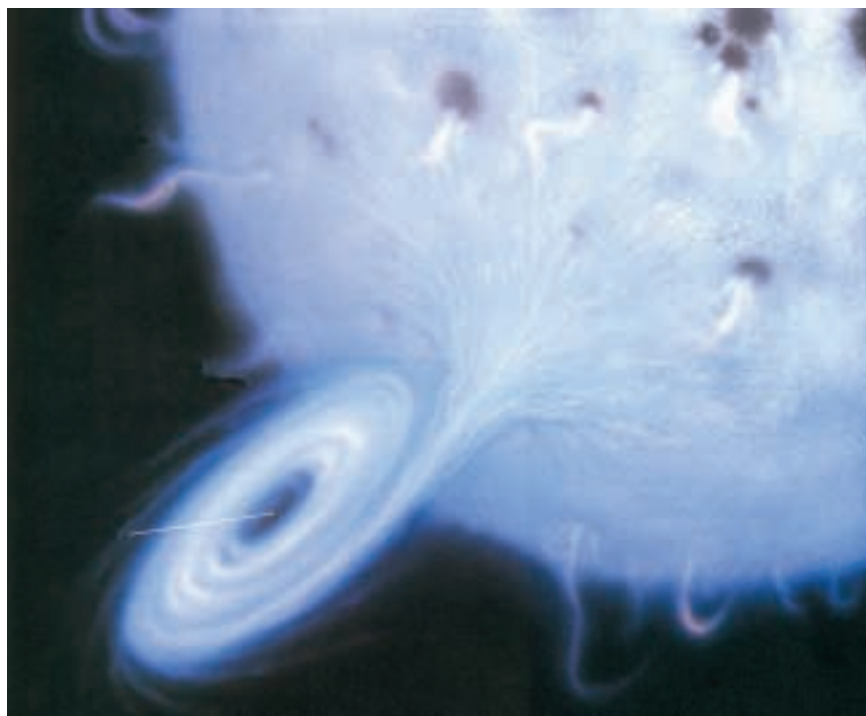


singularité, ni la physique classique ni la relativité générale ne suffisent à la décrire. Il faudrait faire appel à une théorie plus générale englobant la physique quantique et la relativité générale. Cet édifice théorique unifié porte déjà un nom, la «gravitation quantique». Toutefois, malgré l'activité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

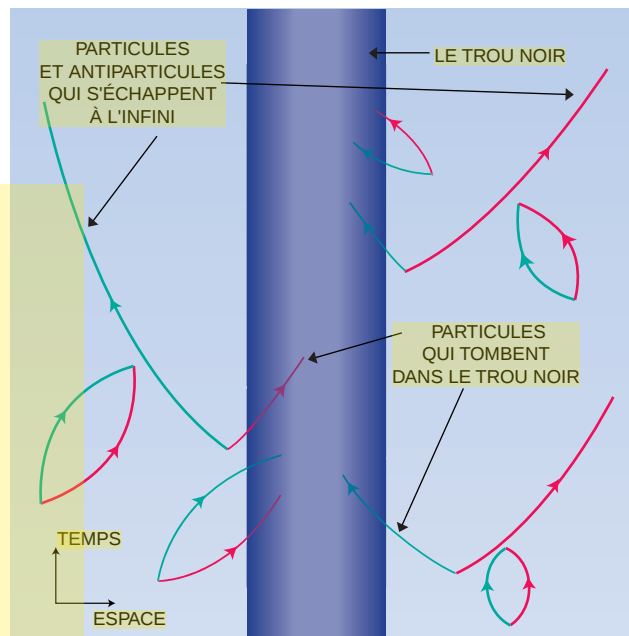
Marie-Noëlle CÉLÉRIER
Département d'astrophysique relativiste
de l'Observatoire de Paris-Meudon

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, pour le cosmos quantique primitif, 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.