incurvées que le champ gravitationnel qu'ils traversent est intense. Dans une excellente approximation, qui revient à négliger



1. LE VOYAGE D'UN ASTRONAUTE INTRÉPIDE VERS UN TROU NOIR. Le voyageur suit la trajectoire ci-dessus. À l'origine, il est situé sous le plan du disque, à $1\,200 U$ du centre attractif. L'unité de distance utilisée, U , est proportionnelle à la masse du trou noir ; dans le cas d'un trou noir de masse égale à un million de masses solaires, U vaut 1,5 million de kilomètres ; le rayon du trou noir vaut $2 U$. L'observateur traverse le disque d'accrétion à $39 U$ (4). Il est très près de l'horizon au point 7 et, finalement, prend son dernier cliché (8) à l'intérieur du trou noir, à $0,7 U$ du centre, en se retournant vers l'horizon.



l'influence du champ gravitationnel propre du photon devant celui du trou noir, la lumière émise par chaque photon suit une trajectoire géodésique, c'est-à-dire la ligne de plus court trajet entre deux points. Les géodésiques sont des lignes droites dans l'espace-temps plat et elles épousent la courbure d'un espace-temps courbé.

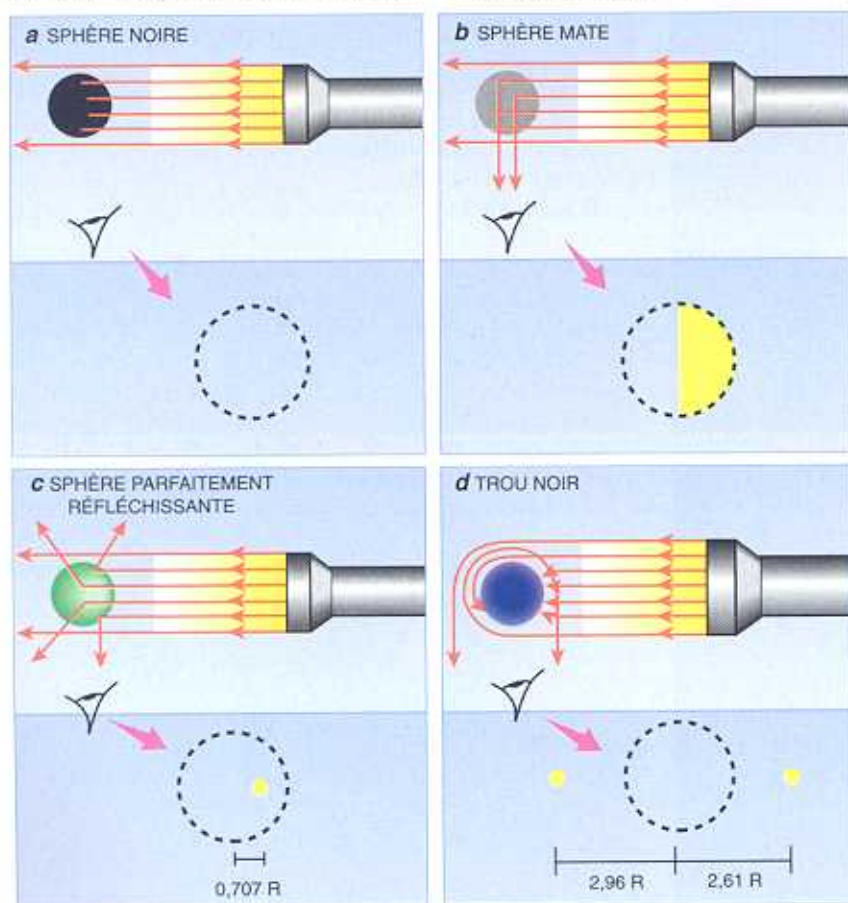
Le champ gravitationnel d'un trou noir courbe fortement l'espace-temps dans son voisinage. À partir d'une certaine distance de son centre, distance qui définit ce qu'on nomme l'horizon des événements, aucune particule (massive ou non) ne peut échapper à son

emprise. À l'extérieur de l'horizon des événements, les rayons lumineux peuvent s'échapper, mais l'importante courbure de l'espace-temps modifie considérablement leur trajectoire.

L'important *théorème d'unicité* établi par Werner Israel, Brandon Carter et d'autres chercheurs, établit que le champ gravitationnel d'un trou noir à l'équilibre ne peut avoir que trois degrés de liberté : la masse, le moment cinétique et la charge électromagnétique. Il permet aussi d'affirmer que la description de l'extérieur des trous noirs est complète. Dès lors, on peut faire confiance aux équations de la relativité

générale pour calculer la propagation des rayons lumineux au voisinage des trous noirs. Le calcul de la trajectoire des photons en espace-temps courbe nécessite – en principe – la résolution d'un système de quatre équations différentielles du second ordre. Une telle résolution comporte une analyse mathématique préalable, suivie d'une intégration numérique.

En ce qui concerne le champ gravitationnel d'un trou noir le plus général (en rotation et avec un champ magnétique), Brandon Carter a montré en 1968 que l'on pouvait résoudre analytiquement les équations du mouvement des particules sans masse comme les photons. Le résultat obtenu fournit la trajectoire d'un photon au moyen d'intégrales elliptiques, ce qui revient à réduire le système des quatre équations différentielles du second ordre à un système bien plus sympathique de quatre équations différentielles du premier ordre. Plus récemment, l'un des auteurs (J.-A. Marek) a associé les résultats de Brandon Carter à un système de coordonnées bien adapté à la géométrie des trous noirs. Il a ainsi obtenu une formulation simple des équations du mouvement des photons, qui facilite grandement l'intégration des trajectoires à l'aide d'un ordinateur. C'est par cette méthode qu'ont été obtenues les images de trou noir présentées ici (voir la figure 1).



2. LA VISUALISATION D'UNE SPHÈRE DÉPEND DE SA NATURE. Dans le cas d'un corps parfaitement noir, comme une sphère peinte (a), tous les rayons lumineux sont absorbés. Puisque aucun rayon n'est réfléchi, l'observateur ne voit rien de la sphère éclairée. Dans le cas d'une surface mate, comme la Lune ou les planètes (b), la lumière est réfléchie avec la même intensité dans toutes les directions. Par conséquent, en chaque point de la surface, un rayon lumineux et un seul est dévié d'exactly 90 degrés en direction de l'observateur : l'observateur voit une demi-lune. Sur une sphère métallique parfaitement réfléchissante (c), un seul point de la surface dévie un rayon incident de 90 degrés et le renvoie en direction de l'observateur : l'image de la sphère se réduit à un unique point lumineux. Le trou noir (d) n'a pas de surface tangible sur laquelle les rayons frappent et se réfléchissent. C'est le champ gravitationnel du trou noir qui dévie les rayons lumineux. Ces derniers ne sont plus des lignes droites brisées au point d'impact avec la surface, mais des lignes d'autant plus courbées qu'elles passent près de la surface. L'image du trou noir est constituée d'une suite infinie de points lumineux. L'un d'entre eux, à gauche, appelé image primaire, est formé par le rayon dévié de 90 degrés. L'autre, à droite, ou image secondaire, provient du rayon qui a tourné d'un demi-tour supplémentaire, c'est-à-dire de 270 degrés. Les images d'ordre supérieur sont tellement proches des images primaire et secondaire qu'elles ne peuvent pas être résolues.

Pile et face

Un tel calcul de la trajectoire des rayons lumineux autour du trou noir suppose une bonne connaissance de la nature de la source lumineuse. Si les trous noirs existent réellement dans la nature, ils ont de bonnes chances d'être éclairés par des sources extérieures de lumière. Ainsi une étoile accouplée au trou noir dans un système double éclairerait celui-ci comme on l'a imaginé dans l'expérience de pensée de la figure 2. Toutefois, malgré la profusion de telles associations dans la Galaxie, les trous noirs correspondants seraient impossibles à détecter : l'image de l'étoile compagne réfléchie par le trou noir serait noyée dans l'image directe de l'étoile.

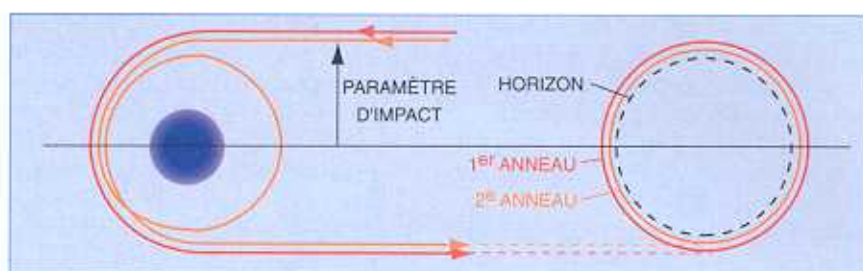
Une situation plus intéressante est celle où la source d'éclairage est une série d'anneaux matériels en orbite autour du trou noir. On pense que nombre de trous noirs sont entourés de telles structures, nommées *disques d'accrétion*. Les anneaux de la planète

Saturne sont un exemple célèbre de disque d'accrétion (voir la figure 4). Ils sont constitués d'un amalgame de cailloux et de glace qui réfléchit la lumière du Soleil lointain. En revanche, dans le cas d'un trou noir, les anneaux d'accrétion comportent un gaz chaud qui rayonne lui-même. Ce gaz tombe peu à peu en spirale dans le trou noir. Sa chute s'accompagne d'une élévation de sa température et d'une émission de rayonnement. Voilà donc une bonne source d'éclairage : les anneaux d'accrétion brillent et illuminent le trou noir central. On peut alors s'interroger : quelle est l'image apparente du disque d'accrétion autour d'un trou noir ?

Revenons à l'image familière de la planète Saturne. Les champs de gravitation dans le Système Solaire sont si faibles que l'espace-temps correspondant est pratiquement plat, sans courbure : on le nomme espace-temps de Minkowski. Dans cette solution, les rayons lumineux se propagent en ligne droite, et l'optique géométrique qui les décrit est l'optique habituelle : pour un astronome lointain qui observe Saturne selon une direction inclinée par rapport au plan des anneaux, les anneaux circulaires entourant Saturne ont la forme d'ellipses ; en outre, si cette inclinaison n'est pas trop grande, la partie arrière de l'anneau est cachée par le disque de Saturne.

La figure 5 montre les contours d'un disque circulaire entourant non plus une planète, mais un trou noir sphérique. La forte courbure de l'espace-temps autour du trou noir se manifeste par une déformation importante de l'image du disque. Celle-ci ne se réduit plus à un ensemble d'ellipses, mais se décompose en plusieurs images. L'image primaire est formée des rayons lumineux émis par le dessus du disque, et qui sont déviés de moins de 180 degrés. Une première constatation surprend : la *totalité* du dessus des anneaux est visible, ce qui s'explique par un «relèvement» des trajectoires lumineuses dans le champ de gravitation du trou noir. L'étonnement grandit lorsqu'on reconnaît aussi, simultanément, le *dessous* des anneaux : c'est l'image secondaire.

En théorie, outre les images primaire et secondaire, une infinité d'images sont créées par les rayons lumineux qu'émet le disque, puisque ceux-ci s'enroulent un nombre arbitraire de fois autour du trou noir avant d'échapper à son champ gravitationnel et de parvenir à un astronome extérieur. En pratique, ainsi que nous l'avons



3. RETOUR DE LUMIÈRE D'UN TROU NOIR ÉCLAIRÉ. Le trou noir semble 2,6 fois plus gros, et il est nimbé d'une auréole constituée d'une infinité d'images en forme d'anneaux concentriques.

décrit dans la deuxième expérience de pensée, les images d'ordre supérieur à deux seraient indiscernables : elles s'agglutinent contre le rond noir central, qui est l'image agrandie du trou noir proprement dit.

Le disque d'accrétion

Pour calculer les images les plus réalistes possibles d'un trou noir éclairé par un disque d'accrétion, il faut non seulement calculer la propagation des rayons lumineux dans l'espace-temps courbe, mais aussi connaître les propriétés physiques du disque d'accrétion. Les modèles de disque d'accrétion tentent de reproduire les caractéristiques du rayonnement émis par certains systèmes d'étoiles doubles ou certains noyaux actifs et galaxies.

En général, on néglige la masse du disque d'accrétion devant celle du trou noir ; chaque particule composant le disque est donc en chute libre dans le champ gravitationnel engendré par le trou noir. Considérons le cas simple d'un disque où chaque particule suit une trajectoire circulaire dans le plan de symétrie du trou noir. La vitesse de cette particule dépend de la distance qui la sépare de son centre : comme deux éléments voisins ne se déplacent pas à

la même vitesse, ils interagissent et engendrent une viscosité qui chauffe le disque. Ainsi le disque est d'autant plus chaud et d'autant plus lumineux qu'il est proche du trou noir.

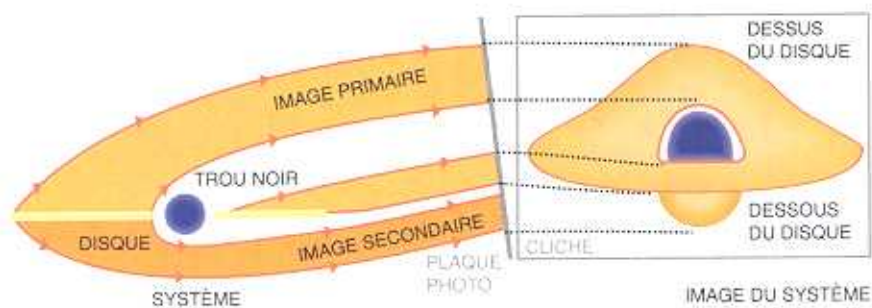
Par ailleurs, le trou noir a un diamètre très petit comparé à celui d'une étoile de même masse. Par conséquent, le gaz du disque gravite dans des zones de très fort champ gravitationnel et atteint des températures particulièrement élevées.

Lorsque le débit de matière avalée par le trou noir est faible, on montre que le disque est très mince. Dans cette approximation, la luminosité propre du disque, obtenue en intégrant les luminosités des particules individuelles constituant le disque, suit une loi énoncée par Don Page et Kip Thorne : l'intensité du rayonnement émis en un point donné du disque ne dépend que de sa température, celle-ci ne dépendant que de sa distance au trou noir.

En considérant ce type de rayonnement comme source d'éclairage du trou noir, on obtient une image universelle, c'est-à-dire indépendante de la masse du trou noir et du débit de gaz avalé (voir la figure 6). Autrement dit, à condition que le disque d'accrétion ne soit pas trop épais, cette image peut aussi bien représenter un trou noir de dix kilomètres de



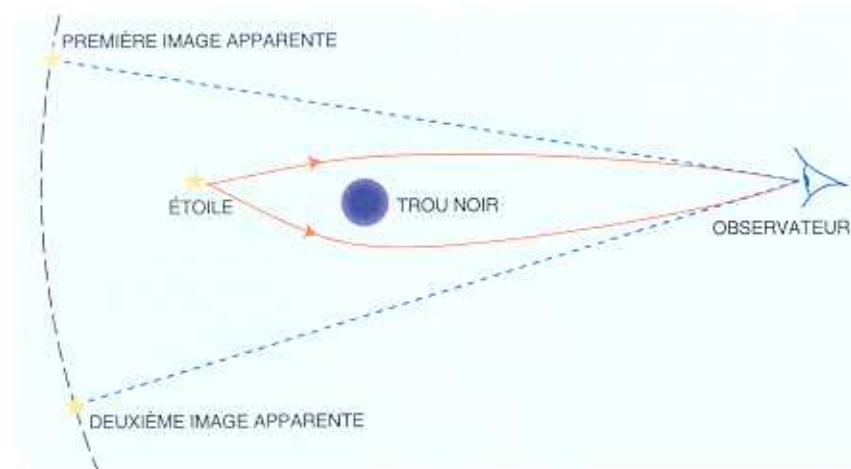
4. LA PLANÈTE SATURNE ET SES ANNEAUX. On considère que le disque d'accrétion d'un trou noir a une forme similaire, c'est-à-dire des anneaux circulaires et une faible épaisseur.



5. DÉFORMATIONS OPTIQUES AU VOISINAGE D'UN TROU NOIR. Le trou noir est entouré d'un disque brillant dont on a représenté la tranche. On observe l'ensemble à grande distance, dans une direction de dix degrés par rapport au plan du disque. À cause de la courbure de l'espace-temps au voisinage du trou noir, la plaque photographique reçoit directement les rayons émis par le dessus du disque ; le dessous du disque est également visible, sous forme d'une image indirecte, engendré par des rayons lumineux fortement courbés.



6. IMAGE VIRTUELLE D'UN TROU NOIR ET DE SON DISQUE D'ACCRETION, lorsque celui-ci est mince. La coloration (arbitraire) des images transcrit la luminosité apparente de l'objet. Les parties les plus lumineuses et les plus chaudes sont colorées en jaune, les parties les plus froides en rouge. La dyssymétrie de l'image est due à l'effet Doppler : à gauche, les particules du disque, en rotation circulaire autour du trou noir, se rapprochent de l'observateur ; cette partie paraît plus lumineuse. À droite, les particules s'éloignent ; cette région semble plus sombre. La transparence du disque a été exagérée pour montrer les images indirectes au travers de l'image directe, ainsi que quelques étoiles de fond.



7. FORMATION D'UN MIRAGE GRAVITATIONNEL lorsque la source lointaine (une étoile), la lentille gravitationnelle (le trou noir) et l'observateur forment un alignement presque parfait. Le trou noir dévie les rayons lumineux à la manière d'une lentille. Ainsi l'observateur voit deux images de la même étoile.

rayon attirant le gaz d'une étoile proche, qu'un trou noir gros comme le Système solaire aspirant le gaz interstellaire. Aucun rayonnement ne provient de la région comprise entre le trou noir et le bord interne du disque, sinon celui du «fond de ciel» qu'engendrent les étoiles situées à l'arrière-plan. Pourquoi cela ? Parce que les propriétés de l'espace-temps de Schwarzschild interdisent à un disque d'accrétion mince de toucher l'horizon du trou noir : les orbites circulaires suivies par les particules se maintiennent jusqu'à une distance critique égale à trois fois le rayon du trou noir ; en deçà de cette distance, le disque est instable, et les particules plongent directement dans le trou noir ; il n'y a plus ni viscosité ni rotation différentielle, il n'y a donc plus de rayonnement émis.

Le décalage de la lumière

L'image calculée (voir la figure 6) ressemble à celle obtenue il y a quelques années, avec une méthode différente, par l'un des auteurs (voir *Cet obscur objet du désir*, par J.-P. Luminet, dans ce dossier), mais les détails y sont plus nombreux. Sa caractéristique principale est la différence de luminosité apparente entre les différentes régions du disque : la brillance est maximale dans les zones proches de l'horizon, car c'est là que le gaz est le plus chaud. Toutefois la luminosité reçue (enregistrée par exemple par des capteurs embarqués sur satellite) diffère nettement de la luminosité propre du disque (telle qu'elle serait perçue par un observateur tournant avec les particules du disque).

La différence entre les points de vue (observateur éloigné ou proche) provient des effets de la gravitation d'Einstein sur la propagation des rayons lumineux. La combinaison de trois effets décale la fréquence et l'intensité du rayonnement reçu par rapport à celles du rayonnement émis. *Primo*, le champ gravitationnel affaiblit l'intensité du rayonnement (il piège un plus grand nombre de photons) et en diminue la fréquence (il ralentit les horloges) : c'est l'effet Einstein ; il n'est sensible qu'au voisinage immédiat du trou noir et ne dépend pas de la position de l'observateur. *Secondo*, le mouvement de la particule de gaz change la fréquence de la lumière émise : c'est l'effet Doppler. Lorsque la source et le récepteur s'éloignent, l'effet Doppler diminue l'intensité et la fréquence du rayonnement (donc le décale vers le rouge) ; lorsqu'ils se rapprochent,

l'intensité et la fréquence augmentent (de même que la sirène d'une ambulance devient plus aiguë lorsqu'elle s'approche et plus grave lorsqu'elle s'éloigne). *Tertio*, un autre effet Doppler résulte du mouvement de l'observateur lui-même.

L'effet Doppler dû au mouvement de la source est de loin le plus important ; il affecte surtout les particules proches du trou noir, qui ont une vitesse plus élevée (proche de celle de la lumière) ; il dépend de la position relative de la particule et de l'observateur, et de la vitesse radiale de la particule (la composante de la vitesse dans la direction de l'observateur). C'est cet effet qui engendre une dissymétrie du flux de lumière entre la gauche et la droite du trou noir : la partie claire correspond à la composante du disque d'accrétion qui s'approche de l'observateur, tandis que la partie sombre est la composante qui s'éloigne.

Que voit l'observateur lorsqu'il s'approche du trou noir ?

Vol dans un trou noir

Un explorateur cosmique a repéré un gros trou noir au loin par le hublot de son vaisseau spatial. Fasciné par le spectacle, il décide de plonger dans sa direction et de s'engouffrer à l'intérieur, sachant toutefois qu'il ne pourra plus en ressortir. Il oriente son vaisseau en direction du trou noir, coupe les

moteurs de façon à tomber en chute libre et observe le spectacle par le hublot avant, dans la direction de son mouvement. La série de clichés présentés sur la figure 1 sont les instantanés qu'il prend à différentes étapes du plongeon. La dernière image est prise de l'intérieur du trou noir, le photographe ayant pivoté de 180 degrés pour regarder par le hublot arrière et voir une dernière fois les images démultipliées et déformées du disque d'accrétion. Contrairement à une opinion courante, il ne fait pas noir à l'intérieur d'un trou noir, puisque les rayons lumineux y pénètrent.

Insistons sur le fait que ces photographies virtuelles sont calculées point par point dans le cadre de la relativité générale ; il ne s'agit nullement d'une «vue d'artiste», mais d'une intégration numérique reproduisant de la façon la plus exacte possible ce qu'observerait un voyageur s'aventurant dans les parages d'un trou noir dépourvu de tout mouvement de rotation et entouré d'un disque d'accrétion mince. Il utilise un appareil photographique muni des filtres nécessaires pour convertir en rayonnement optique le rayonnement électromagnétique émis (dans le domaine gamma, X ou ultraviolet, selon la masse du trou noir considéré).

L'observateur ne peut recevoir que les photons qui se dirigent vers lui. La direction que prennent les photons après leur passage à proximité du trou noir dépend d'un paramètre nommé para-

mètre d'impact, qui mesure l'écart entre la direction du photon à l'infini et la direction du centre (voir la figure 3).

Certains rayons lumineux émis par les particules composant le disque ont un paramètre d'impact suffisamment faible pour être fortement déviés de la ligne droite, et suffisamment important pour ne pas être piégés à l'intérieur de l'horizon des événements. Certains de ces photons, dirigés initialement dans une direction proche de celle du centre attractif, finissent leur course dans la direction du point émetteur. Ce cheminement particulier des rayons lumineux permet de visualiser le trou noir comme si la lumière était réfléchiée par un objet.

C'est pourquoi l'observateur aperçoit en même temps, à différents endroits du ciel, plusieurs images du même point, de même qu'il lui est possible de voir des parties du disque qui lui seraient normalement cachées – c'est-à-dire en l'absence de champ gravitationnel ou en ignorant la relativité générale.

Des lentilles gravitationnelles

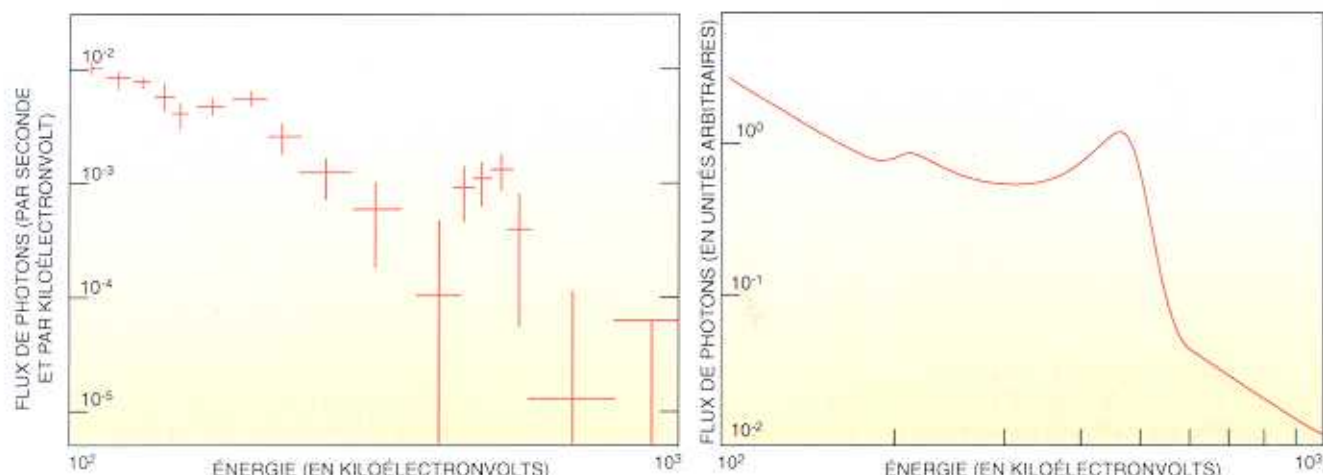
Le fond de ciel étoilé de ces images, qui se distingue d'une part en transparence derrière le disque, d'autre part dans la partie si proche de l'horizon que le disque n'existe plus, a également été calculé. On y voit notamment des arcs gravitationnels, images déformées des étoiles qui sont alignées sur l'axe de



8. PHOTOGRAPHIE D'UNE RÉGION DU CIEL ÉTOILÉ (à gauche) contenant la galaxie d'Andromède (la tache nébuleuse en bas à gauche). À droite, une simulation numérique effectuée dans le cas d'un trou noir



de Kerr (en rotation) par N. Quien, R. Wehrse et C. Kindl à l'Université de Sarrebruck, en Allemagne, montre comment un trou noir passant dans l'axe de visée de l'observateur déformerait la même image.



9. SPECTRE DE LA NOVA DE LA MOUCHE tel qu'il a été observé (à gauche) par le satellite *Sigma* (d'après Goldwurm et al., 1993). Spectre de la nova de la Mouche tel qu'il a été simulé (à droite) en supposant l'existence d'un trou noir (d'après Hameury et al., 1994).

visée observateur-trou noir. C'est dans le cliché 8 qu'ils sont le plus apparents.

Einstein a prédit de tels effets optiques dans les années 1930 comme conséquences naturelles de la courbure de l'espace-temps. Le corps intermédiaire responsable de ces effets joue un rôle analogue à celui d'une lentille en optique traditionnelle, qui déforme les images des sources situées à l'arrière-plan : on le nomme lentille gravitationnelle (voir la figure 7). Toute concentration de matière, effondrée en trou noir ou non, déforme à divers degrés la géométrie de l'espace-temps et peut jouer le rôle de lentille gravitationnelle.

Supposons que la Terre, un trou noir et un astre lointain soient alignés. Selon les lois de la relativité générale, la courbure de l'espace-temps au voisinage du trou noir permet à la lumière émise par l'astre situé à l'arrière-plan d'emprunter plusieurs trajets possibles pour parvenir à la Terre. Dans des conditions idéales (alignement exact et corps sphériques), les télescopes devraient capter une infinité d'images issues de la même source, toutes rassemblées en un anneau circulaire parfait, appelé anneau d'Einstein. Dans des conditions plus réalistes, les images sont démultipliées un nombre fini de fois ; elles ne constituent plus un anneau parfait, mais des arcs ou d'autres configurations moins symétriques. Cette multiplication et cette distorsion des images apparentes par rapport à la source réelle produisent ce qu'on nomme un *mirage gravitationnel*.

Le mirage traditionnel, observé dans le désert, est produit par des couches d'air empilées auxquelles la conduction de la chaleur du sable confère des indices de réfraction différents. Les rayons lumineux réfléchis sur le sable suivent plu-

sieurs chemins possibles avant d'atteindre le caravanier lointain : ces images fantômes abusent le voyageur, qui les interprète selon ses désirs comme une oasis, une ville ou une étendue d'eau.

Les mirages gravitationnels dus à la distorsion de l'espace cosmique sont plus difficiles à déceler. Grâce aux grands télescopes, on en a pourtant repéré plusieurs dizaines, causés par des galaxies ou des amas de galaxies situés dans le champ. Les sources lointaines du rayonnement susceptibles d'être affectées par une lentille gravitationnelle sont soit des étoiles, soit des galaxies ou des quasars lointains.

L'interprétation des observations

Comme on peut s'y attendre, les calculs sont bien plus complexes dans le cas de trous noirs en rotation que dans le cas sans rotation, même si, à première vue, les images obtenues diffèrent peu. Toutefois, en analysant précisément le rayonnement émis par le disque d'accrétion, de faibles différences pourraient servir à distinguer les trous noirs qui tournent de ceux qui ne tournent pas. Outre leur aspect didactique et esthétique, les simulations numériques présentées ici offrent donc un intérêt astrophysique. Elles ont notamment apporté quelque éclairage à l'étude de l'objet compact présent dans la nova de la Mouche. Le satellite *Sigma* (voir *Sigma, chasseur de trous noirs*, par J. Paul, dans ce dossier) a observé dans cette région du ciel une raie spectroscopique qu'on a interprétée comme la raie d'annihilation électron-positon ; normalement cette raie se situe à 511 kiloélectronvolts, mais on l'observe à 200 kiloélectron-

volts, à cause du décalage vers le rouge. Sous réserve que les hypothèses soient justes, à savoir que la région d'émission est une zone restreinte d'un disque d'accrétion mince qui tourne le long de cercles, et que l'interprétation de la raie rouge à 200 kiloélectronvolts soit correcte, des simulations analogues à celles présentées ici suggèrent que l'objet compact de la Mouche est un trou noir en rotation très rapide (proche de la rotation maximale) et que l'inclinaison du disque est d'environ 40 degrés.

De la même façon, ces simulations permettent de calculer le décalage et l'élargissement des raies spectrales dans un disque d'accrétion autour d'un trou noir géant et d'en expliquer certaines caractéristiques qui ont récemment été observées par le télescope *Ginga* (voir *Quasars et trous noirs*, par S. Collin et J.-M. Huré, dans ce dossier). Ainsi les simulations numériques tracent un trait d'union entre la théorie et les observations.

Jean-Alain MARCK et Jean-Pierre LUMINET travaillent à l'Observatoire de Meudon.

J.-P. LUMINET, in *Astronomy and Astrophysics*, vol. 75, n° 228, 1979.

J.-A. MARCK, in *Classical and Quantum Gravity*, vol.13, p. 393, 1993.

A. GOLDWURM et al., in *Astronomy and Astrophysics*, suppl., vol. 293, 1993.

J.-M. HAMEURY, J.-A. MARCK et D. PELAT, in *Astronomy and Astrophysics*, vol. 287/795, 1994.

L. DELESALLE, M. LACHIEZE-REY et J.-P. LUMINET, *Infiniment Courbe*, cassette vidéo de 52 mn, La Sept/Arte et CNRS Audiovisuel (1994).

J.-A. MARCK, *Voyage dans un trou noir*, cassette vidéo de 11 mn, CNRS Audiovisuel, 1994.