

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, capturaient 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

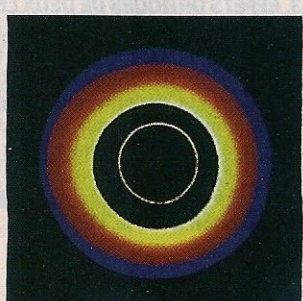
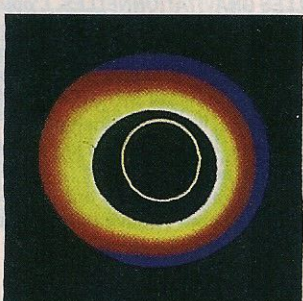
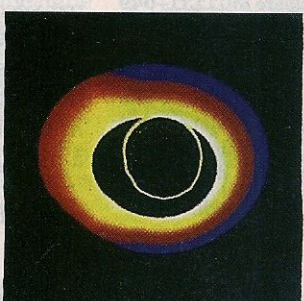
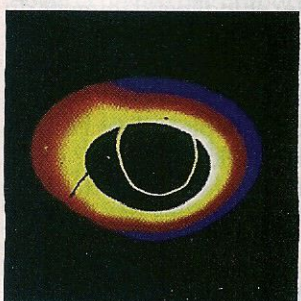
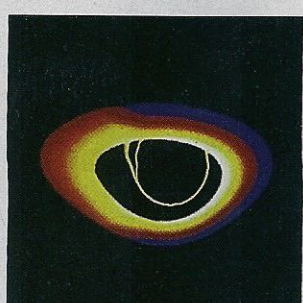
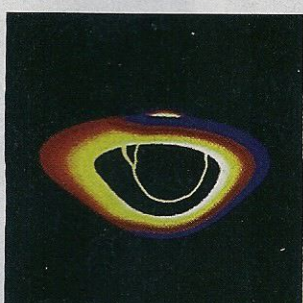
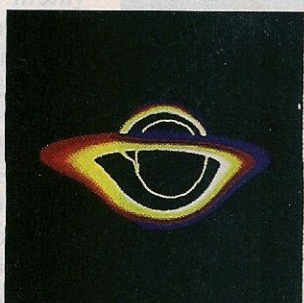
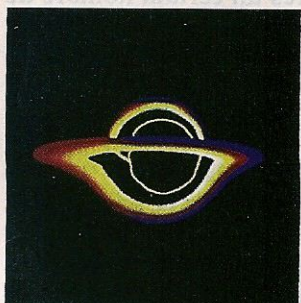
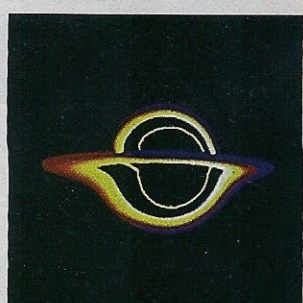
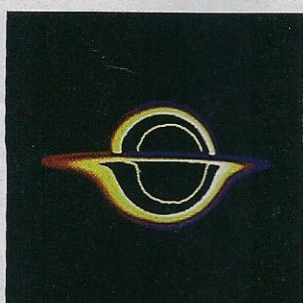
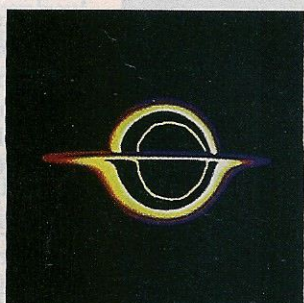
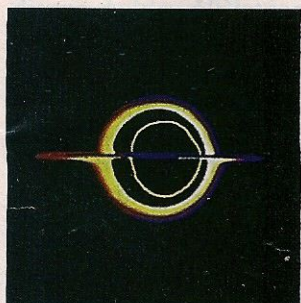
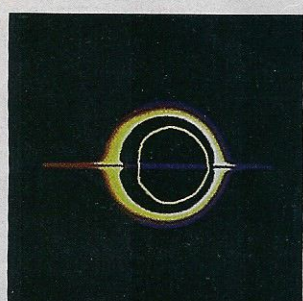
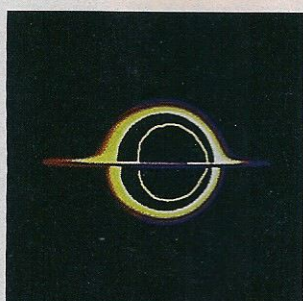
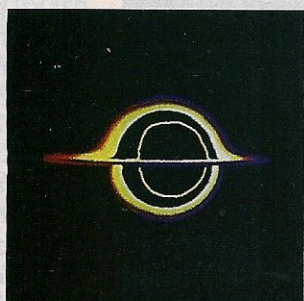
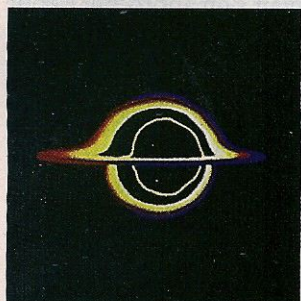
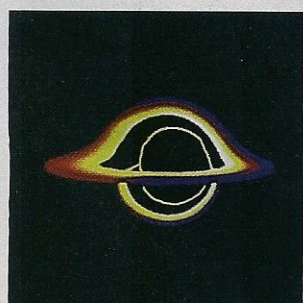
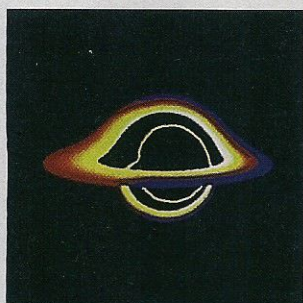
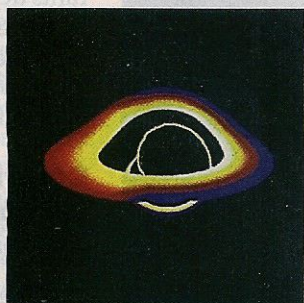
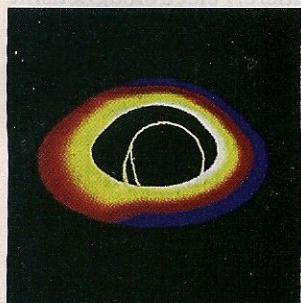
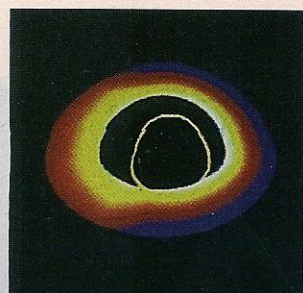
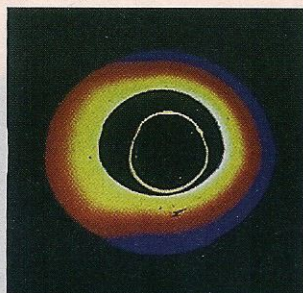
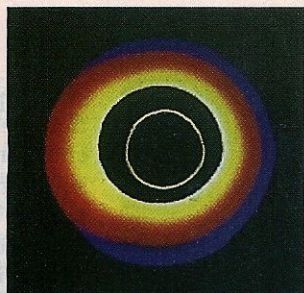
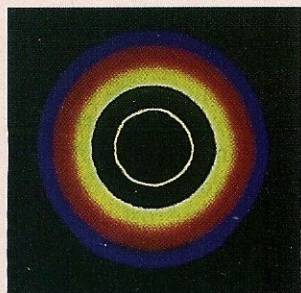
présente dans cette zone. Les observations récentes incitent à penser qu'il existe des trous noirs dans notre Voie lactée et dans d'autres galaxies.

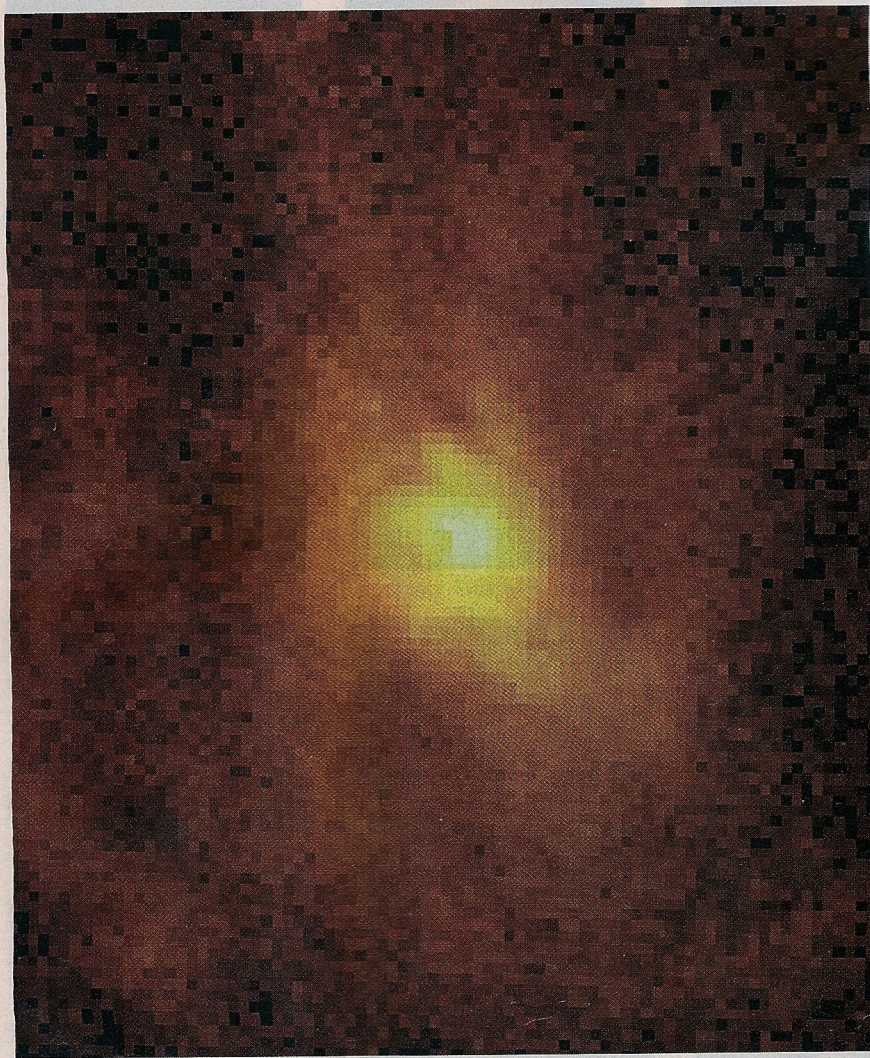
Le frottement et d'autres processus chauffent les gaz du disque d'accrétion jusqu'à plusieurs millions de degrés, de sorte que ces gaz émettent un rayonnement intense et de très forte énergie, jusqu'aux fréquences des rayons X. Les astronomes supposent aujourd'hui que l'extrême intensité lumineuse des 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.

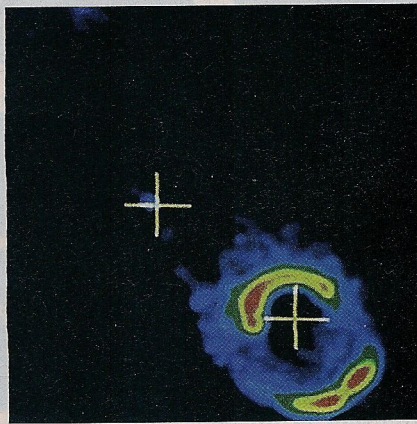
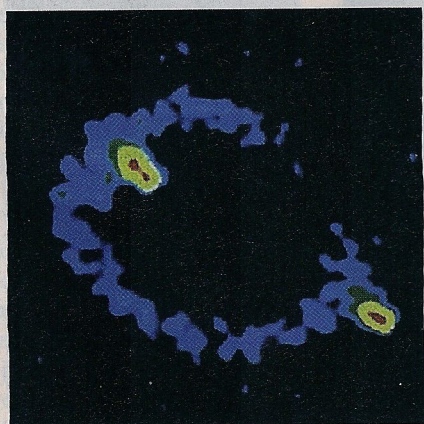
Étant donné la grande distance qui sépare ces objets de la Terre (plusieurs millions à quelques milliards d'années-lumière) et leur faible étendue, même les meilleurs télescopes ne pourront en distinguer les détails.

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

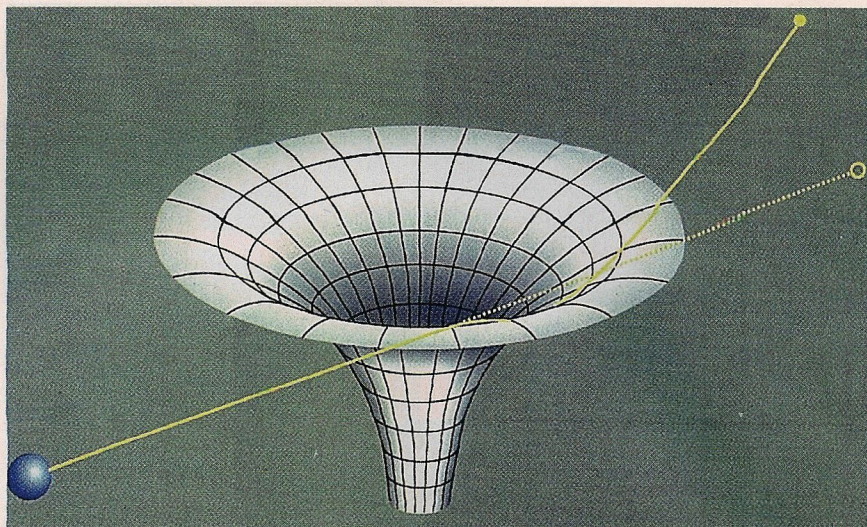
en 1905 dans sa théorie de la relativité restreinte. L'espace tridimensionnel et le temps ne sont pas des données indépendantes, mais les éléments couplés (parce que la vitesse de la lumière est constante) d'un espace-temps à quatre dimensions. La géométrie qui en découle, élaborée par le professeur de mathématiques d'Einstein à Zurich, Hermann Minkowski, complète les équations euclidiennes : la distance entre deux points dépend non seulement de variables d'espace, mais aussi d'une variable temporelle. Pourtant la géométrie de Minkowski ressemble à la géométrie euclidienne : la géodésique reliant deux points est encore une droite, et donc l'espace-temps est plan.

Les choses changent en présence d'une masse et de son champ gravitationnel. Comme l'a démontré Einstein dans sa théorie de la relativité générale (essentiellement une théorie de la gravitation), l'espace-temps est courbé par la masse ; réciproquement, cette courbure de l'espace-temps modifie le mouvement d'une masse. Or, dans un espace-temps à courbure positive, la géodésique entre deux points n'est plus une droite. Contrairement à la géométrie euclidienne, deux parallèles se rencontrent, tout comme, sur une sphère, des méridiens proches de l'équateur, assimilables à des droites parallèles, se coupent aux deux pôles.

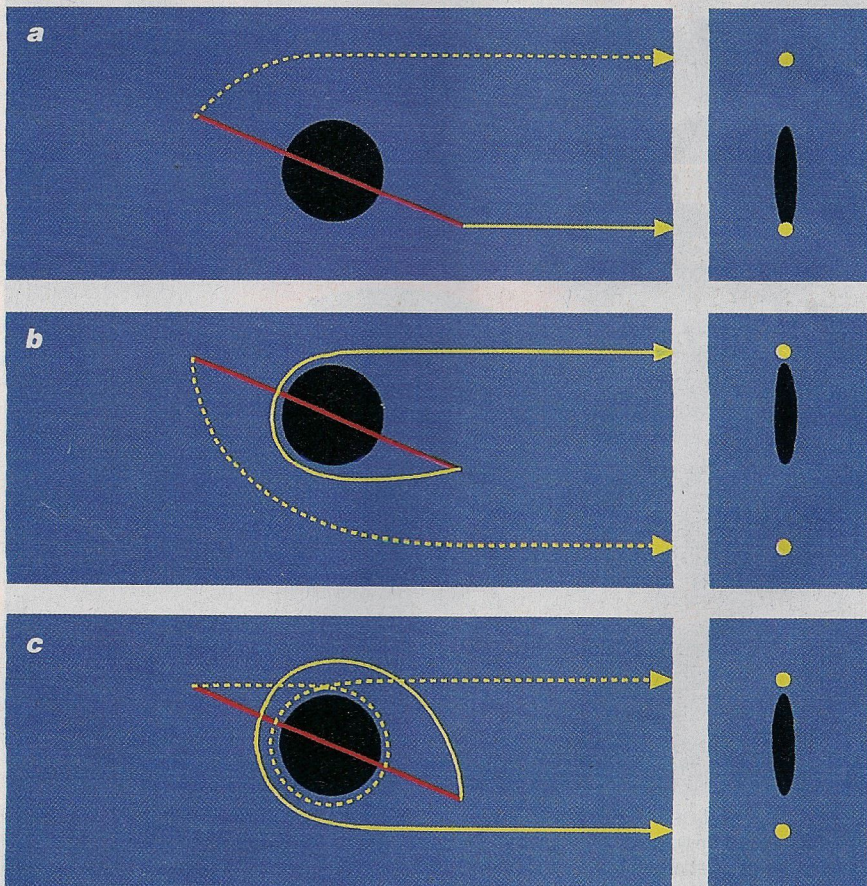
Un champ gravitationnel dévie même la lumière. Schwarzschild calcula cette déviation. En mai 1916, à Postdam, quelques semaines avant sa mort d'une blessure de guerre alors qu'il était lieutenant d'artillerie sur le front russe, il résolut les équations établies par Einstein dans le cas d'un trou noir immobile.

Cette prévision de la théorie de la relativité générale fut confirmée par les astronomes britanniques pendant l'éclipse solaire de mai 1919 : sur des photographies, les étoiles à proximité immédiate du disque solaire semblaient décalées par rapport à leur position normale dans le ciel : leur lumière était attirée par la masse du Soleil et déviée par rapport à une ligne droite joignant l'observateur à l'étoile.

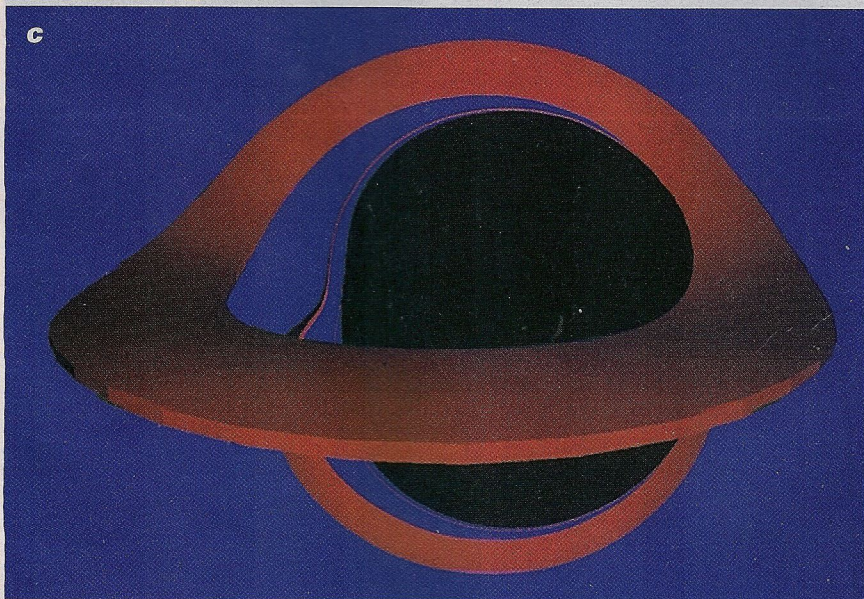
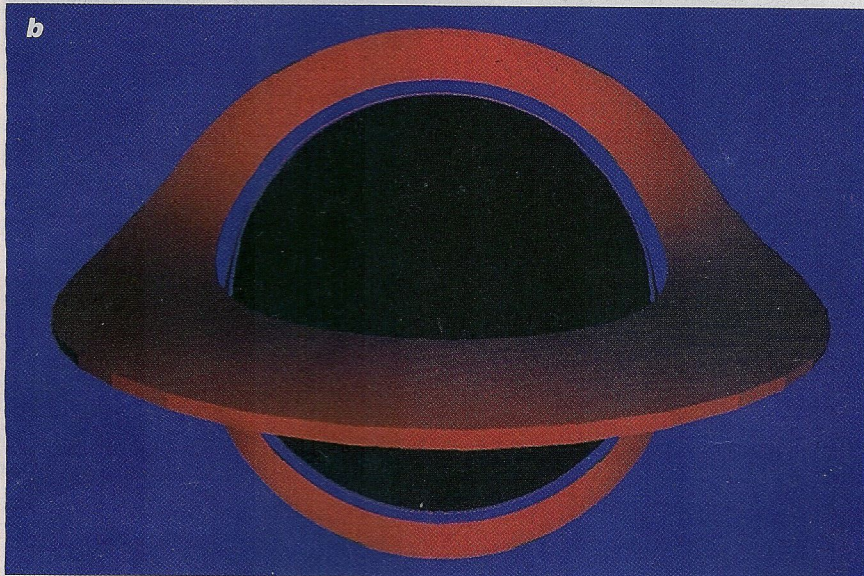
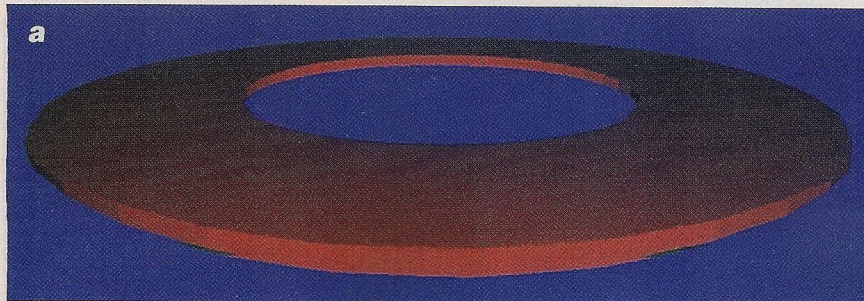
Dans nos simulations sur ordinateur, la notion de droite est modifiée, et il faut suivre chaque rayon lumineux dans un espace-temps courbe. Pour ce faire, nous avons utilisé des procédés numériques modernes afin



4. SELON LA THÉORIE DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE, l'espace est courbé par la masse. Le champ gravitationnel, représenté ici à deux dimensions autour d'un corps massif (le Soleil), est déformé en entonnoir. Un rayon lumineux qui, sur la trajectoire qui le mène d'une étoile à l'observateur terrestre, passe à côté du Soleil, est dévié par cette courbure de l'espace. Par conséquent, l'observateur voit l'étoile, par rapport à sa position habituelle dans le ciel, comme si elle était déviée de quelque 1,75 seconde d'arc. Des masses plus importantes, comme celles des trous noirs, dévièrent davantage la lumière.



5. LA DÉVIATION DE LA LUMIÈRE permet à un observateur d'apercevoir des régions du disque de matière (en rouge) situées derrière le trou noir. Les rayons lumineux (en jaune) sont perçus directement ou après plusieurs rotations autour du trou. L'image directe (premier ordre) contient tous les rayons lumineux émis par la face avant du disque et qui parviennent à l'observateur directement, et les rayons qui empruntent le chemin le plus court à partir de la face arrière (a). Les rayons qui entourent le trou noir à moitié constituent la première image indirecte (b), alors que tous ceux qui n'atteignent l'observateur qu'après avoir accompli une rotation complète forment la seconde image indirecte (c). À droite, on a représenté l'image des points du disque tels que vus par l'observateur.



6. VUE D'UN DISQUE D'ACCRETION qui tourne autour d'un trou noir massif (de 100 millions de masses solaires). L'image est déformée par l'intense champ gravitationnel du trou noir. Dans cette simulation, l'observateur a une vue d'ensemble de tout le disque de matière d'un milliard de kilomètres de diamètre. Il regarde le plan du disque sous un angle de 13 degrés au-dessus de l'horizon. Pour améliorer la perspective, le disque est teinté comme s'il était éclairé par une lampe superpuissante tenue par l'observateur. En l'absence de masse centrale, c'est-à-dire dans la géométrie de Minkowski, l'observateur perçoit le disque de matière comme le système annulaire de Saturne (a). Pour tenir compte de la masse du trou noir, il faut passer à la géométrie de Schwarzschild (b). Le domaine où les rayons lumineux sont définitivement piégés est en noir. Le disque ressemble à un rebord de chapeau déformé. L'anneau intérieur, très fin, est une image indirecte d'ordre supérieur. Si le trou noir et le disque d'accrétion tournent, la géométrie de Kerr donne une autre image (c). Dans ce cas, des termes supplémentaires de l'équation de propagation induisent une asymétrie de l'image.

de résoudre des équations différentielles qui dépendent de la géométrie choisie. Aussi les images obtenues représentent n'importe quelle structure, sauf ce qui se passe à l'intérieur du rayon de Schwarzschild.

Nous avons représenté ainsi un disque de matière qui entoure un trou noir massif. L'espace-temps a une symétrie de révolution par rapport à l'axe du disque, et les rayons lumineux sont déviés vers le centre. Cette courbure des rayons lumineux fait que l'observateur peut voir des parties cachées des objets. S'il est situé au-dessus du plan du disque, il peut même distinguer des domaines du disque qui se trouvent, par rapport à lui, derrière le trou noir. La lumière émise par ces domaines passe au-dessus ou au-dessous du rayon de Schwarzschild.

La lumière émise derrière le trou noir, par exemple vers le haut, est déviée vers le centre par la forte gravitation et atteint l'observateur après une trajectoire parabolique. La trajectoire d'un rayon lumineux peut même entourer complètement le trou noir avant d'échapper définitivement au champ gravitationnel. Ainsi l'observateur perçoit non seulement l'image directe, mais aussi les images indirectes du premier et du second ordres, voire d'ordres plus élevés, où la lumière tourne plusieurs fois autour du trou noir. Par exemple, dans la première image indirecte, il perçoit, en haut du trou noir, la face inférieure de la moitié du disque qui est de son côté ; de même, la face postérieure du disque apparaît en bas du trou noir.

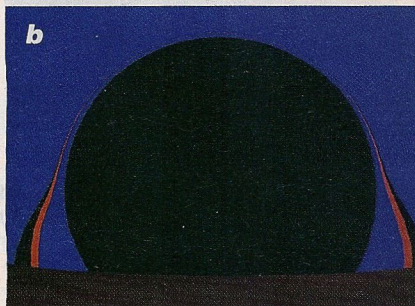
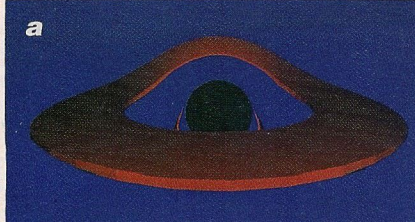
La géométrie de Schwarzschild s'applique quand la masse centrale ne tourne pas. Si l'étoile qui s'effondre est en rotation – ce qui est le cas le plus probable –, le trou noir tourne aussi. Dans ce cas, la géométrie est plus complexe ; le mathématicien néo-zélandais Roy Kerr a résolu, par un superbe tour de force mathématique, l'équation établie par Einstein pour un trou noir en rotation. La géométrie de Kerr ne change rien d'essentiel à l'image du disque de matière. Ce disque ressemble à celui qui tourne autour d'un trou noir défini par la géométrie de Schwarzschild ; toutefois, les termes de rotation des équations font que le rayon de Schwarzschild et l'horizon ne coïncident plus : la rotation a introduit une asymé-

trie. Si l'ensemble trou noir-disque tourne (vu de dessus) dans le sens contraire des aiguilles d'une montre, l'image est déformée vers la droite, et le point culminant de l'image du disque est repoussé du même côté. La rotation du trou noir produit un effet d'entraînement qui dévie les rayons lumineux plus vers la droite que vers la gauche.

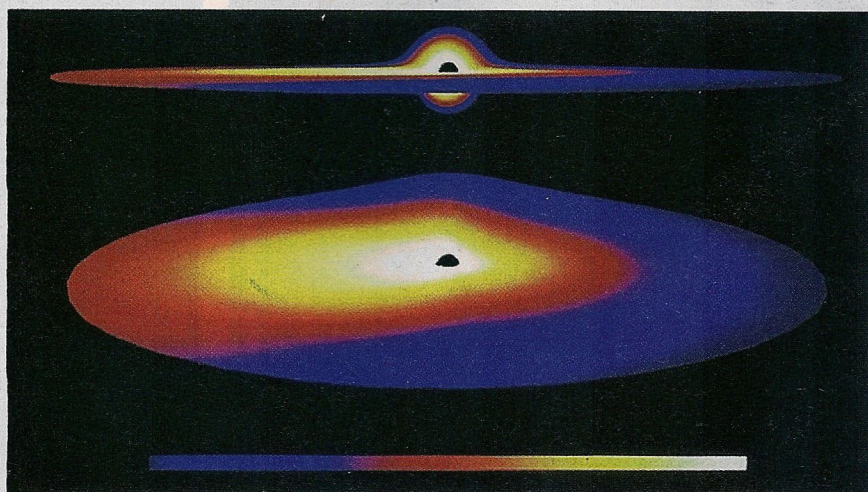
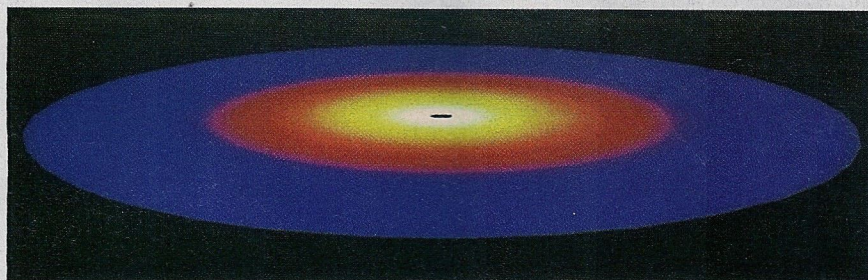
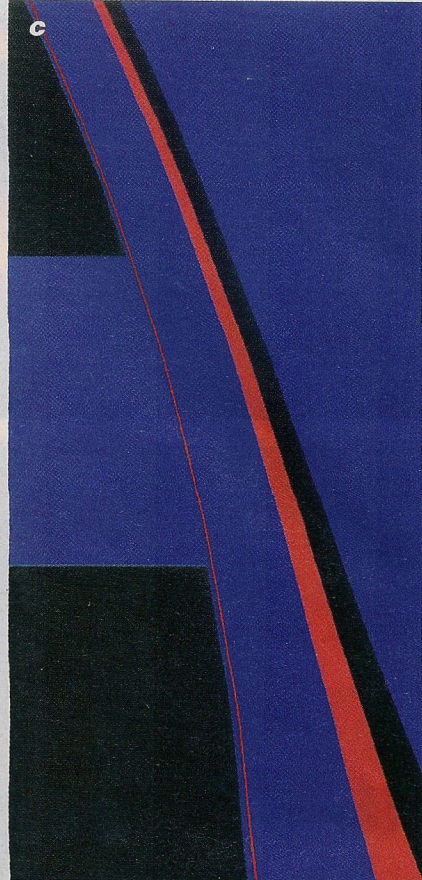
La moitié gauche de la première image indirecte a une structure en forme de coude. Comme dans la géométrie de Schwarzschild, la lumière de cette image, que l'on perçoit en haut de l'horizon, provient de la face avant du disque. À l'inverse, la lumière que l'on distingue en bas émane de la face arrière. Une différence importante subsiste : la lumière de la face avant tourne autour de la moitié du trou noir et frôle presque l'horizon, les rayons passant très près de cette frontière. En ce qui concerne la lumière de l'arrière du disque, les géodésiques continuent à s'éloigner de l'horizon et, de ce fait, l'image paraît encore plus loin de ce dernier. Le passage d'un trajet optique à l'autre se situe exactement sur les faces gauche et droite du disque (par rapport à l'observateur) et n'est visible sous forme de coude qu'à cause de l'asymétrie résultant de la rotation.

Supposons maintenant qu'un trou noir en rotation comporte aussi une charge électrique. Dans les équations, nous devons aussi tenir compte des termes de charge. E. Newman, de l'Université de Pittsburgh, en Pennsylvanie, a généralisé la description de Kerr pour en faire la géométrie Kerr-Newman. Toutefois, les images ne sont guère modifiées. Si l'on simule la géométrie de Kerr selon plusieurs angles, on observe comment la vue du disque lumineux de matière pourrait changer au cours d'un vol autour du système. Une telle mission ne serait pas possible dans la pratique, la fusée spatiale serait déchiquetée, mais l'animation donne une idée des images qui seraient perçues.

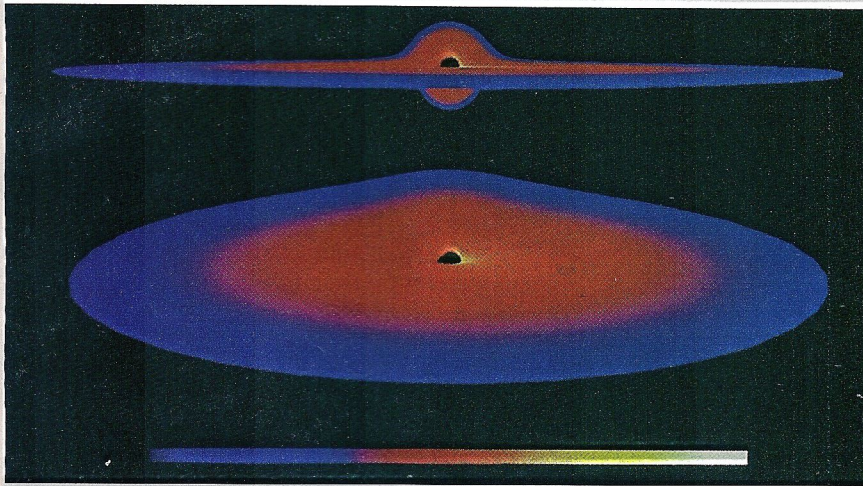
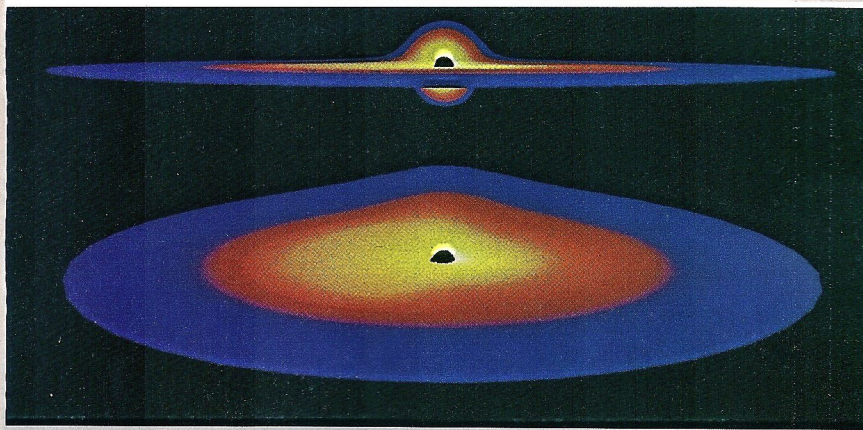
L'animation illustre les modifications du rayonnement du disque, image après image. Pour cela, on calcule, à travers chaque section de l'image, l'ensemble du flux lumineux émis par chaque point du disque. Il apparaît que la luminosité du disque, quand on le regarde dans son plan, est bien supérieure à celle constatée dans la géométrie de Minkowski.



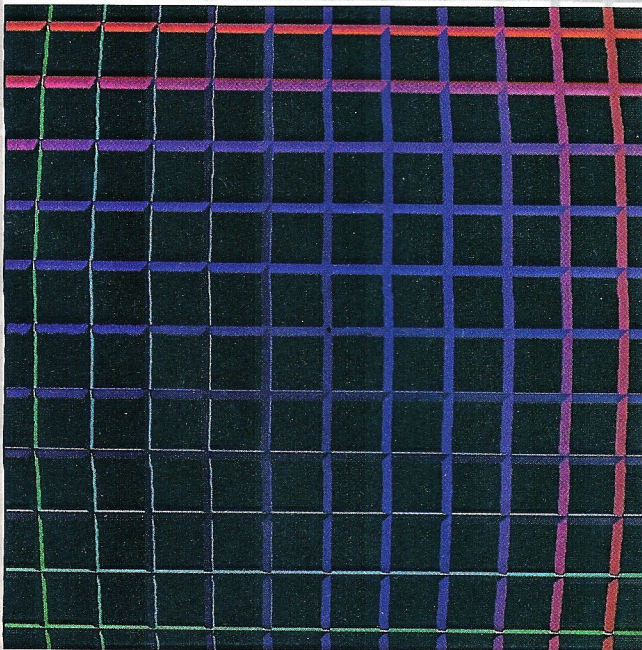
7. SIMULATION ANALOGUE À CELLE DU MILIEU DE LA FIGURE 5 (géométrie de Schwarzschild), mais la masse du trou noir est divisée par trois. En a, une vue générale ; en b, la coupe agrandie du domaine central. On distingue la première et - proche de l'horizon - la seconde images du disque. Sur l'image de droite (c), une partie du bord droit de l'horizon est encore agrandie ; une partie de la zone noire du trou noir est effacée pour une meilleure lisibilité de l'image. On distingue une partie de la troisième image indirecte.



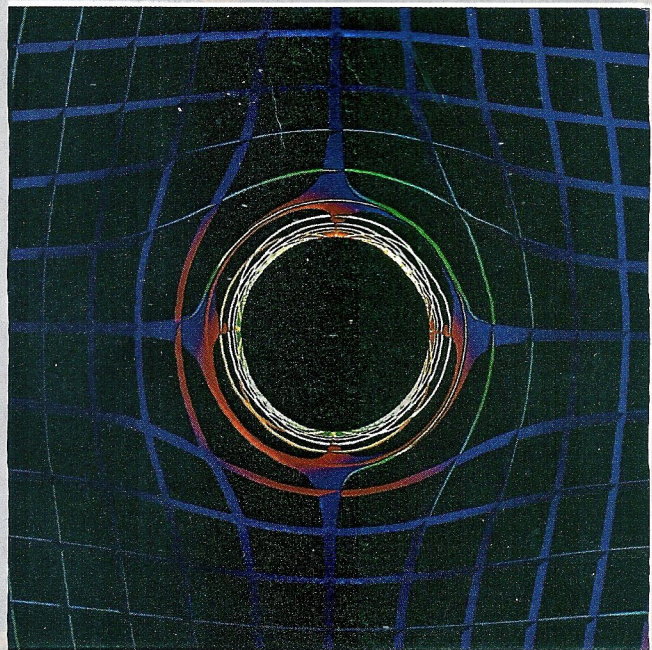
8. SIMULATION DE L'IMAGE D'UN GRAND DISQUE D'ACCRÉTION au voisinage d'un trou noir en rotation. En haut, géométrie de Minkowski ; en bas, géométrie de Kerr. Les paramètres du système correspondent à ceux de la figure 5, sauf le diamètre du tore, 18 fois plus grand, soit à peu près le diamètre de notre Système solaire. On a calculé la marche des rayons ultraviolets à la longueur d'onde de 88 nanomètres. Les couleurs indiquent l'intensité du flux d'énergie : du bleu foncé au blanc, en passant par le rouge (variation de 10^{18}).



9. MÊME SYSTÈME QUE CELUI DE LA FIGURE 7 de la géométrie de Kerr, à cette différence près que la longueur d'onde est de 360 nanomètres (ultraviolet, en haut) et de 1 000 nanomètres (infrarouge, en bas). L'échelle de couleur – du bleu foncé au blanc – représente une variation de 10^6 du flux énergétique.



10. QUADRILLAGE RÉGULIER DE L'ESPACE dans la géométrie de Minkowski (à gauche). La répartition des couleurs a été choisie de manière à donner l'impression que les barreaux de la grille, de section triangulaire, sont éclairés par un faisceau de lumière émis par l'observateur. Les parties des barreaux dont la normale est perpendiculaire



au rayon lumineux réfléchissent peu de lumière et paraissent sombres, contrairement aux parties des barreaux de la grille qui interceptent les rayons lumineux et qui apparaissent plus claires. Un trou noir statique, qui se trouve entre la grille et un observateur (géométrie de Schwarzschild), déforme l'espace-temps (à droite).

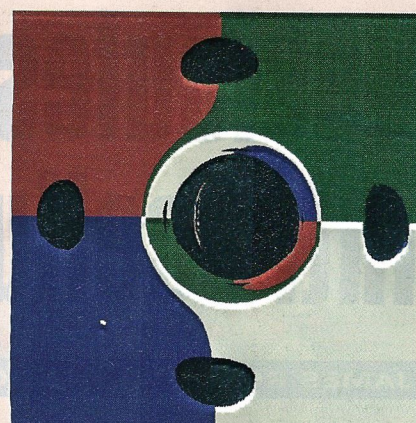
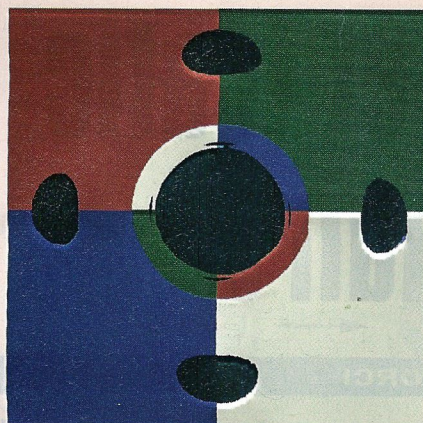
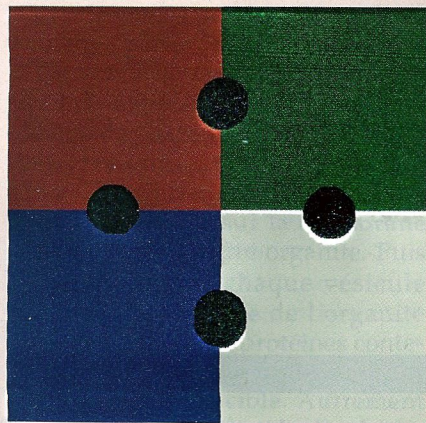
Les lois de la théorie de la relativité générale révèlent qu'une part considérable du rayonnement émis par le disque atteint l'observateur.

Les trous noirs sont des lentilles gravitationnelles

Les rayons lumineux issus d'un objet éloigné sont déviés par le champ gravitationnel du trou noir quand ils passent à sa proximité, tout comme la lumière d'une étoile est déviée par le Soleil. Un trou noir déforme l'image d'un corps céleste qui se trouve, du point de vue de l'observateur, derrière ce trou. Ces effets optiques sont comparables à ceux d'une lentille dans l'optique géométrique, et l'on assimile les trous noirs à des lentilles gravitationnelles.

Isaac Newton, qui avait découvert la loi de la gravitation en 1666, subodorait que la lumière pouvait être déviée par la masse d'un corps. Dans les années 1930, Einstein reconnut qu'un objet massif dévierait la lumière d'une étoile située derrière cet objet, de telle sorte que l'étoile apparaîtrait non pas comme un point lumineux, mais comme un anneau entourant l'image de cette étoile en l'absence de l'objet massif.

Ce mirage ne dépend que de la masse de l'objet qui dévie les rayons

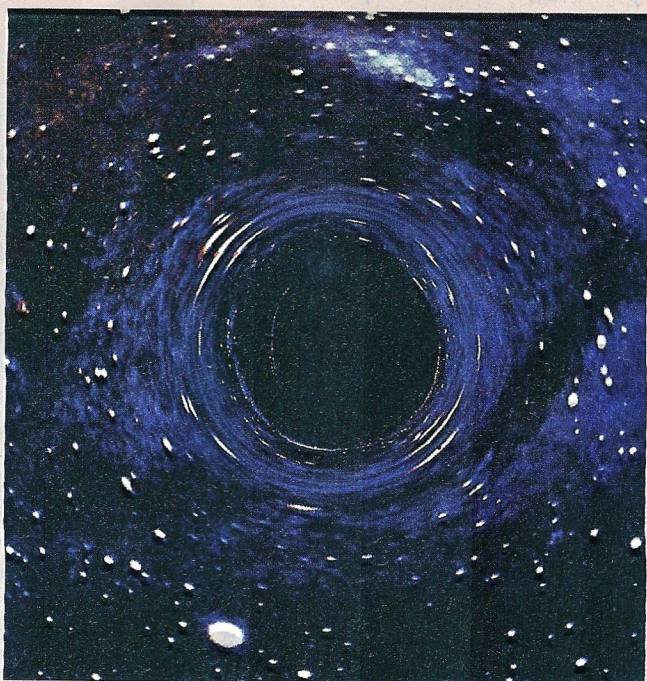


11. UN TROU NOIR agit comme une lentille gravitationnelle. Poursimuler son effet sur un arrière-plan, on divise celui-ci en quatre zones colorées différemment. Les quatre points noirs servent de repères (à gauche). Un trou noir qui se trouverait dans l'ob-

servateur déformerait fortement l'image de la surface. La première simulation (au centre) résulte de la présence d'un trou noir statique (géométrie de Schwarzschild), la seconde (à droite), est le résultat d'un trou noir en rotation (géométrie de Kerr).



12. PHOTOGRAPHIE DU NUAGE D'ANDROMÈDE, galaxie voisine de notre Voie lactée (à gauche). Un trou noir qui se trouverait dans l'axe de visée de l'observateur agirait comme une lentille gravita-



tionnelle, et les images presque ponctuelles des étoiles se déformeraient pour ressembler à des taches circulaires ou «anneaux d'Einstein» (à droite, simulation en géométrie de Kerr).

lumineux, et les galaxies massives sont aussi des lentilles gravitationnelles. La répartition des étoiles et des nuages de gaz des galaxies fait que l'on obtient généralement plusieurs images partielles et plus ou moins intenses de la source de lumière située à l'arrière-plan. En 1979, Dennis Walsh, de l'Université de Manchester, et ses collègues Robert Carswell et Ray Weyman remarquèrent que deux quasars angulairement très proches présentaient des spectres presque identiques. Les chercheurs n'avaient pas découvert de jumeaux cosmiques, mais la première lentille

gravitationnelle : si le quasar paraît double, c'est que sa lumière est déviée par une galaxie interposée entre lui et la Terre. Nous connaissons aujourd'hui de nombreux exemples de len-

tilles gravitationnelles. La comparaison de ces observations et des simulations sur ordinateur confirmant que les simulations sont conformes à la réalité.

Norbert QUIEN, Rainer WEHRSE et Christoph KINDL travaillent à la simulation sur ordinateur de trous noirs, à l'Université de Sarrebruck, en Allemagne.

Banesh HOFFMANN, *Histoire d'une grande idée, la relativité*, collection Regards sur la Science, éditions Pour la Science, 1985.

J.D. FOLEY, A. van DAM, S.K. FEINER et J.F. HUGHES, *Computers Graphics*, Addison Wesley, 1990.

J.-P. LUMINET, *Les trous noirs*, éditions du Seuil, 1992.

J. FRANK, A. KING et D. RAINE, *Accretion Power*, Cambridge University Press, 1992.