

le voisinage du Soleil qui détermine les trajectoires.

Ainsi, l'existence d'une force gravitationnelle en un point de la toile accélère les astres. La Terre sur son orbite elliptique est, par exemple, soumise à une accélération centrifuge. Nous avons là une illustration du «principe d'équivalence» entre gravitation et accélération, l'un des principes fondamentaux de la théorie d'Einstein suivant lequel les effets de la gravitation se confondent avec ceux d'une accélération. Le plus surprenant est peut-être que, malgré sa formulation apparemment différente, la théorie d'Einstein rejoint celle de Newton lorsque les champs de force de gravitation et les vitesses en jeu restent faibles. Notons que la théorie de la gravitation de Newton inclut implicitement le principe d'équivalence, puisqu'elle pose l'égalité entre la masse inertielle (liée à l'accélération centrifuge) et la masse pesante (liée à la force de gravitation).

La relativité générale a pour le moment résisté à tous les tests expérimentaux. Ses succès sont impressionnants. Elle explique les apparentes anomalies de la précession de l'orbite de Mercure, connues depuis 1859. La déviation des rayons lumineux dans le champ de force de gravitation du Soleil, prédite par Einstein, fut confirmée par l'observation de rayons lumineux passant à proximité du Soleil lors d'une éclipse solaire en 1919 (et qui, normalement, ne sont pas observables en raison de la trop forte luminosité du Soleil). On a aussi vérifié, à plusieurs reprises, que la gravitation et le mouvement combinés avaient une action sur le temps que mesurent des horloges.

En 1915, deux mois après la publication par Einstein de la théorie de la relativité générale, Karl Schwarzschild obtint une solution des nouvelles équations : la «métrique de Schwarzschild». Devenue le prototype même du «trou noir», cette solution décrit d'une façon générale la déformation de l'espace-temps autour d'une répartition de masses à symétrie sphérique.

Imaginons que nous puissions concentrer une boule de matière, telle que le Soleil, dans une sphère dont le rayon serait de plus en plus petit. Remarquons que c'est ce que faisait déjà Newton, quand il évoquait des «masses ponctuelles». Au voisinage de cette boule de matière, la solution de Schwarzschild est valable. Dépasse-t-on, toutefois, dans ce processus, un cer-

tain rayon limite, que les coordonnées trouvées par Schwarzschild, dans le cas statique (c'est-à-dire indépendant du temps), perdent leur légitimité. Le passage à la limite ne permet donc pas de retrouver la masse ponctuelle de Newton, mais montre seulement qu'un rayon limite existe, le «rayon de Schwarzschild». On a longtemps ignoré ce qui se produit à l'intérieur de ce rayon.

Puis, les théoriciens ont trouvé des solutions des équations de la relativité générale qui décrivent le domaine intérieur au rayon de Schwarzschild. La structure de l'espace-temps intérieur peut être analysée en étudiant comment la lumière se propage. Loin à l'extérieur du rayon de Schwarzschild, tout se passe comme dans l'espace à trois dimensions habituel. En revanche, quand on se rapproche du rayon de Schwarzschild, les rayons émis sont incurvés. Quelle que soit sa direction initiale, un rayon proche du rayon de Schwarzschild est si fortement dévié qu'il ne peut s'échapper : il reste confiné à la sphère qui a pour rayon le rayon critique de Schwarzschild. Émise à l'intérieur du rayon de Schwarzschild, la lumière est soumise à la courbure de l'espace-temps ; elle aboutit toujours au point singulier de rayon nul.

L'Univers séparé en deux

Si la lumière extérieure pénètre sans problème à l'intérieur du rayon de Schwarzschild, aucun rayonnement lumineux ne peut en sortir. Le rayon de Schwarzschild définit une structure de l'espace-temps particulière en ce sens qu'un horizon sépare l'Univers en deux parties. Comme aucune information ne peut être transmise à une vitesse supérieure à celle de la lumière, les photons et aussi les particules restent confinés à l'intérieur. L'horizon équivaut à une mem-

brane perméable à l'énergie et aux diverses informations, mais seulement de l'extérieur vers l'intérieur. Tout signal transmis vers l'intérieur aboutit *in fine* à la singularité centrale. En fait, la théorie de la relativité générale stipule que toute masse intérieure à l'horizon évolue pour devenir un point massif singulier. Lors de cet effondrement, espace et temps échangent leurs fonctions : en deçà de l'horizon l'espace «s'écoule et passe», comme le temps dans notre réalité. Les distances se consomment irrémédiablement jusqu'à la singularité, et tout se fond en un point unique.

L'espace-temps décrit par la solution de Schwarzschild est donc vide –privé de matière tant à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'horizon –, à l'exception du centre, où est concentrée toute la masse. Un observateur du monde extérieur perçoit les effets gravitationnels de ce point massif. Le phénomène que les astrophysiciens nomment «trou noir» n'est ni un objet matériel ni la manifestation d'un rayonnement, c'est un trou dans l'espace-temps.

L'existence d'horizons (que les physiciens nomment frontières de causalité) est un résultat remarquable de la relativité générale. La singularité se situe d'un côté de l'horizon et n'a aucun lien avec d'éventuels observateurs extérieurs, c'est-à-dire qu'elle ne leur envoie jamais aucune information. Elle est comme masquée par une espèce de «censure cosmique» ! Les étoiles habituelles, les planètes et autres objets cosmiques sont bien sûr plus grands que leurs rayons de Schwarzschild respectifs. Celui-ci serait de trois kilomètres pour le Soleil, et seulement de 0,9 centimètre pour la Terre. La différence énorme entre les rayons de Schwarzschild et les tailles réelles des astres signifie que, dans leur voisinage, l'espace-temps est pratiquement plat.



3. UN DISQUE DE GAZ et de poussière de 3 700 années-lumière de diamètre a été découvert au cœur de la galaxie elliptique NGC 7052 par le télescope spatial Hubble. Ci-dessus, NGC 7052 telle qu'elle apparaît dans le télescope. Les astronomes ont déduit de la vitesse avec laquelle la matière tournoie autour du centre qu'une masse égale à 300 millions de masses solaires doit s'y trouver. La seule explication plausible de l'existence d'un objet à la fois si massif et si petit est qu'il s'agit d'un trou noir.

Les particules subatomiques, les protons par exemple, ont 10^{39} fois la taille de leur rayon de Schwarzschild. Décidément non, la gravitation ne joue aucun rôle dans le monde des particules élémentaires!

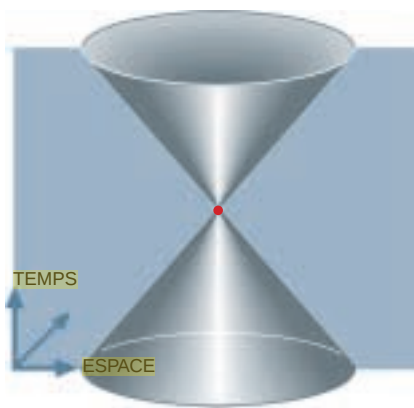
Il en va tout autrement pour une étoile à neutrons, dont la masse se compare à celle du Soleil. Son rayon égal à une dizaine de kilomètres seulement n'est que trois fois supérieur à la valeur de son rayon de Schwarzschild. C'est pourquoi la relativité générale est essentielle dans la description de la structure d'une telle étoile. Lorsqu'elle a épuisé son carburant nucléaire, une étoile à neutrons de masse suffisamment grande s'effondre sous son propre poids et disparaît finalement derrière son horizon de Schwarzschild, dans la singularité qu'elle crée. Pour un observateur situé à la surface, l'ensemble ne dure que le temps d'une chute libre, c'est-à-dire quelques secondes. En revanche, un observateur éloigné voit la surface stellaire se contracter de plus en plus lentement : elle n'atteint pas l'horizon en un temps fini. Pour lui, l'image se fige au rayon de Schwarzschild. Cette évolution s'explique par la propagation des ondes lumineuses près des horizons.

Si un cosmonaute suicidaire décidait de se laisser tomber dans un trou noir en émettant des éclairs lumineux à intervalles réguliers, un observateur détecterait des impulsions de plus en plus espacées dans le temps ; le dernier flash, émis de l'horizon, ne parviendrait jamais à l'observateur (voir la figure 5). Ce décalage temporel est accompagné d'un autre phénomène : la longueur d'onde de la lumière émise est fortement décalée vers le rouge (c'est-à-dire qu'elle est décalée vers de plus grandes longueurs d'onde). Cet étirement de longueur d'onde croît exponentiellement à mesure que la source se rapproche de l'horizon de Schwarzschild. La luminosité reçue s'atténue rapidement, et l'étoile devient vite invisible.

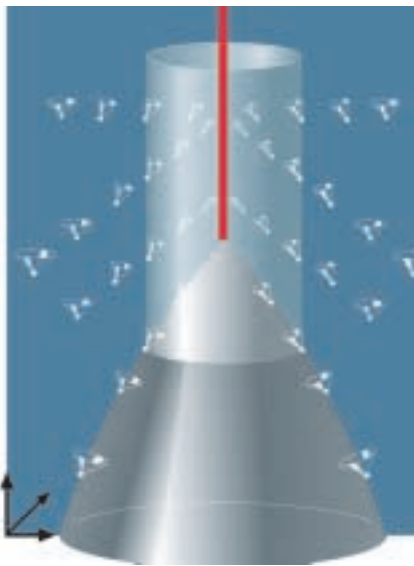
La solution de Schwarzschild ne dépend que de la masse du trou noir considéré. Elle n'est pas valable lorsque l'objet effondré tourne sur lui-même. Or, la plupart des étoiles tournent sur elles-mêmes, phénomène qui ne disparaît pas lors de l'effondrement. Dans ce cas de figure, les configurations possibles d'espace-temps et d'horizons se multiplient par rapport au cas simple de Schwarzschild. La situation devient encore plus complexe quand le trou

noir porte une charge électrique. Pour le monde extérieur, un trou noir est complètement défini par sa masse, son moment cinétique et sa charge.

Quoique, par définition, les trous noirs n'émettent aucun rayonnement,



4. À PARTIR DU POINT de l'espace-temps marqué en rouge, seules les régions contenues à l'intérieur du cône de lumière sont accessibles. Le cône lui-même représente la zone de l'espace-temps que peut atteindre un signal lumineux (et l'information qu'il transporte) depuis le même point.



5. REPRÉSENTATION de l'effondrement gravitationnel d'un astre dans l'espace-temps à trois dimensions (deux d'espace et une de temps). Le temps s'écoule vers le haut, de sorte que les états successifs de l'astre sont représentés par chacune des coupes horizontales. L'astre s'effondre régulièrement (surface quasi conique), jusqu'à ce que son champ de gravité superficiel empêche tout rayon lumineux d'échapper et qu'apparaisse ainsi un horizon des événements (cylindre grisé). L'effondrement se termine en singularité (ligne rouge), c'est-à-dire par un état infiniment dense et infiniment petit. Les petits cônes de lumière illustrent la propagation de signaux lumineux en différents points de l'espace-temps. Plus un point est proche de la singularité, plus la lumière est déviée vers elle et plus son cône de lumière est resserré.

et qu'ils ne soient pas observables directement, ils peuvent, dans certaines circonstances, révéler leur présence : quand ils engloutissent la matière qui passe à proximité. Les masses ainsi aspirées ne se précipitent pas sur le trou noir en ligne droite, mais en spirale. Elles s'accumulent d'abord dans un anneau aplati, le «disque d'accrétion». Ce faisant, elles s'échauffent tant qu'elles deviennent des sources intenses de rayons X, que les astronomes enregistrent grâce à des instruments placés à bord de satellites.

Un certain nombre de sources X compactes, susceptibles d'abriter des trous noirs ont déjà été localisées. Certaines font partie de systèmes stellaires binaires (deux étoiles qui tournent l'une autour de l'autre) et gravitent autour d'un astre visible, directement observable (voir la figure 6). La mesure des paramètres dynamiques des orbites du système indique la masse de l'émetteur des rayons X. Quand cette dernière est supérieure à la masse maximale compatible avec une étoile à neutrons, il peut s'agir d'un trou noir. La source Cygnus X-1, dans la constellation du Cygne, est le trou noir probable le plus connu.

Un trou noir déniché au cœur de notre Galaxie

Les astronomes ont aussi découvert, à l'intérieur de galaxies actives (en évolution rapide) et de quasars (les noyaux très lumineux de galaxies lointaines), des concentrations surprenantes de masse et d'énergie, qui évoquent la présence de trous noirs gigantesques. Ainsi, au centre de la galaxie Messier 87, une masse de gaz tourne à une vitesse d'environ 750 kilomètres par seconde ; elle serait piégée par un trou noir qui contiendrait près d'un milliard de fois la masse solaire! Un trou noir a même pu être déniché au cœur de notre propre Galaxie, la Voie lactée. Des mesures des longueurs d'onde infrarouges, qui traversent les écrans de poussière interstellaire masquant le centre galactique, ont montré que les mouvements des étoiles d'une région de 0,3 année-lumière de rayon résultent de la présence d'une masse d'environ trois millions de masses solaires. Cette masse ne saurait être ni un amas d'étoiles ni une unique étoile immense, car tous les modèles le prouvent, de tels objets se seraient transformés en trou noir en moins d'un million d'années.

Quand une étoile s'effondre pour donner un trou noir, c'est-à-dire une