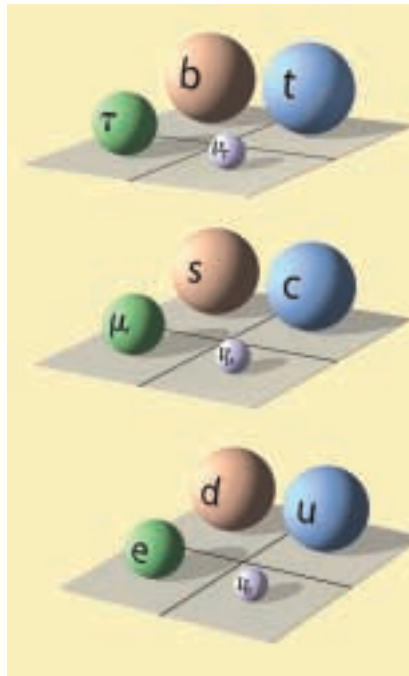


constituants élémentaires a une autre origine.

Ainsi va la physique de l'infiniment petit. Au début du XX^e siècle, on a observé le spectre des états d'énergie de l'électron de l'hydrogène. Bien qu'il ait une structure simple, on ne sut l'expliquer avant l'avènement de la théorie quantique. Aujourd'hui, c'est le spectre des leptons et des quarks que les physiciens cherchent à expliquer. Dans cette science de l'infiniment petit, les progrès naissent le plus souvent d'expériences qui nous livrent de nouvelles structures simples, mais inattendues. Rien de ce genre ne s'est produit au cours des dernières années. Les arguments en faveur des leptons et des quarks du modèle standard sont-ils satisfaisants? Ces particules sont ponctuelles et représentent des singularités dans l'espace. Des particules infiniment petites peuvent-elles avoir une masse? Si oui, pourquoi la masse du muon est-elle 207 fois supérieure à celle de l'électron, bien que par ailleurs ces deux types de particules soient indiscernables. Peut-être serons-nous, un jour, contraints de renoncer au concept de particules ponctuelles. On peut supposer que les masses des leptons et des quarks résultent d'une sous-structure de ces particules, comme c'est le cas pour le proton. Peut-être obtiendra-t-on de nouveaux indices sur les constituants des leptons et des quarks grâce aux expériences futures réalisées dans les grands accélérateurs.

Perfectionner le modèle standard

Une autre raison incite les physiciens à perfectionner le modèle standard : ils voudraient ajouter la gravitation aux trois interactions – électromagnétique, faible et forte – qu'il décrit déjà. En fait, deux conceptions s'opposent : d'un côté, le modèle standard avec ses théories quantiques et ses interactions locales entre particules ponctuelles et, de l'autre, la relativité générale, où la gravitation résulte d'une déformation de l'espace-temps. Que faire? Considérer la relativité générale telle que nous la connaissons comme la théorie classique d'une théorie quantique, plus générale, la gravitation quantique (qui resterait à élaborer)? Une théorie quantique de la gravitation serait en même temps une théorie quantique de l'espace et du temps. Or, le modèle standard et la plupart des théories physiques sont bâties sur l'espace et sur le temps, et toute



8. LE MODÈLE STANDARD est la théorie la mieux acceptée par les physiciens des particules, lesquels le testent par l'expérience depuis 30 ans. Il est fondé sur trois familles au sein desquelles deux quarks sont associés à deux leptons. La matière et ses manifestations les plus courantes sont entièrement dues à la famille (u, d, e, ν_e), laquelle comprend les quarks u et d , l'électron et son neutrino associé. Les autres familles contiennent des particules beaucoup plus massives, qui se manifestent dans les désintégrations de particules lourdes, observables seulement dans les accélérateurs ou dans le Cosmos.

modification des fondations risquerait de les faire vaciller. Néanmoins, aux petites distances (inférieures à 10^{-35} mètre), les incertitudes dues à la théorie quantique perturbent vraisemblablement la structure de l'espace-temps. Si un électron est réellement une singularité de l'espace-temps avec une masse (une particule infiniment petite), cette singularité devrait disparaître à cette échelle. À quoi ressemble alors un électron? On l'ignore.

Selon certains théoriciens, les leptons et les quarks sont des manifestations de minuscules objets unidimensionnels, les «supercordes». Sortes de petites structures en forme de fils, les supercordes seraient moins singulières qu'un point. Or, la formulation de la gravitation quantique semble moins ardue dans le cadre d'une théorie des supercordes. On devrait alors supposer que l'espace-temps décrit à l'aide de quatre dimensions (trois d'espace et une de temps) acquiert dix dimensions supplémentaires. Cela semble *a priori* contredire

nos observations, mais seules quatre des dix dimensions auraient des effets macroscopiques ; les autres ne seraient perceptibles qu'à petite distance, et y rendraient la gravitation plus intense. Prenons une image : si nous enroulons une feuille de papier sous forme de cylindre, elle ressemble, vue de loin, à une droite à une dimension. La deuxième dimension, celle qui permet de tourner autour du cylindre, n'est perçue qu'à courte distance. Ainsi en va-t-il des dimensions cachées de l'Univers : elle sont peut-être là, mais si petites que nous ne les voyons pas.

Si notre espace possède effectivement d'autres dimensions à petite échelle, elles pourraient être mises en relation avec certains phénomènes observés par les physiciens des particules. Ainsi, on ignore encore pourquoi la nature semble apprécier le chiffre trois : il y a trois dimensions d'espaces, mais aussi trois familles de leptons, trois familles de quarks, ces derniers ont trois couleurs... Le rôle particulier du chiffre 3 découle peut-être des dimensions cachées et leur nombre. En d'autres termes, peut-être existe-t-il une explication géométrique de ces structures fondamentales du modèle standard. Peut-être réaliserons-nous que les leptons et les quarks ne sont pas ponctuels ; peut-être comprendrons-nous aussi pourquoi leurs masses ont certaines valeurs? Pour le moment, le mystère demeure, mais Bertolt Brecht n'a-t-il pas écrit, en 1921, dans son Journal : «Là où il n'y a pas de mystère, il n'y a pas de vérité»?

Harald FRITZSCH est professeur de physique théorique à l'Université de Munich.

Harald FRITZSCH et Zhi-zhong XING, *Neutrino Mixing and Maximal CP Violation*, Acta Phys. Polon. B31:1349-1364, 2000.

Harald FRITZSCH et Zhi-zhong XING, *Mass and Flavor Mixing Schemes of Quarks and Leptons*, in Prog. Part. Nucl. Phys., 45:1-81, 2000.

Harald FRITZSCH, *An Equation that Changed the World : Newton, Einstein, and the Theory of Relativity*, University of Chicago Press, 1994.

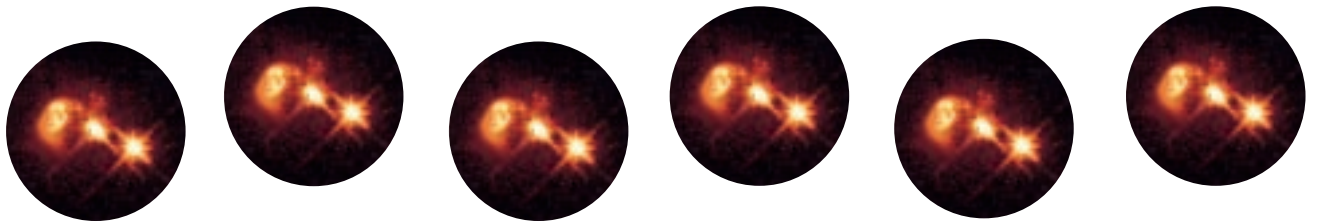
Harald FRITZSCH, *Quarks. Urstoff unserer Welt*, Piper, 1992.

Harald FRITZSCH, *Vom Urknall zum Zerfall. Die Welt zwischen Anfang und Ende*, Piper, 1999.

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

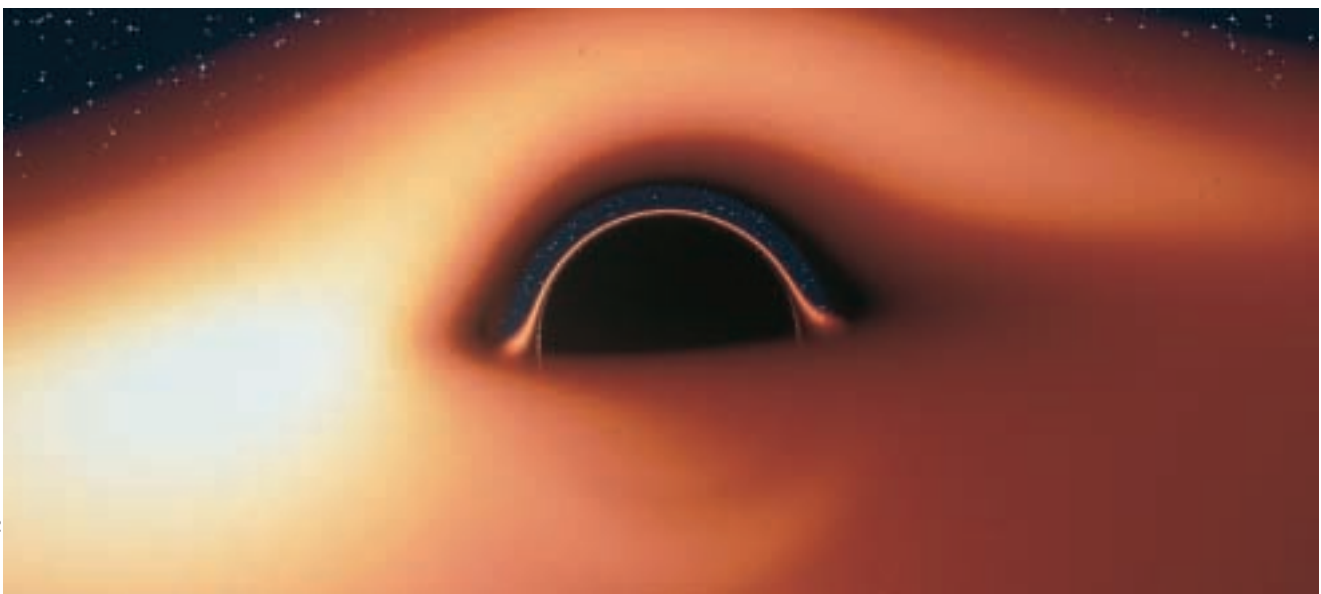
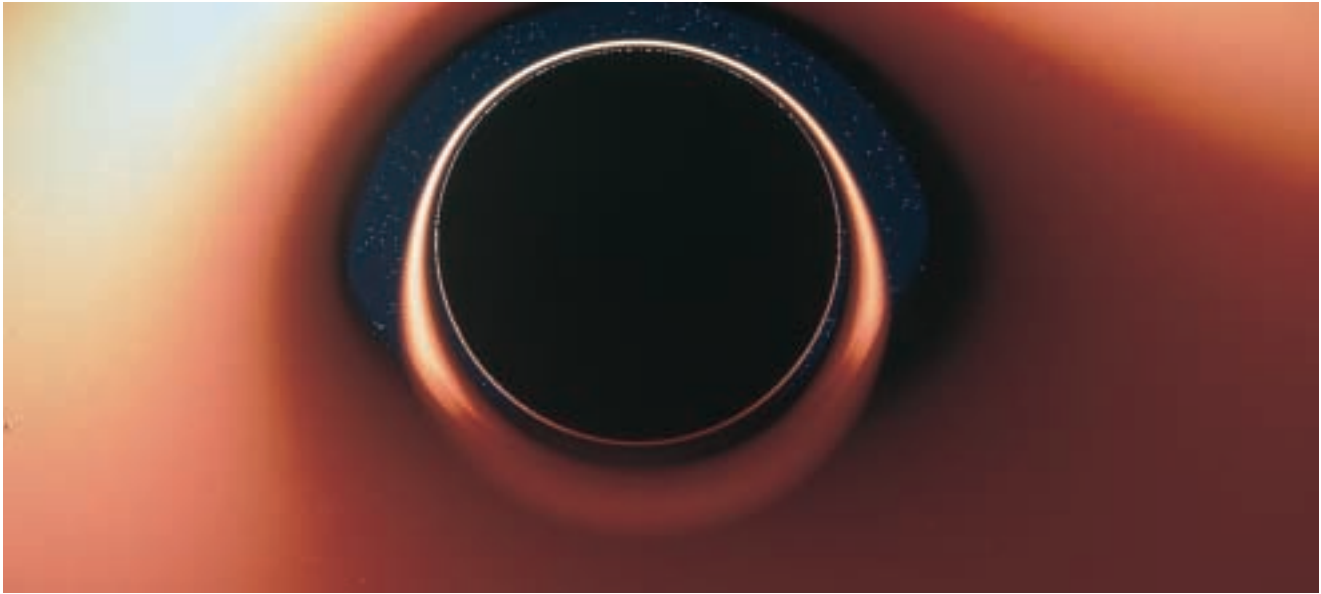
Les solutions des équations compliquées de la relativité générale présentent des singularités, dont on a longtemps pensé qu'elles étaient des conséquences des hypothèses de symétrie, introduites dans les calculs pour en faciliter la résolution. Les physiciens espéraient qu'elles disparaîtraient si l'on 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

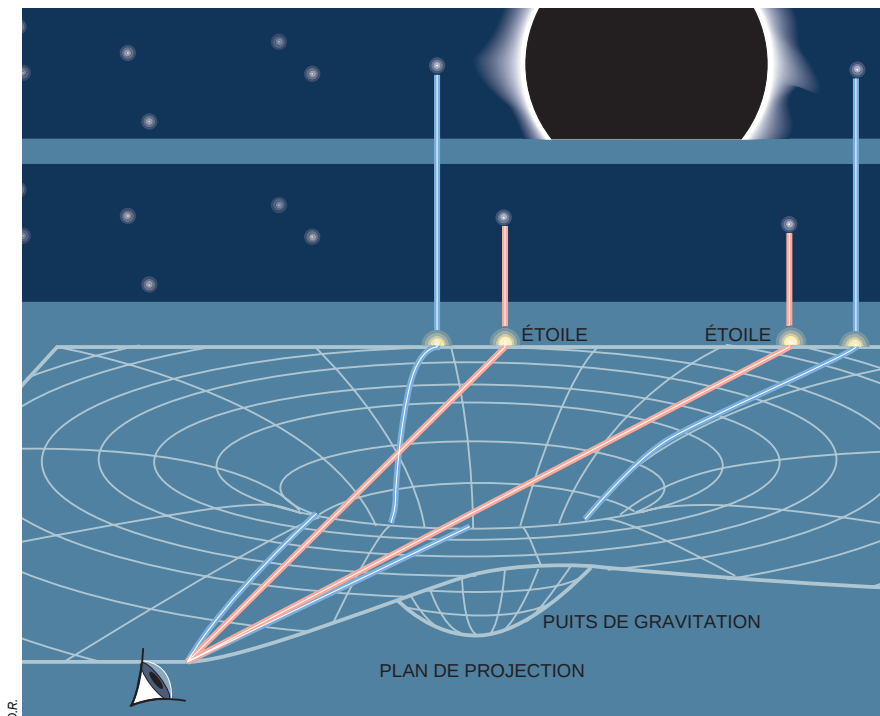
Stephen Hawking montrèrent que des singularités de l'espace-temps apparaissent aussi dans le cas général, non symétrique, et qu'elles sont, en général, stables vis-à-vis de petites perturbations. En d'autres termes, ces physiciens découvraient que les singularités sont des cas limites incontournables 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.

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!

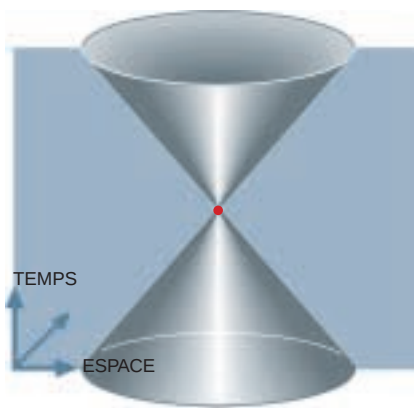
Il en va tout autrement pour une étoile à neutrons, dont la masse se compare à celle du Soleil. Son rayon égal à une dizaine de kilomètres seulement n'est que trois fois supérieur à la valeur de son rayon de Schwarzschild. C'est pourquoi la relativité générale est essentielle dans la description de la 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.

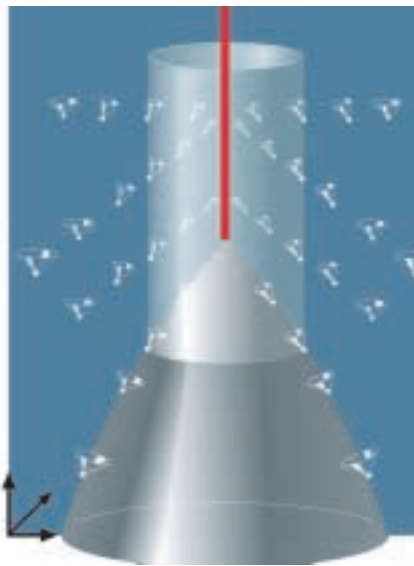
La solution de Schwarzschild ne dépend que de la masse du trou noir considéré. Elle n'est pas valable lorsque l'objet effondré tourne sur lui-même. Or, la plupart des étoiles tournent sur elles-mêmes, phénomène qui ne disparaît pas lors de l'effondrement. Dans ce cas de figure, les configurations possibles 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.

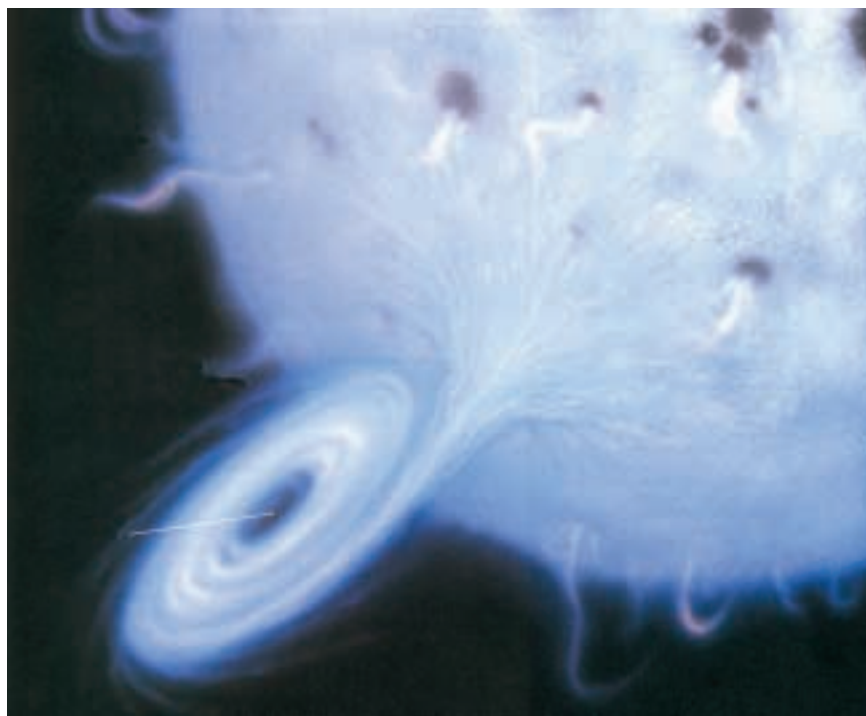
Quand une étoile s'effondre pour donner un trou noir, c'est-à-dire une

singularité, ni la physique classique ni la relativité générale ne suffisent à la décrire. Il faudrait faire appel à une théorie plus générale englobant la physique quantique et la relativité générale. Cet édifice théorique unifié porte déjà un nom, la «gravitation quantique». Toutefois, malgré l'activité intense des théoriciens, elle reste à construire!

Pour certains théoriciens, la gravitation quantique naîtra de la «théorie des cordes». Les briques élémentaires de cette théorie sont des «cordes» ou des membranes aux dimensions subatomiques dont les vibrations auraient engendré le monde à partir du vide quantique. Les vibrations de ces cordes ne se conçoivent que dans des espaces à plus de dix dimensions, dont six se trouveraient confinées, enroulées dans d'infimes domaines. Si une corde s'approchait d'une singularité – lors d'un effondrement gravitationnel, par exemple – les dimensions enroulées réapparaîtraient, et se déploieraient à l'endroit de la singularité.

Trous noirs, pas si noirs

Plutôt que d'attendre l'avènement d'une théorie unifiée, certains physiciens ont une démarche plus modeste. Ils cherchent les relations entre gravitation et comportement quantique, en adoptant un point de vue pratique : ils étudient les champs quantiques dans le cadre d'un espace-temps fixé *a priori*. En 1974, Stephen Hawking fit de cette façon une découverte théorique étonnante : les trous noirs ne seraient pas si noirs que cela! Ils émettent un rayonnement, comme si une température bien définie régnait au rayon de Schwarzschild. S. Hawking étudiait le comportement du vide dans l'espace-temps d'un trou noir, c'est-à-dire les manifestations quantiques d'un état exempt de matière, quand il fit sa découverte. Dans ce vide naissent et disparaissent perpétuellement des paires de particules et d'antiparticules virtuelles. Près de l'horizon, il arrive parfois qu'une antiparticule ou qu'une particule tombe dans le trou noir, disparaissant ainsi sans retour. Puisqu'elle n'a plus de partenaire avec qui s'annihiler, la particule appariée acquiert alors une existence réelle. Il arrive qu'elle puisse s'éloigner du trou noir. Pour un observateur extérieur, le flux des particules qui s'échappent ainsi équivaut à un rayonnement thermique.



6. À LA FIN DE LEUR EXISTENCE, certaines étoiles peuvent donner naissance à des trous noirs. Si ces objets compacts font partie d'un système double, leur attraction gravitationnelle immense leur permet d'arracher du gaz à la surface de leur compagnon. Le gaz s'accumule en tournoyant dans un disque d'accrétion avant de disparaître finalement dans le trou noir.

Selon S. Hawking, le rayonnement extirpe lentement de l'énergie, donc de la masse, au trou noir, lequel s'ameuise. Toutefois, le temps nécessaire pour annihiler ainsi un trou noir de la masse du Soleil dépasserait l'âge de l'Univers de plusieurs ordres de grandeur. Que resterait-il au final? Du rayonnement ou une sorte de cicatrice dans la structure de l'espace-temps? Ces questions restent ouvertes, car nous ignorons comment l'énergie émise rétroagit sur le trou noir.

Notre conception moderne du cosmos repose fondamentalement sur deux observations importantes : l'astronome américain Edwin Hubble découvrit, à la fin des années 1920, que la distance entre la Voie lactée et pratiquement toutes les galaxies augmente, et ce d'autant plus vite que ces galaxies sont éloignées. Ses deux compatriotes Arno Penzias et Robert Wilson détectèrent en 1964 un rayonnement cosmique dans le domaine spectral des micro-ondes, qui correspond à une température de 2,7 kelvins.

Un observateur situé n'importe où dans l'Univers observerait que les galaxies s'éloignent les unes des autres. Il ne s'agit pas là de simples mouvements d'éloignement dans un espace statique, mais plutôt d'une expansion de l'espace-temps, lequel entraîne la

matière avec lui. Si l'on remonte le temps par le calcul pour retracer l'expansion de l'Univers, on constate qu'il y a 15 milliards d'années toute la matière était extrêmement concentrée et dense. L'Univers a traversé dans ses tout premiers instants une phase durant laquelle toute la matière qui nous entoure aujourd'hui sous forme d'étoiles et de galaxies était dissoute dans un mélange chaud, dense et quasi uniforme de rayonnement et de matière. Le rayonnement cosmique omniprésent existe depuis le moment, où lumière et matière se sont découplées, quelque 300 000 ans après le Big Bang. Au fur et à mesure de l'expansion ultérieure, il s'est refroidi pour atteindre, aujourd'hui, la valeur de 2,7 kelvins.

Modèles de Big Bang

L'Univers en expansion est bien décrit par des modèles simples : des solutions particulières des équations de la gravitation d'Einstein. Il existe, en fait, toute une série de modèles compatibles avec les données astronomiques observées. Les astrophysiciens résument cette famille de théories par l'expression «modèle de Big Bang standard». Ce modèle standard est caractérisé par plusieurs propriétés qui sont communes à toutes les théories déjà évoquées. Après une phase d'expansion violente,

comparable à une explosion, l'Univers s'est développé jusqu'à son état actuel en passant par un stade précoce, dense et chaud. Les galaxies et les amas de galaxies sont nés de fluctuations initialement infimes de la densité de la matière, sous l'action de la gravitation. Les germes de ces fluctuations ont laissé leur empreinte dans les irrégularités du bruit de fond cosmologique diffus.

Des mesures récentes sur les supernovae des galaxies distantes nous ont fourni une information supplémentaire : l'expansion de l'Univers s'accélère. Le phénomène résulterait d'une répulsion cosmique due à une mystérieuse densité d'énergie de l'espace vide. Cette dernière intervient sous la forme de la « constante cosmologique », laquelle joue un rôle dans les équations de la relativité générale. Cette densité d'énergie confère son caractère irréversible à l'expansion de l'Univers, laquelle se poursuivra à jamais.

Tandis que nos concepts et nos lois physiques restent impuissants à

décrire le Big Bang lui-même, ils deviennent applicables dès la première seconde de l'Univers, quand le modèle standard décrit l'évolution de l'Univers.

La hiérarchie des interactions

Que s'est-il passé avant que le modèle standard s'applique ? À des températures et à des densités aussi élevées, les différences entre les forces fondamentales connues s'évanouissent. Ces forces se fondent alors en une seule et même force originelle. Ainsi, au cœur des stades primordiaux du développement du cosmos, il y a eu une transition brusque entre une « époque de haute symétrie » et les ères ultérieures de moindre symétrie. Tandis que, pendant la première époque, tout était gouverné par une unique force originelle, les ères suivantes furent marquées par la naissance de la hiérarchie des interactions gravitationnelles et électromagnétiques

(faible et forte). L'énergie qui fut disponible lors de cette transition détermine l'expansion de l'Univers aujourd'hui. Pendant de brefs instants, cette transition eut la violence d'une explosion, caractérisée par une accélération exponentielle. Puis l'énergie du vide fut transférée au rayonnement, et l'évolution prévue dans le cadre du modèle standard prit la relève.

Le modèle de l'origine de l'Univers que nous venons d'ébaucher se nomme « modèle d'inflation ». Il justifie plusieurs aspects du modèle standard que, sinon, il aurait fallu accepter sans démonstration. Le premier est l'âge de l'Univers : 15 milliards d'années. Autre aspect : le modèle d'inflation implique une évolution vers un espace physique plan à trois dimensions en expansion perpétuelle, mais ralentie ; pour les cosmologistes, un tel univers est proche de celui que nous observons. L'inflation aurait donc gonflé l'Univers, tel un ballon, si rapidement qu'il serait devenu quasi plat. La partie du cosmos acces-

L'infiniment grand : une réflexion critique

Le modèle cosmologique standard, modèle d'évolution de l'Univers le plus communément diffusé auprès du public par la communauté scientifique, et décrit par Gerhard Börner, a plusieurs lacunes. Il est tout d'abord bâti sur une solution particulière des équations de la relativité générale, que l'on obtient en supposant que la matière est uniformément répartie dans l'Univers. Or, cette hypothèse, outre le fait qu'elle présente des faiblesses théoriques, n'a jamais été vérifiée par l'observation. De plus, les singularités qu'elle prévoit – Big Bang, éventuellement Big Crunch – procèdent d'extensions abusives de la relativité générale à des échelles auxquelles les physiciens savent que cette théorie est difficilement applicable. Que pouvons nous, toutefois, retenir de ce modèle standard ?

L'expansion de l'Univers est l'explication la plus convaincante du décalage vers le rouge du spectre électromagnétique des objets cosmiques lointains. De plus, cette hypothèse est compatible avec l'existence du rayonnement cosmologique, détecté pour la première fois en 1964, et mesuré depuis par plus d'une trentaine d'expériences.

L'hypothèse que l'Univers soit actuellement dans une phase d'expansion accélérée est une interprétation de données récentes (1998-1999) publiées à partir de l'observation de moins d'une centaine de supernovae éloignées. Elle est à envisager avec prudence car d'autres interprétations sont tout aussi plausibles.

L'inflation, si souvent invoquée depuis 20 ans, tente de résoudre certains problèmes du modèle standard, à l'aide d'un scénario décrivant les « premiers instants » de

l'Univers. Cette hypothèse engendre toutefois des problèmes nouveaux, qui ne sont toujours pas résolus. Pour tenter de pallier ces inconvénients, certains cosmologistes, sous l'impulsion du Russe Andreï Linde, ont multiplié les modèles d'inflation, de manière... inflationniste, compliquant encore la situation.

Quant au « pré-Big Bang » si Big Bang il y a eu, aucun moyen n'existe actuellement pour l'appréhender.

Que dire enfin des trous noirs ? Les plus « classiques », c'est-à-dire ceux qui seraient issus de l'effondrement gravitationnel d'étoiles très massives, se formeraient au sein de systèmes, d'une taille comparable à celle du Système solaire, où l'on sait que la relativité générale s'applique. Toute la dynamique de leur formation est parfaitement décrite par cette théorie et par ce que les astrophysiciens savent de l'évolution stellaire. De plus, les observations dans le domaine des rayons X de candidats trous noirs indiquent un comportement qui semble plutôt conforme aux prédictions théoriques. L'hypothèse que de très grosses étoiles se transforment en fin de vie en trous noirs est donc un scénario plausible. Ce dernier n'évite pas les singularités – points de l'espace-temps où certaines grandeurs, *a priori* observables, deviennent infinies. Or, une théorie qui produit des infinis a toujours été considérée comme suspecte par les physiciens. La science est en marche et les singularités seront peut-être maîtrisées un jour.

Marie-Noëlle CÉLÉRIER
Département d'astrophysique relativiste
de l'Observatoire de Paris-Meudon

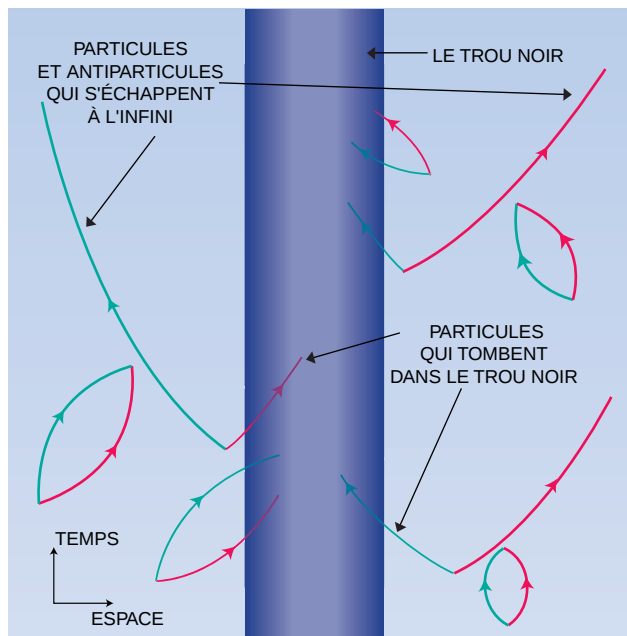
sible aujourd'hui à nos observations serait née d'un germe minuscule, dans lequel les liens entre événements étaient déterminés par les règles de la relativité (causalité).

Quelle taille devrait avoir eu ce domaine originel pour avoir englobé l'ensemble de l'Univers que l'on observe aujourd'hui? Grâce au modèle standard, on déduit de l'état actuel du Cosmos – c'est-à-dire de sa température (2,7 kelvins) et sa taille (égale à la distance des objets les plus éloignés connus) – ses caractéristiques à la fin de l'ère d'inflation : il mesurait alors quelque dix centimètres. Comme l'inflation a multiplié toutes les longueurs par un facteur 10^{29} , le germe de l'Univers actuel était confiné dans un domaine de l'ordre de 10^{-28} centimètre. Le physicien russe Andreï Linde a proposé des généralisations de cette image. Selon lui, le «Grand Univers» se composerait de bulles d'univers individuelles séparées les unes des autres, l'une

se formant ici, l'autre s'évanouissant ailleurs, selon des évolutions simultanées et indépendantes. Nous nous trouverions dans l'une de ces bulles, qui aurait la particularité de nous avoir fourni des conditions de vie acceptables. Curieusement, le principe anthropique suivant lequel l'Univers a été créé pour que l'homme puisse exister trouverait dans la théorie de Linde une sorte d'explication : parmi la multitude des bulles cosmiques, il s'en serait trouvé une par hasard pour réunir les conditions nécessaires à la vie.

Le début de l'Univers

Qui ne se satisfait pas de ce genre d'explication de l'origine des choses doit se pencher plus avant sur la question des conditions initiales de l'Univers et s'interroger : «Qu'y avait-il avant le Big Bang?» Les physiciens ne savent comment répondre à cette question métaphysique. La gravitation quantique le permettra-t-elle? C'est à une théorie définitive de toutes les interactions physiques qu'il faudrait se référer pour analyser la singularité initiale. Y a-t-il eu au début de l'Univers une «corde» à 10 ou 11 dimensions? Dans ses *Confessions* (livre 11) : saint Augus-



7. LE VIDE QUANTIQUE est en permanence le siège de la création de paires composées d'une particule (en vert) et d'une antiparticule (en rouge). Ces paires sont dites virtuelles parce qu'elles ne sont pas observables. À peine sont-elles créées qu'elles s'annihilent déjà. Lorsque c'est le cas à proximité d'un trou noir, il arrive que l'un de ses membres (particule ou antiparticule) y disparaisse. Ainsi libéré de sa compagne virtuelle, l'autre devient une particule réelle et échappe (parfois) à l'attraction du trou noir. Pour l'observateur extérieur, tout se passe alors comme si le trou noir émettait un rayonnement thermique, le rayonnement de Hawking.

tin répondit à la question de la naissance de l'Univers par une pirouette : «À la question : "Que faisait Dieu, avant qu'il ne crée le Monde?", certains seraient tentés de répondre : "Il préparait l'Enfer, pour les personnes qui poseraient cette question."»

Même si nous ne disposons pas encore de la théorie de la gravitation quantique, nous pouvons spéculer sur la nature de l'Univers quantique. S. Hawking s'est beaucoup intéressé à cette question. Il propose de se limiter, à des espaces-temps d'une structure très simple, lisse, de courbure régulière. Le temps n'existe pas encore dans ce cosmos quantique constitué d'une série d'espaces à quatre dimensions, c'est-à-dire des surfaces d'espaces sphériques à cinq dimensions.

Notre Univers, caractérisé par une évolution temporelle, aurait émergé à partir d'une partie finie de cet univers quantique intemporel. La question du passé de ce «petit pois originel» n'a pas de sens dans le cadre normal de l'espace et du temps ; tout comme cela n'aurait pas de sens de demander la latitude et la longitude d'un point qui ne serait pas à la surface de la Terre.

Penrose lui aussi est convaincu que

l'Univers primordial était plat et uniforme. Il s'en est persuadé en quantifiant le désordre de l'Univers, c'est-à-dire son entropie. Il prend en compte non seulement le désordre associé au rayonnement et à la matière, mais aussi les sources d'entropie plus rares, dissimulées au sein du champ de gravitation, dans les rides et dans les courbures de l'espace-temps, ainsi que dans les trous noirs. Les valeurs qu'il obtient sont gigantesques : les conditions initiales nécessaires à la naissance de notre Univers n'avaient qu'une chance parmi quelque 10 milliards à la puissance 120 de se produire. Une probabilité aussi faible a-t-elle un sens ?

Toutes ces réflexions sur les premières fractions de seconde de l'Univers relèvent du domaine de la spéculation. Les physiciens sont encore loin d'expliquer le Big Bang. Spéculer engendre un tel plaisir chez les cosmologistes pen-

chés sur ces questions qu'ils succombent parfois à la tentation de prendre leurs constructions théoriques pour la réalité. Pour reprendre les mots d'Einstein : «Ceux qui élaborent des théories dans ce domaine trouvent les fruits de leur imagination si naturels qu'ils ne les voient plus comme des édifices intellectuels, mais comme des réalités, qu'ils aimeraient voir reconnues.»

Gerhard BÖRNER est théoricien à l'Institut Max Planck d'astrophysique à Garching, près de Munich.

Jonathan HALLINELL, *La cosmologie quantique et la création de l'Univers*, Pour la Science, février 1992.

Stephen HAWKING, *Black Holes and Baby Universes and other Essays*, Bantam Books, 1993.

Wendy FREEDMAN, *L'expansion de l'Univers*, Pour la Science, janvier 1993.

Andreï LINDE, *L'univers inflatoire et autoreproducteur*, Pour la Science, janvier 1995.

Marc LACHIÈZE-RAY et Jean-Pierre LUMINET, *La topologie de l'Univers*, Pour la Science, décembre 1996.

La révolution cosmologique, Pour la Science, mars 1999.
