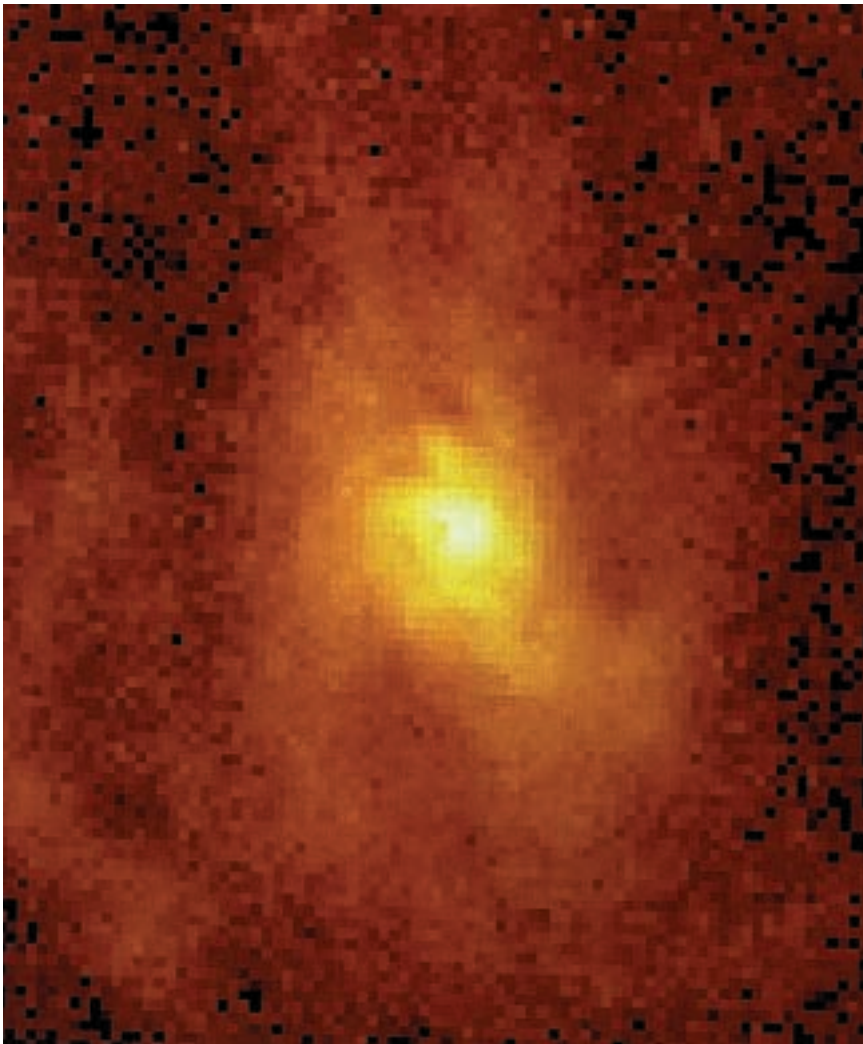
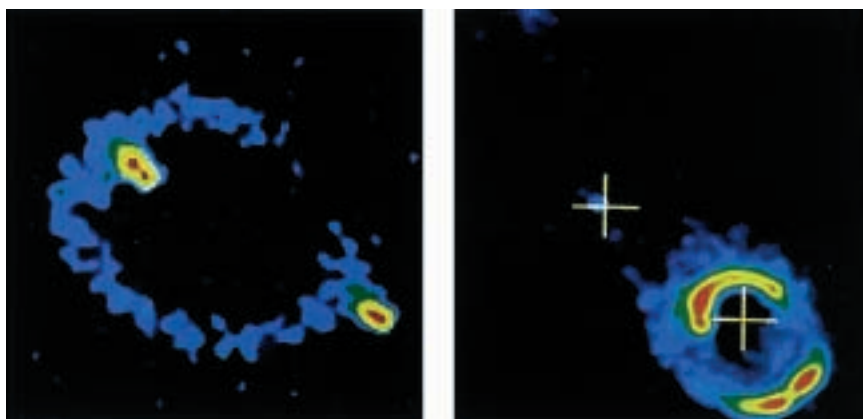




2. PHOTOGRAPHIE DE LA GALAXIE M87, distante de 50 millions d'années-lumière : un grand disque de gaz chauds de 60 années-lumière de diamètre tourbillonne autour d'un centre, à 550 kilomètres par seconde. Ces données sont caractéristiques de la présence d'un trou noir gigantesque dont la masse est deux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

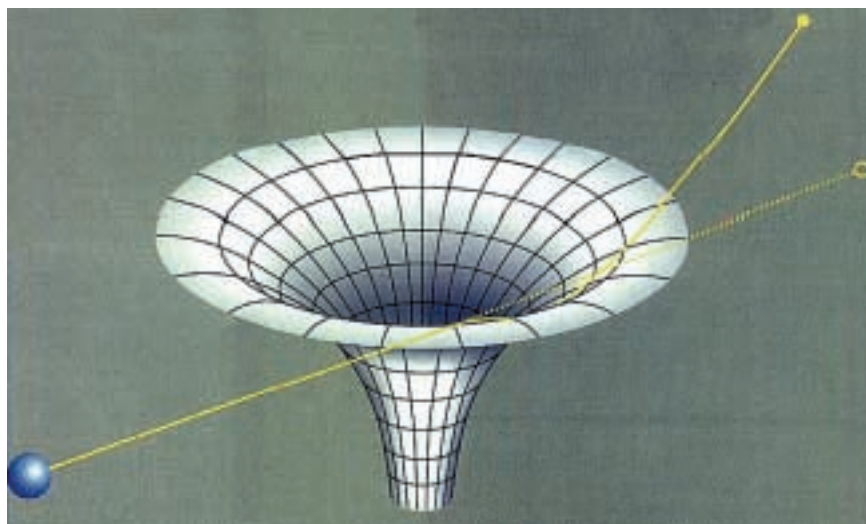
en 1905 dans sa théorie de la relativité restreinte. L'espace tridimensionnel et le temps ne sont pas des données indépendantes, mais les éléments couplés (parce que la vitesse de la lumière est constante) d'un espace-temps à quatre dimensions. La géométrie qui en découle, élaborée par le professeur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

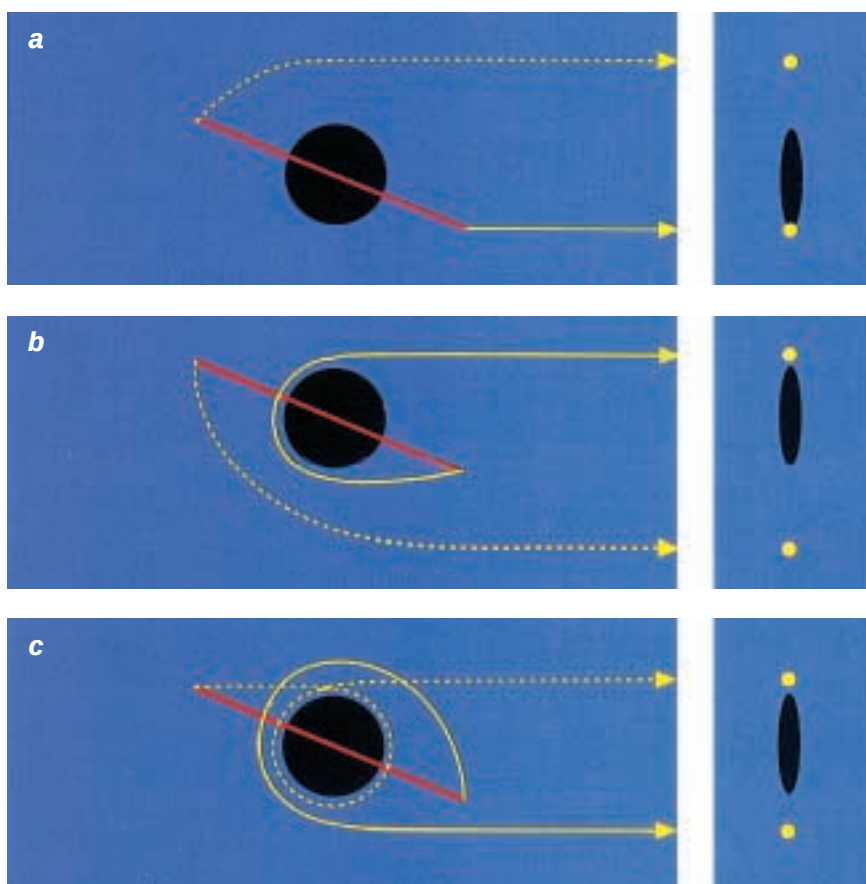
Un champ gravitationnel dévie même la lumière. Schwarzschild calcula cette déviation. En mai 1916, à Postdam, quelques semaines avant sa mort d'une blessure de guerre alors qu'il était lieutenant d'artillerie sur le front russe, il résolut les équations établies par Einstein dans le cas d'un trou noir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