

suivante: les deux visions peuvent être valables, mais pas en même temps. Si vous êtes un observateur lointain, alors l'information est à l'extérieur. Vous n'avez pas besoin de décrire l'intérieur du trou noir, parce que vous ne pouvez jamais y accéder par principe; en fait, pour éviter le clonage de l'information, vous devez vous représenter l'espace-temps comme inexistant à l'intérieur. Par ailleurs, si vous êtes l'observateur qui tombe dans le trou noir, alors vous n'avez accès qu'à l'intérieur, et il contient le livre et son information.

Cette représentation n'est envisageable qu'en acceptant de ne pas tenir compte du rayonnement de Hawking émis par le trou noir; mais cette liberté vous est permise parce que vous avez vous-même traversé l'horizon des événements du trou noir et que vous êtes donc piégé dedans, coupé du rayonnement émis de l'horizon vers l'extérieur. Il n'y a pas d'incohérence entre ces deux points de vue; c'est uniquement si vous essayez de «recoller» artificiellement les deux, ce qui n'est jamais possible physiquement (car vous ne pouvez pas être à la fois l'observateur éloigné et celui qui tombe), que surgit l'incohérence apparente du clonage de l'information.

## HORIZONS COSMOLOGIQUES

Quel est le lien entre la situation du trou noir et l'univers en expansion éternelle et les multivers? Il existe dans le cas de l'univers une frontière qui présente d'importantes similarités avec l'horizon des événements du trou noir: l'horizon cosmologique, la limite de l'univers observable (la région d'espace-temps dont nous pouvons recevoir des signaux). En effet, l'espace étant en expansion exponentielle, les régions situées au-delà de l'horizon cosmologique s'éloignent plus vite que la vitesse de la lumière. Conséquence: aucun message qui émane de ces régions ne pourra jamais parvenir jusqu'à nous. Cette situation est par conséquent apparentée à celle du trou noir vu par un observateur lointain.

Ainsi, si l'on applique au multivers le raisonnement suivi pour le trou noir, la physique quantique impose que, pour un observateur situé à l'intérieur de l'horizon cosmologique, l'espace-temps à l'extérieur de l'horizon cosmologique est simplement non existant. Si nous essayons de tenir compte de cet espace-temps au-delà de la limite, nous avons des problèmes d'information comptée en trop. Dès lors, toute description de l'état quantique de l'univers ne devrait inclure que la région en deçà de l'horizon – en particulier il ne peut pas y avoir d'espace infini dans une description cohérente et unique du cosmos.

Mais, dans ce cas, où sont les multivers et les univers-bulles s'ils ne sont pas dans un espace infini? La réponse réside dans la façon dont les univers-bulles sont créés. Un univers-bulle se

forme là où l'inflation s'arrête de façon aléatoire. Le processus est donc probabiliste, comme n'importe quel autre processus en physique quantique. De la même façon qu'une mesure quantique engendre divers résultats avec leurs probabilités de survenue, l'inflation produit de nombreux univers différents, avec chacun une certaine probabilité de voir le jour. En d'autres termes, l'état quantique représentant un espace en perpétuelle expansion est une superposition

# Au-delà de l'horizon cosmologique, les régions s'éloignent plus vite que la vitesse de la lumière

de mondes correspondant à des univers différents. On commence à entrevoir le rapprochement avec l'interprétation des mondes multiples de la physique quantique.

Mais peut-on calculer des probabilités dans ce scénario? Rappelons qu'une des critiques principales vis-à-vis de l'inflation éternelle est que chaque événement se produit une infinité de fois et que cette description n'a aucune efficacité prédictive. Avec notre nouvelle façon d'interpréter le multivers, le problème de la prédictivité trouve une solution. Les univers-bulles ont une taille finie, limités par l'horizon cosmologique. Ils évitent l'écueil de l'espace infini qui contient l'infinité de toutes les réalisations possibles. En outre, ils n'existent pas tous simultanément dans l'espace réel, ils ne font que cohabiter dans «l'espace des probabilités», c'est-à-dire en tant que résultats possibles d'observations faites par des personnes vivant à l'intérieur d'un des mondes. Ainsi, chaque univers conserve une probabilité spécifique d'advenir.

Cette représentation unifierait le multivers issu de l'inflation éternelle de la cosmologie et les mondes multiples d'Everett. L'histoire cosmique se déroule alors comme suit: le multivers démarre d'un certain état initial et évolue en une superposition de nombreux univers-bulles. À mesure que le temps passe, les états représentant chacune de ces bulles se ramifient en un nombre croissant de superpositions d'états représentant les divers résultats possibles d'observations effectuées au sein de ces univers. Finalement, l'état représentant le multivers

> entier comportera donc un nombre énorme de branches, correspondant chacune à un monde possible pouvant découler de l'état initial. Les probabilités quantiques déterminent donc des résultats en cosmologie aussi bien que dans les processus microscopiques. Le multivers et les mondes multiples quantiques sont en réalité une seule et même chose; ils correspondent simplement au même phénomène (la superposition d'états) qui se produit à des échelles complètement différentes.

Dans ce nouveau cadre, notre monde n'est qu'un seul parmi tous les mondes qu'autorisent les principes fondamentaux de la physique quantique et qui existent simultanément dans l'espace des probabilités.

Afin de savoir si cette idée est correcte, nous aimerions la tester expérimentalement. Mais est-ce réalisable? Peut-être en mesurant la courbure spatiale de notre univers. En 2005, Leonard Susskind et ses collègues ont montré que le multivers engendre une petite quantité de courbure négative dans notre univers. En d'autres termes, à grande échelle, la géométrie serait comparable en trois dimensions à la surface d'une selle de cheval. Il pourrait en effet exister une telle courbure parce que, même si les univers-bulles sont finis vus dans la perspective du multivers entier, les observateurs à l'intérieur d'une bulle, qui voient leur univers comme étant infiniment grand, le percevraient doté d'une courbure négative.

## UN TEST: LA COURBURE DE L'UNIVERS

Les indications dont nous disposons à l'heure actuelle suggèrent un cosmos plat. Mais, dans les prochaines décennies, de futures observations du fond diffus cosmologique, le rayonnement émis par l'Univers vers 380 000 ans d'âge, permettront de mesurer avec une précision accrue la courbure.

Si ces expériences détectent une courbure légèrement négative, elles étayeront le concept de multivers parce que, bien qu'une telle courbure soit techniquement possible dans un univers unique, elle y est peu plausible. Et une éventuelle découverte de courbure négative renforcerait particulièrement l'idée de multivers quantique décrite ici, parce que ce scénario conduit naturellement à une courbure assez grande pour être détectée, alors que le tableau inflationnaire classique du multivers tend à produire une courbure négative inférieure de plusieurs ordres de grandeur à tout ce que nous pouvons espérer mesurer. Chose intéressante, la découverte d'une courbure positive réfuterait complètement la notion de multivers, parce que la théorie de l'inflation implique que les univers-bulles ne peuvent produire une telle courbure.

Par ailleurs, si nous avons de la chance, nous pourrions même voir dans le fond diffus

cosmologique des signes spectaculaires du multivers, sous la forme de vestiges d'une « collision » de notre univers-bulle avec un autre. Mais les chercheurs sont peu optimistes que nous détecterons un jour de tels signaux.

Avec d'autres physiciens, je travaille aussi à développer l'idée de multivers quantique au niveau théorique. Nous pouvons poser des questions fondamentales telles que

# Dans ce cadre théorique, le temps apparaît comme un concept émergent

« Comment peut-on déterminer l'état quantique du multivers entier? » ou « Qu'est-ce que le temps, et comment émerge-t-il? ». Le tableau du multivers quantique ne répond pas immédiatement à ces questions, mais il fournit un cadre pour les traiter.

Récemment, par exemple, j'ai montré que certaines contraintes mathématiques sur les probabilités issues de notre théorie nous permettront peut-être de déterminer l'état quantique unique du multivers entier. Ces contraintes suggèrent aussi que l'état quantique global reste constant même si un observateur physique, qui fait partie de l'état du multivers, voit de nouvelles bulles se former sans cesse. Cela implique que notre conscience d'un univers qui change au fil du temps, et en fait la notion même de temps, pourrait être une illusion. Le temps, dans cette optique, est un concept émergent, quelque chose qui surgit d'une réalité plus fondamentale et qui semble n'exister que dans les branches locales du multivers.

Beaucoup des idées que je viens de présenter sont encore très spéculatives, mais il est passionnant que les physiciens soient en mesure de réfléchir à ces grandes et profondes questions sur la base des avancées théoriques actuelles. Où ces explorations nous mèneront-elles? Il semble clair en tout cas que nous vivons une ère exaltante dans laquelle nos explorations scientifiques vont au-delà de ce que nous pensions être le monde physique entier – notre univers – pour atteindre un domaine potentiellement sans limites au-delà. ■

## BIBLIOGRAPHIE

A. Guth et Y. Nomura, **What can the observation of a nonzero curvature tell us?**, *Phys. Rev. D*, vol. 86, 023534, 2012.

R. Bousso et L. Susskind, **Multiverse interpretation of quantum mechanics**, *Phys. Rev. D*, vol. 85, 045007, 2012.

Y. Nomura, **Physical theories, eternal inflation, and the quantum universe**, *Journal of High Energy Physics*, vol. 2011, n° 11, article 063, 2011.