

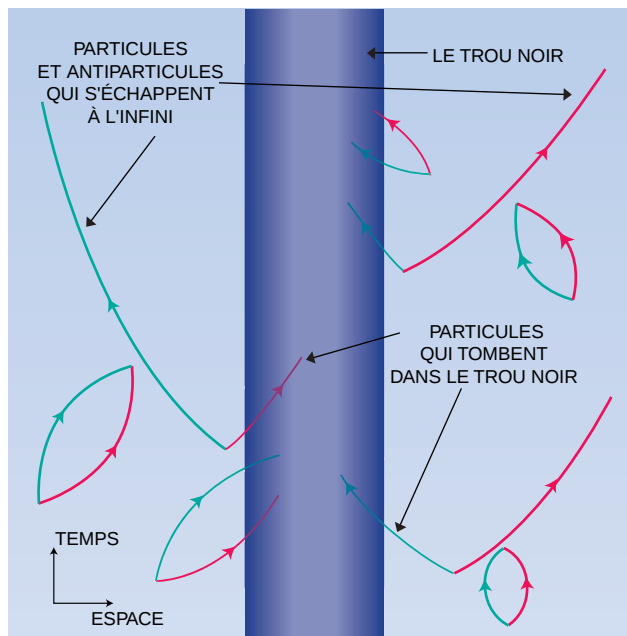
sible aujourd'hui à nos observations serait née d'un germe minuscule, dans lequel les liens entre événements étaient déterminés par les règles de la relativité (causalité).

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.

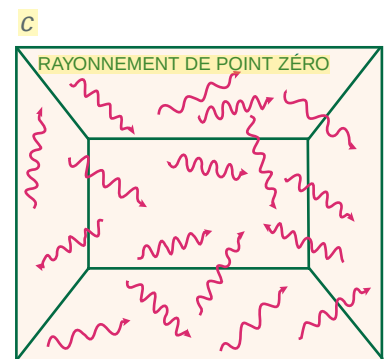
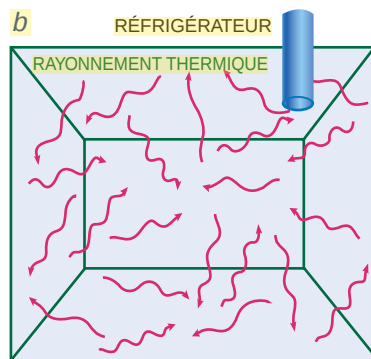
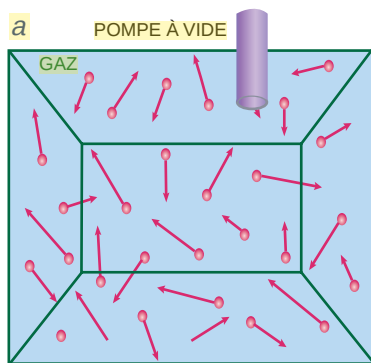
Marc LACHIÈZE-RAY et Jean-Pierre LUMINET, *La topologie de l'Univers*, Pour la Science, décembre 1996.

La révolution cosmologique, Pour la Science, mars 1999.

L'infiniment vide n'existe pas

TIMOTHY BOYER

Le vide classique n'est pas vide. Même quand on a supprimé toute la matière et le rayonnement thermique d'une partie de l'espace, le vide de la physique contient encore des champs électromagnétiques, des particules fugaces, et possède une certaine énergie.



Aristote et ses élèves croyaient qu'aucune région de l'espace ne pouvait être entièrement vide : le vide (le «rien»), leur semblait aussi hors d'atteinte que l'infini (le tout). Les physiciens du XVII^e siècle s'inscrivirent en faux contre l'affirmation aristotélicienne que «la nature a horreur du vide» et Torricelli démontra que le vide existait. Or, selon la physique moderne, l'idée d'Aristote est ressuscitée : si l'on peut, au moins en principe, retirer toute la matière ordinaire d'une partie de l'espace, le vide ainsi obtenu n'est pas synonyme de «rien».

La terminologie est alors ambiguë : si le vide n'est pas vide, mériterait-il son nom ? Les physiciens modernes définissent le vide comme ce qui reste quand on a éliminé tout ce qu'il est expérimentalement possible d'enlever d'une partie de l'espace : ainsi le vide est défini par une limite expérimentale.

Pour faire le vide, on prélève d'une enceinte toute matière visible, solide, liquide ou gazeuse (voir la figure ci-dessus). Quand on a prélevé toute la matière, l'espace n'est toujours pas vide : il contient encore un rayonnement électromagnétique. Une partie de ce rayonnement est d'origine thermique, issue du rayonnement des corps matériels, et peut donc être supprimée par refroidissement de l'enceinte contenant le vide, mais l'autre partie du rayonnement est d'origine différente. Quand bien même on réduirait (par la pensée) la température du vide jusqu'au zéro absolu, il subsisterait un ensemble fluctuant d'ondes électromagnétiques. Ce rayonnement résiduel, le rayonnement de point zéro, qu'il est impossible de supprimer, est une caractéristique du vide.

En 1644, l'ancien secrétaire de Galilée, Évangéliste Toricelli, inventa le baromètre. Cette invention allait démontrer

l'erreur de la doctrine d'Aristote, selon laquelle le vide était physiquement impossible. Toricelli avait placé du mercure dans un tube en verre fermé à une extrémité, puis il avait retourné le tube sur une cuve remplie de mercure. Le mercure était alors descendu dans le tube jusqu'à ce que sa surface libre se trouve à une hauteur de 76 centimètres au-dessus du niveau du mercure dans la cuve ; un espace sans mercure s'était constitué dans la partie supérieure du tube et cet espace était manifestement dépourvu de toute matière visible. Pour Toricelli, il ne contenait pas non plus de gaz et était donc vide. Une vive polémique s'engagea entre les partisans d'Aristote et ceux de Toricelli. Quelques années plus tard, Blaise Pascal imagina une série d'expériences qui confirmèrent toutes l'hypothèse de Toricelli.

Durant les décennies suivantes, de nombreux physiciens s'intéressèrent aux expériences sur le vide. La plus connue,