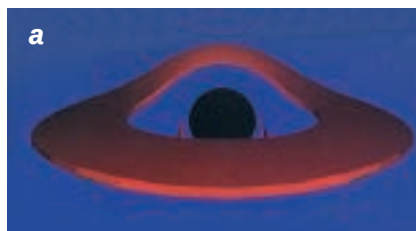


trie. Si l'ensemble trou noir-disque tourne (vu de dessus) dans le sens contraire des aiguilles d'une montre, l'image est déformée vers la droite, et le point culminant de l'image du disque est repoussé du même côté. La rotation du trou noir produit un effet d'entraînement qui dévie les rayons lumineux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

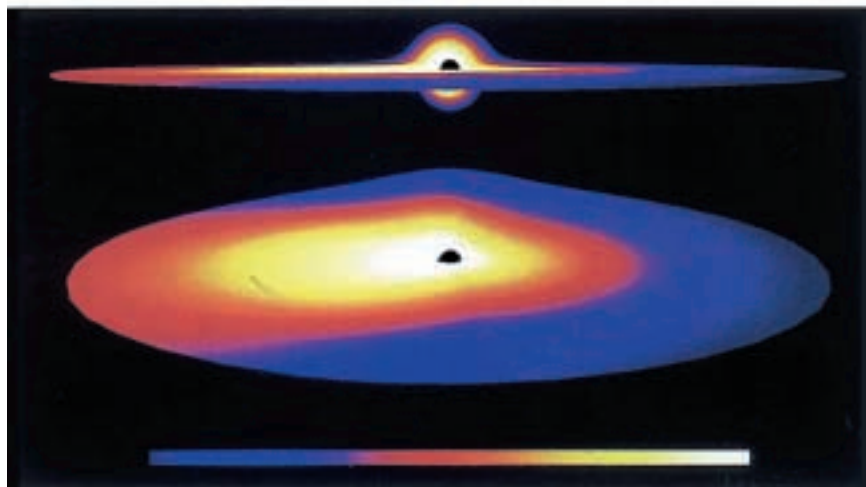
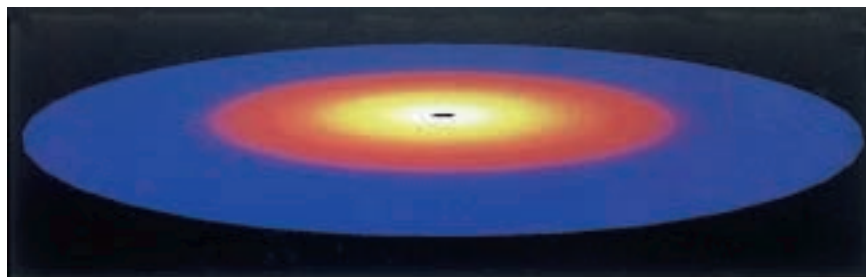
La moitié gauche de la première image indirecte a une structure en forme de coude. Comme dans la géométrie de Schwarzschild, la lumière de cette image, que l'on perçoit en haut de l'horizon, provient de la face avant du disque. À l'inverse, la lumière que l'on distingue en bas émane de la face arrière. 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.

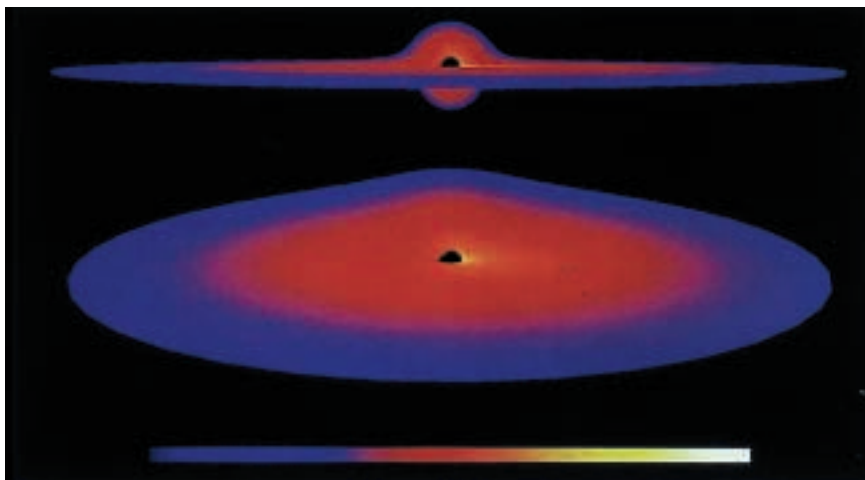
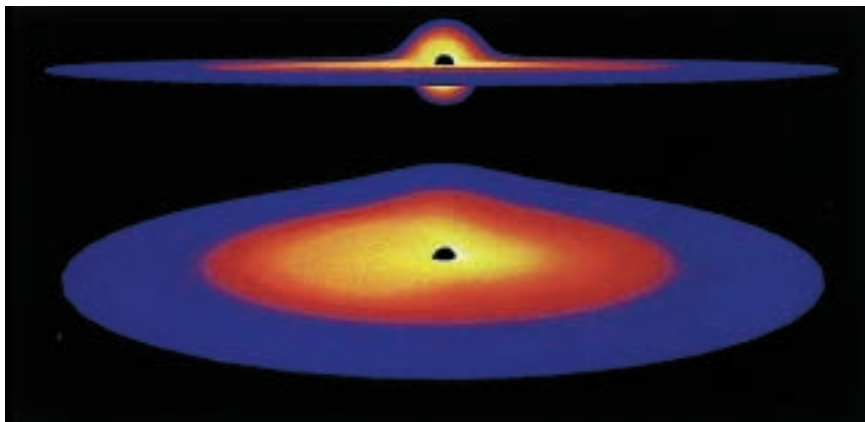
L'animation illustre les modifications du rayonnement du disque, image après image. Pour cela, on calcule, à travers chaque section de l'image, l'ensemble du flux lumineux émis par chaque point du disque. Il apparaît que la luminosité du disque, quand on le regarde dans son plan, est bien supérieure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

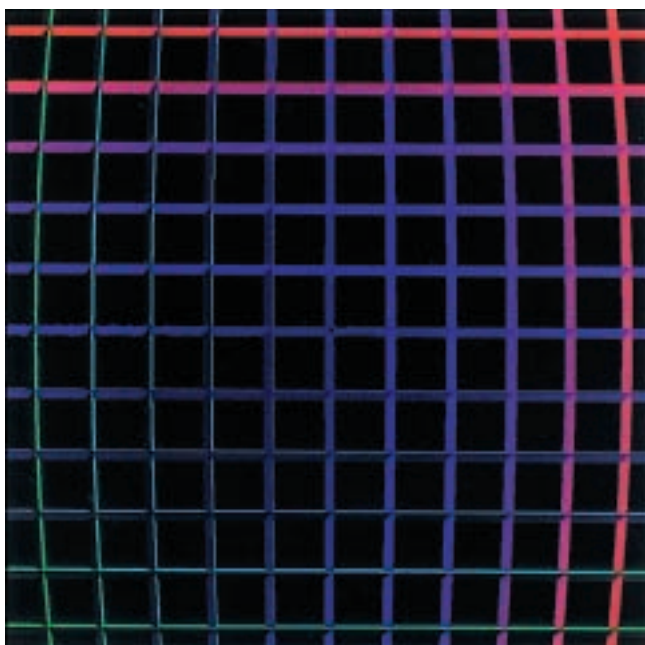
Les lois de la théorie de la relativité générale révèlent qu'une part considérable du rayonnement émis par le disque atteint l'observateur.

Les trous noirs sont des lentilles gravitationnelles

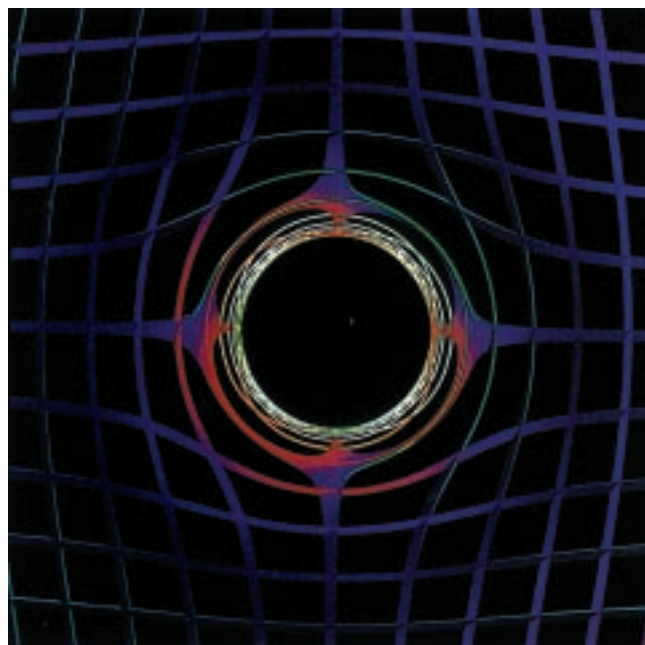
Les rayons lumineux issus d'un objet éloigné sont déviés par le champ gravitationnel du trou noir quand ils passent à sa proximité, tout comme la lumière d'une étoile est déviée par le Soleil. Un trou noir déforme l'image d'un corps céleste qui se trouve, du point de vue de l'observateur, derrière ce 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.

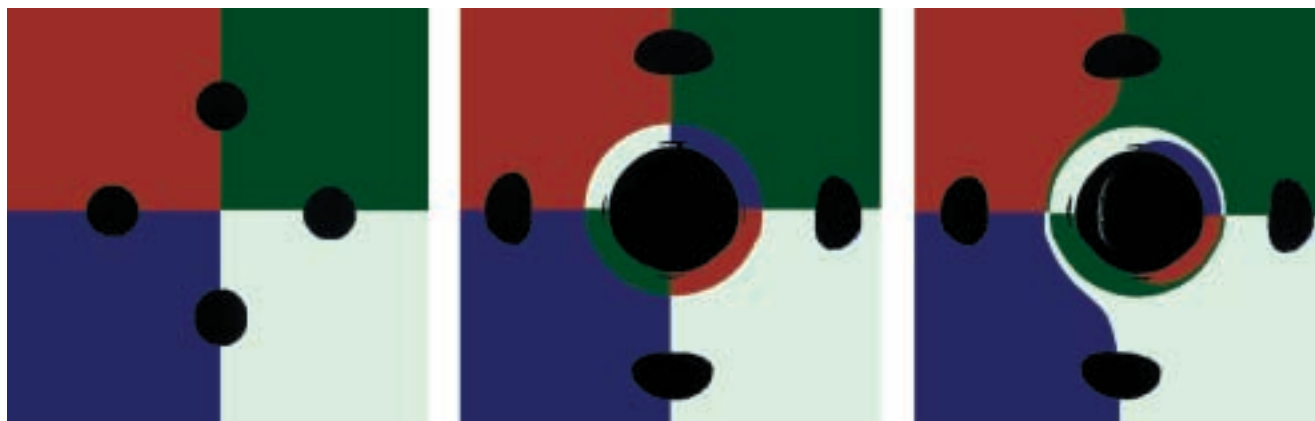
Ce mirage ne dépend que de la masse de l'objet qui dévie les rayons



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).

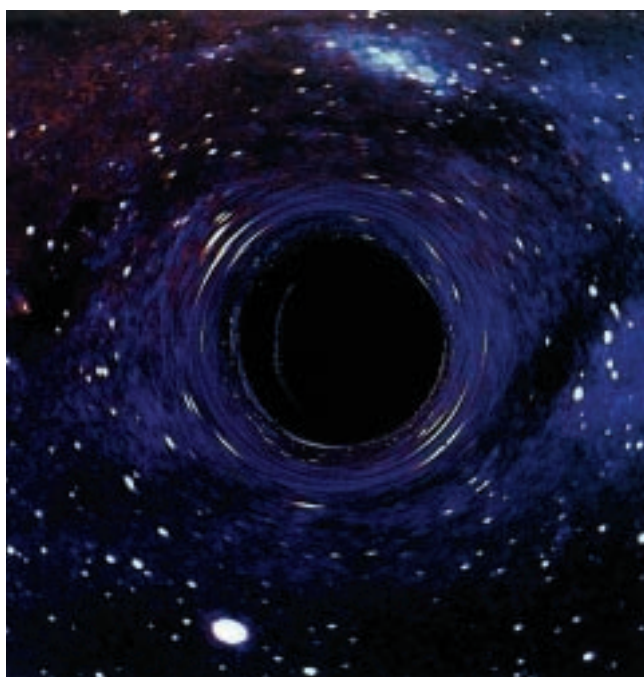


11. UN TROU NOIR agit comme une lentille gravitationnelle. Pour simuler son effet sur un arrière-plan, on divise celui-ci en quatre zones colorées différemment. Les quatre points noirs servent de repères (à gauche). Un trou noir qui se trouverait entre cette surface et l'ob-

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 grava-



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 confirment 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.