

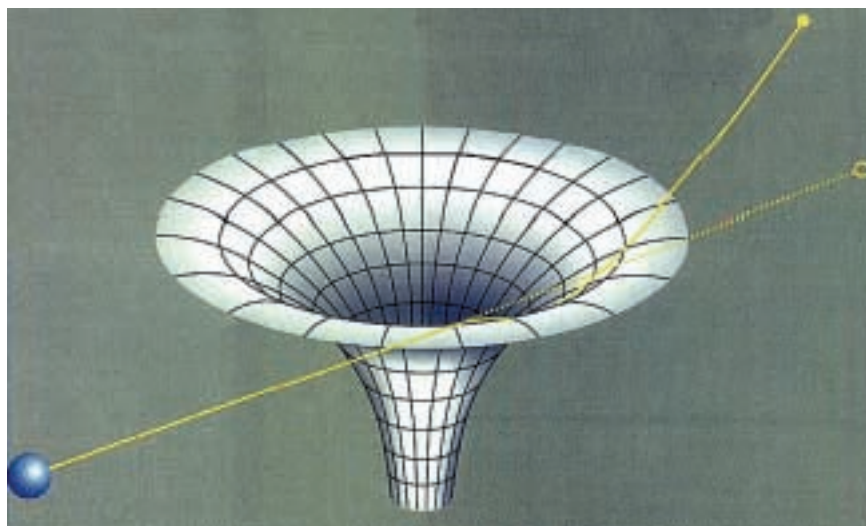
en 1905 dans sa théorie de la relativité restreinte. L'espace tridimensionnel et le temps ne sont pas des données indépendantes, mais les éléments couplés (parce que la vitesse de la lumière est constante) d'un espace-temps à quatre dimensions. La géométrie qui en découle, élaborée par le professeur 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.

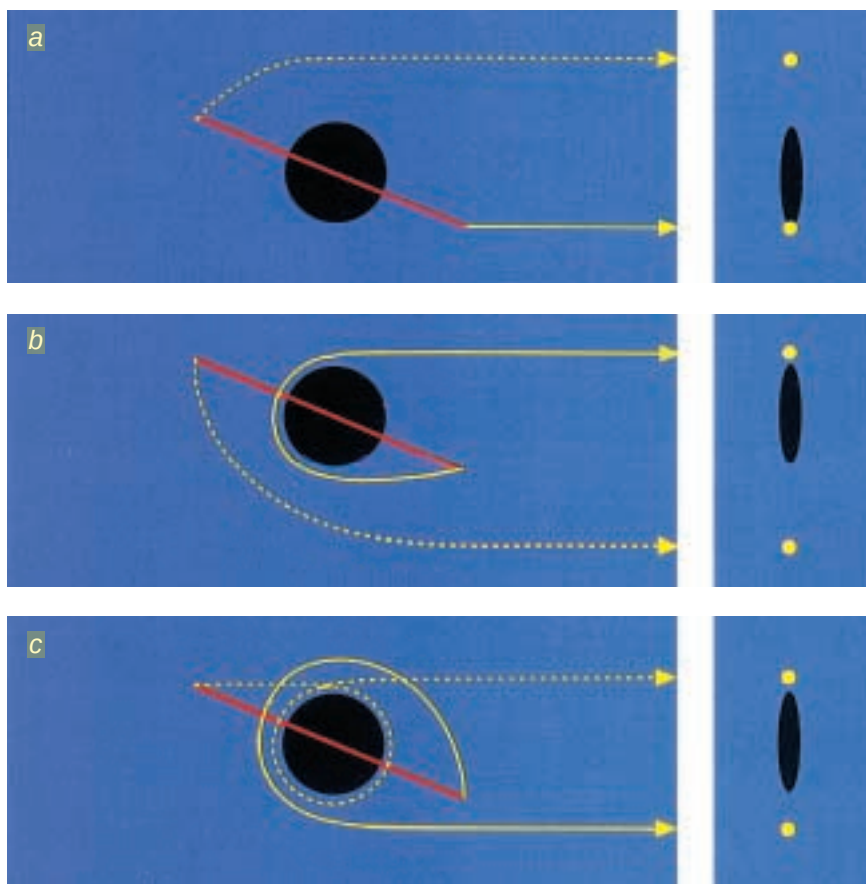
Un champ gravitationnel dévie même la lumière. Schwarzschild calcula cette déviation. En mai 1916, à Postdam, quelques semaines avant sa mort d'une blessure de guerre alors qu'il était lieutenant d'artillerie sur le front russe, il résolut les équations établies par Einstein dans le cas d'un trou noir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

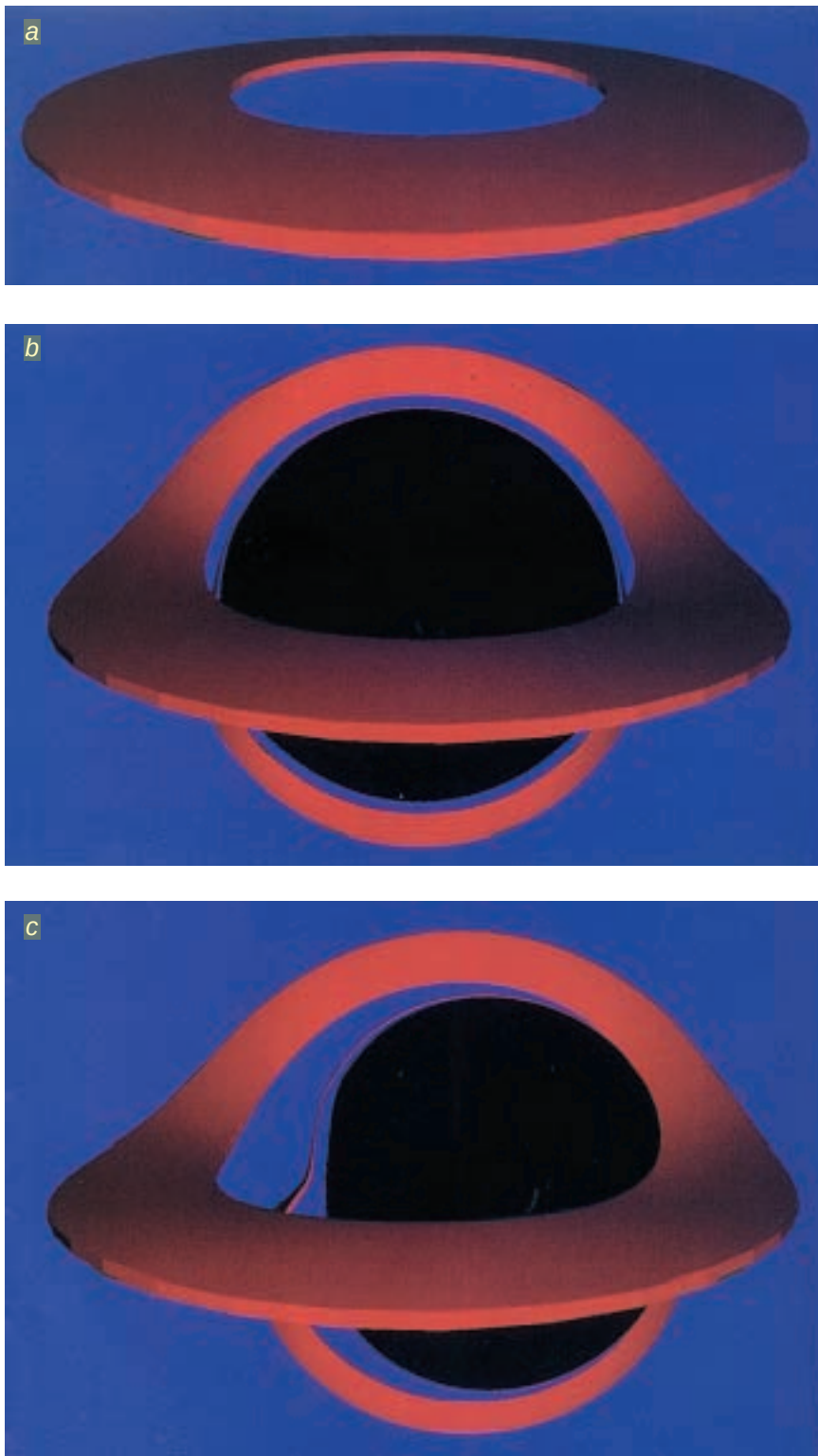
Dans nos simulations sur ordinateur, la notion de droite est modifiée, et il faut suivre chaque rayon lumineux dans un espace-temps courbe. Pour ce faire, nous avons utilisé des procédés numériques modernes afin



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, dévierait 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'ACCRÉTION 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.

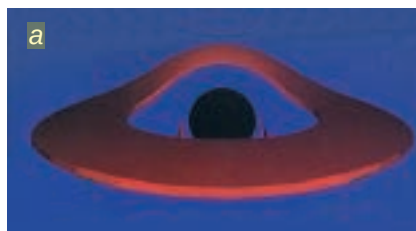
La géométrie de Schwarzschild s'applique quand la masse centrale ne tourne pas. Si l'étoile qui s'effondre est en rotation – ce qui est le cas le plus probable –, le trou noir tourne aussi. Dans ce cas, la géométrie est plus complexe ; le mathématicien néo-zélandais Roy Kerr a résolu, par un superbe 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.

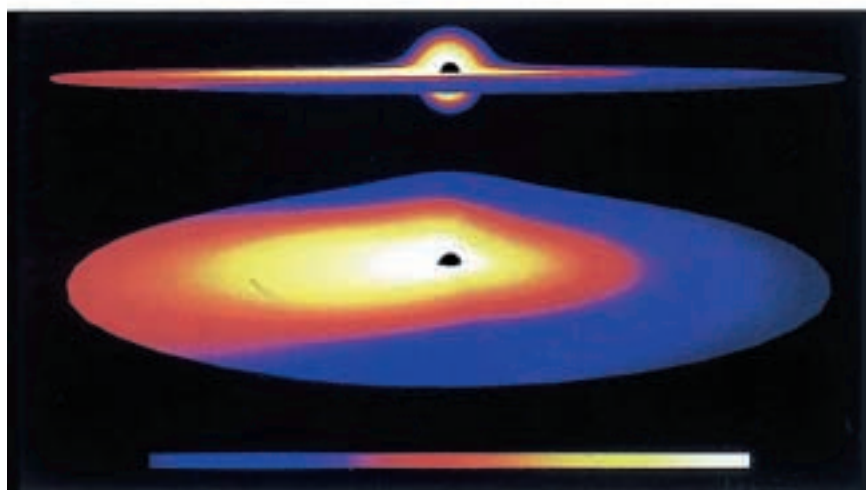
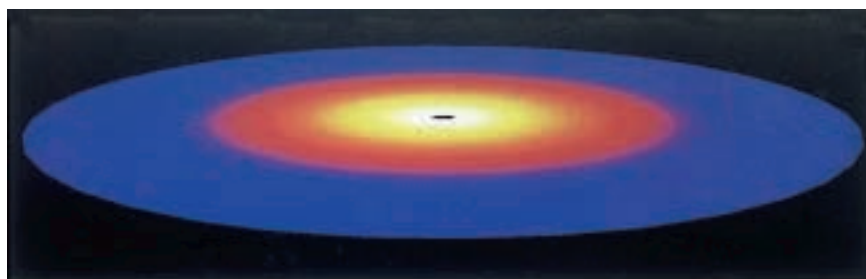
La moitié gauche de la première image indirecte a une structure en forme de coude. Comme dans la géométrie de Schwarzschild, la lumière de cette image, que l'on perçoit en haut de l'horizon, provient de la face avant du disque. À l'inverse, la lumière que l'on distingue en bas émane de la face arrière.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