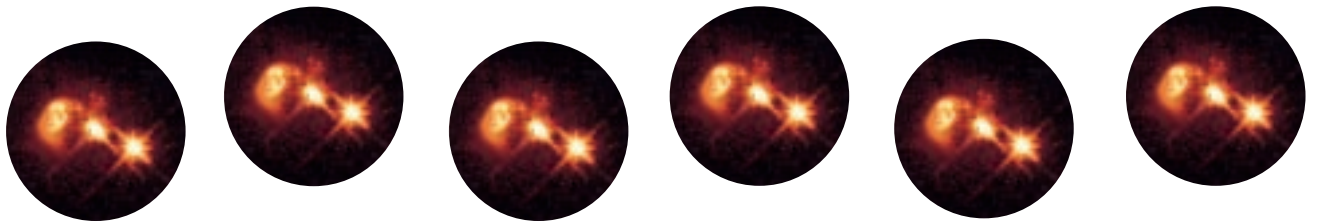


L'infiniment grand

GERHARD BÖRNER

L'Univers semble être brusquement sorti d'un état initial infiniment dense, que les physiciens ont des difficultés à imaginer et à décrire par une théorie.



L'infiniment grand, l'Univers, est-il sorti de l'infiniment petit, c'est-à-dire d'un point matériel? Nul ne le sait. Toutefois, de nombreuses théories prédisent un comportement extrême de la matière : la contraction sans fin des grandes masses sous l'effet de leur propre poids, jusqu'à la formation d'un point infiniment dense. Pour les physiciens, ces théories sont imparfaites ; elles annoncent des états aberrants, qu'ils ne sauraient admettre. Cependant, ils sont persuadés que ces points singuliers indiquent des tendances réelles des systèmes cosmiques, dont, au premier chef, l'Univers lui-même. L'observation de plus en plus probable de trous noirs, les traces laissées par une lointaine explosion originelle d'une nature mystérieuse sont autant d'indices qui les confortent dans leur conviction. Ils étudient donc ardemment les «maladies» de leurs édifices théoriques, au premier rang desquelles la relativité générale d'Albert Einstein et le modèle cosmologique standard, et inventent de nouvelles théories plus générales. Dans le même temps, ils observent de près les catastrophes cosmiques, telles les supernovae, les trous noirs, les quasars et les tourbillons ultra-rapides de nuages stellaires. Leur but : tout comprendre avant que l'Univers ne... disparaisse.

Intuitivement, il nous semble évident que les grandes masses soumises à la force de gravitation auront une destinée catastrophique. La gravitation agit à l'identique sur toutes les particules massives : elle les attire. De plus, elle a

une portée infinie, même quand elle est faible. Par ailleurs, si nous ajoutons particule sur particule à une masse quelconque, la force de gravitation croît avec le nombre de particules. Elle finit toujours par l'emporter sur toutes les forces qui s'opposent à son effet, que ce soit la pression thermonucléaire au cœur d'une étoile, la force répulsive interne aux noyaux atomiques ou la pression d'un gaz de particules. À cela s'ajoute le fait que non seulement la matière, mais aussi l'antimatière, ou même toute forme d'énergie, a un effet gravitationnel. Réciproquement, toute forme d'énergie subit la pesanteur. C'est pourquoi, si une gigantesque pression interne peut – jusqu'à un certain point – maintenir une masse en équilibre, les formes d'énergie qui créent cette pression contribuent à son champ de pesanteur et participent finalement à son effondrement gravitationnel.

Les singularités de l'espace-temps

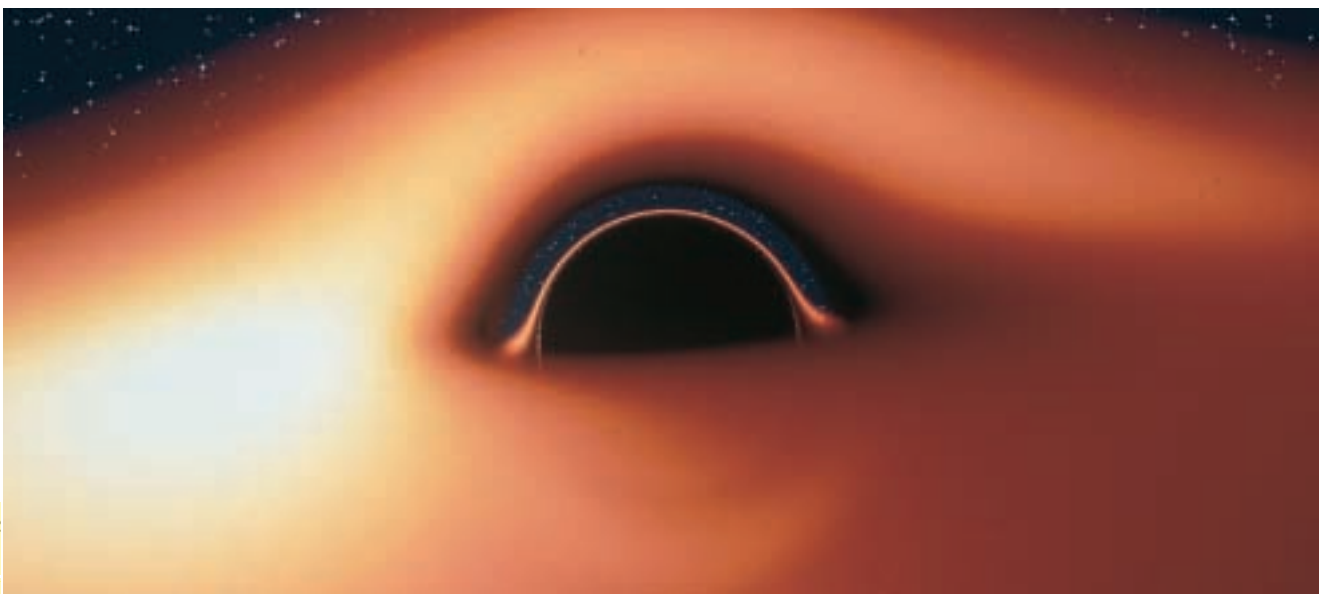
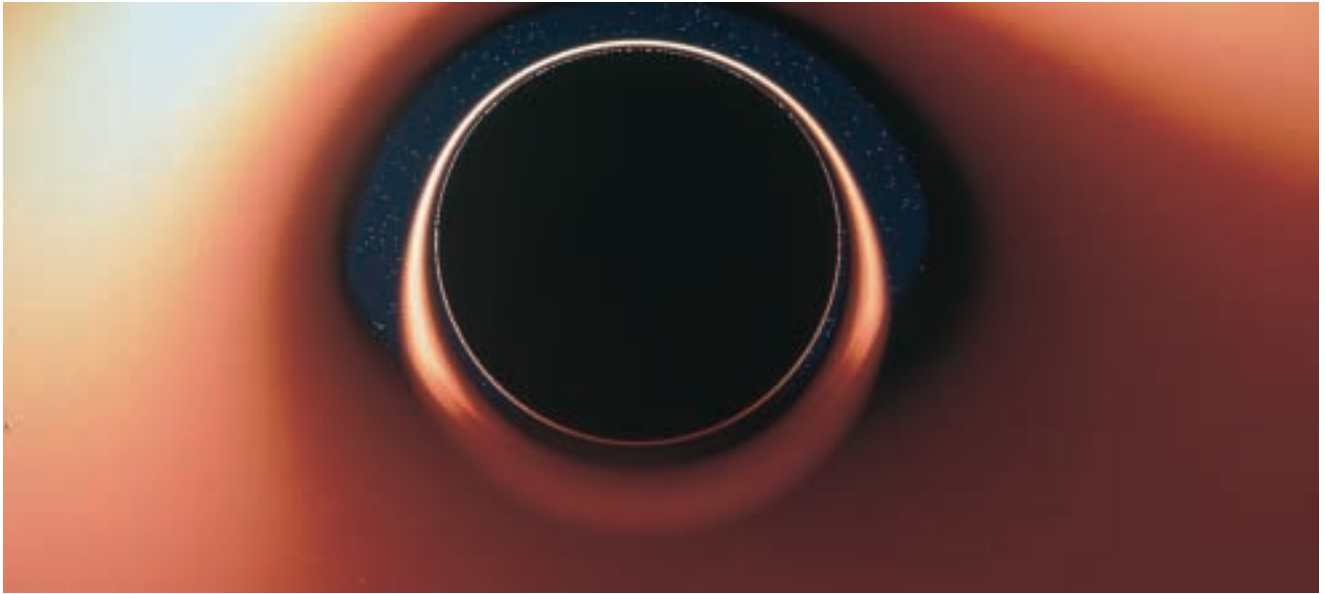
Les solutions des équations compliquées de la relativité générale présentent des singularités, dont on a longtemps pensé qu'elles étaient des conséquences des hypothèses de symétrie, introduites dans les calculs pour en faciliter la résolution. Les physiciens espéraient qu'elles disparaîtraient si l'on perturbait légèrement ces solutions, pour les rendre un peu moins symétriques. Toutefois, dans les années 1965 à 1970, les mathématiciens et les physiciens britanniques Roger Penrose et

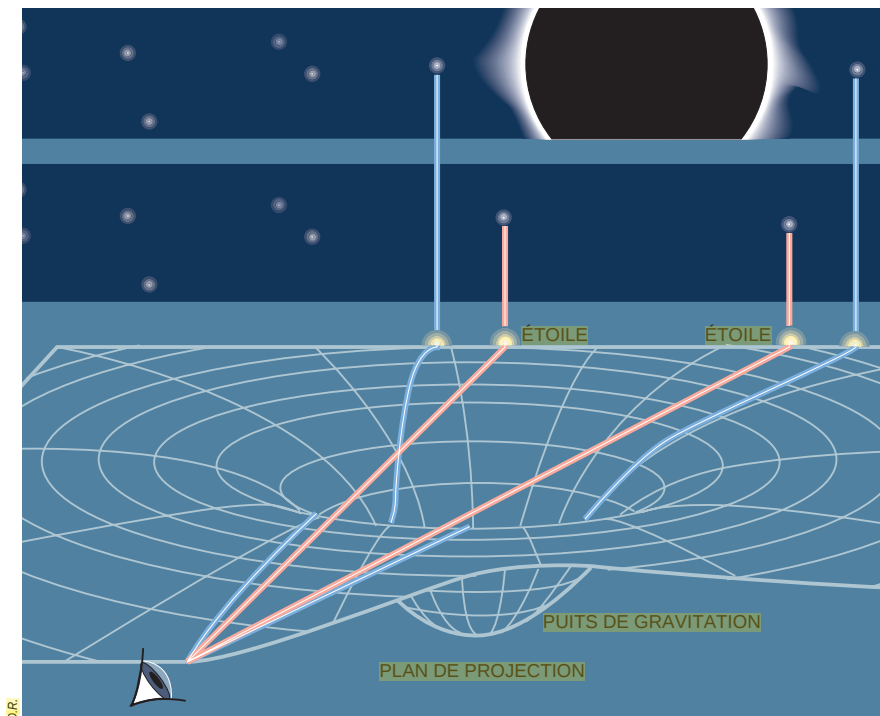
Stephen Hawking montrèrent que des singularités de l'espace-temps apparaissent aussi dans le cas général, non symétrique, et qu'elles sont, en général, stables vis-à-vis de petites perturbations. En d'autres termes, ces physiciens découvraient que les singularités sont des cas limites incontournables en relativité générale, des «maladies» dont la nature ne pourra être mieux comprise sans une extension quantique de la théorie d'Einstein. Toutefois, de nombreux physiciens pensent que les théories physiques actuelles suffisent à décrire la situation à proximité de ces singularités, nommées «lieux d'infinis», quelle que soit leur nature réelle.

Les trous noirs et le Big Bang sont-ils des lieux d'infinis? Avant d'aborder cette question, rappelons quelques aspects fondamentaux des théories de la gravitation.

Isaac Newton, le savant anglais du XVII^e siècle fondateur de la physique théorique classique, admettait l'existence d'un espace absolu. Il lui attribuait implicitement les propriétés géométriques que le Grec Euclide avait déduites d'axiomes fondamentaux «intuitifs». Newton supposait aussi qu'un «temps universel», mesurable sans ambiguïté, caractérise tous les événements que l'on peut étudier. Ainsi, un espace absolu muni de repères solides et inaltérables fixe le cadre où évoluent les corps

1. DIVERSES SIMULATIONS de trous noirs. Au cours de leur aspiration par un trou noir, les gaz interstellaires s'échauffent au point de former un plasma ultrachaud : le disque d'accrétion (les zones blanc-jaune).





2. SELON LA THÉORIE de la relativité générale, les grandes masses courbent l'espace-temps dans leur voisinage, ce qui provoque une déviation apparente de la lumière. Ce phénomène a été prouvé par des observations pendant une éclipse totale du Soleil. Si la lumière n'était pas déviée par la masse du Soleil, elle suivrait les trajectoires directes (en rose). La présence du Soleil dévie la lumière, de sorte qu'un observateur voit les étoiles proches du Soleil (en bleu) plus à l'extérieur qu'elles ne le sont en réalité.

matériels au cours d'un temps lui aussi parfaitement défini. On constate que tous les objets tendent à se déplacer uniformément en ligne droite, sauf quand des forces extérieures perturbent ce déplacement. L'une de ces forces est la force de gravitation, laquelle se manifeste, par exemple, par la pesanteur. Cette force, attraction mutuelle entre deux corps massifs, est proportionnelle au produit de leurs masses et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare.

Albert Einstein reformule les conceptions de Newton

Albert Einstein a reformulé les conceptions de Newton sur l'espace et sur le temps. À la fin du XIX^e siècle, après les expériences de Michael Faraday et les nouvelles théories de James Clerk Maxwell, les physiciens ont commencé à considérer les champs électromagnétiques comme des objets physiques. On admettait désormais que les ondes électromagnétiques se propagent à la vitesse de la lumière même dans le vide, et ce indépendamment des mouvements de leur source. Comment réconcilier cette observation avec la physique classique de Newton? Dans cette théo-

rie, la vitesse apparente de propagation de la lumière ne doit-elle pas augmenter ou diminuer, suivant que la source s'approche ou s'éloigne de l'observateur? Ces difficultés conduisirent Einstein à admettre, en 1905, la défaillance des concepts de temps et d'espace absolus, du moins pour la description de mouvements. Il postula qu'on ne peut déterminer si deux événements sont simultanés ou non, car la réponse dépend du référentiel de l'observateur. Einstein découvrit qu'il fallait abandonner les notions de distance spatiale entre deux points et d'écart temporel entre deux instants, pour utiliser plutôt les intervalles entre événements dans l'espace-temps à quatre dimensions (voir la figure 4).

Cette première extension de la physique classique, la «relativité restreinte», a fourni des bases théoriques fiables à toutes les branches de la physique où la force de gravitation peut être négligée. Elle est en particulier devenue incontournable en physique des particules.

En 1915, grâce à une autre amélioration de la description de l'espace-temps, Einstein parvint à prendre en compte la gravitation. L'idée sur laquelle repose sa théorie de la gravitation, nommée «relativité générale»,

est celle d'un espace-temps dont la structure n'est pas imposée *a priori*, mais qui découle de la répartition des masses et des énergies présentes. Chaque corps déforme – à proximité – l'espace-temps où il évolue. Réciproquement, la géométrie locale de l'espace-temps détermine la dynamique des corps. L'ensemble des déformations de l'espace-temps dues à tous les corps définit le champ de gravitation.

La gravitation agit aussi sur la lumière

La gravitation agit aussi sur la lumière, dont les rayons sont déviés lorsqu'ils approchent de corps massifs (voir la figure 2) : la propagation des rayonnements dépend de la répartition des masses. Ce lien intime entre espace, temps et matière ne simplifie pas les calculs ; cependant, la relativité générale représente un grand progrès en direction d'une physique unifiée. La gravitation fait partie intégrante de l'espace-temps et ne doit plus être traitée en tant qu'interaction physique indépendante, comme le faisait Newton.

Si l'on admet que la gravitation est inscrite dans la structure liant l'espace et le temps, comment détermine-t-on l'attraction mutuelle des objets massifs et comment en déduit-on les mouvements des corps célestes? Tentons de nous représenter l'espace-temps comme une toile de matériau élastique. Dans cette image, les objets de l'Univers pourraient être des boules de masses diverses posées sur la toile. Elles créent des déformations plus ou moins profondes. Une masse importante, telle celle du Soleil, se retrouve au fond d'un «entonnoir», profond et évasé ; une masse faible, comme celle de la Terre, crée à peine une légère dépression. Des corps qui s'aventureraient trop profondément dans l'entonnoir du Soleil tomberaient vers lui, entraînés par la pente, l'équivalent de l'attraction solaire. D'autres corps passant à distance ne seraient pratiquement pas perturbés par la déformation de la toile créée par le Soleil ; leurs trajectoires seraient quasi rectilignes (de tels corps ne seraient pas liés gravitationnellement au Soleil). La Terre peut se maintenir sur un circuit fermé (l'orbite terrestre) le long des pentes de l'entonnoir solaire, parce que sa vitesse est très exactement ajustée à sa distance à l'astre. C'est bien la déformation de l'espace-temps dans

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 tourne 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.