

LA CHRONIQUE DE
GÉRALD BRONNER

ASTROLOGIE AUTORÉALISATRICE

Il faut se méfier des récits qui, à l'instar de ceux de l'astrologie, assignent un destin à l'individu. Y croire peut conduire à la réalisation de ce destin.



Un horoscope peut influencer sur le cours de la vie de l'individu qui y accorde foi.

L'idée que nous nous faisons de nous-mêmes ou que les autres se font de nous n'est pas sans impact sur ce que nous devenons. De nombreux récits, dont on peut dire pour cette raison qu'ils sont déterministes, nous assignent un destin. C'est ce que fait l'astrologie lorsqu'elle prétend décrire les traits de notre personnalité en fonction de la configuration stellaire au moment de notre naissance.

Il se trouve que l'on peut parfaitement tester ces prédictions astropsychologiques, et c'est ce qu'ont fait en 1978, par une collaboration inaccoutumée, un psychologue de renom et un astrologue. Le premier, Hans Eysenk (le psychologue le plus fréquemment cité dans les revues scientifiques à la fin des années 1990) a notamment mis au point une série de tests qui permettent d'établir des typologies psychologiques impliquant la tendance à l'extraversion ou au névrotisme, par exemple. Le second, Jeff Mayo, était un astrologue fameux en Grande-Bretagne. Fondateur d'une  cole qui rencontra un certain succès, il accepta de

faire passer à 2000 de ses clients et étudiants des tests psychologiques inspirés de travaux d'Eysenk.

Le but de cette étude était d'établir si l'on pouvait ou non retenir l'hypothèse de la détermination astrologique de la personnalité. Les résultats d concert rent les esprits rationalistes et r jouirent beaucoup les astrologues. En effet, certains signes décrits par la tradition astrologique comme plus extravertis

L'adhésion des sujets de l'étude aux thèses astrologiques était une donnée cruciale

que d'autres, par exemple, étaient bel et bien liés statistiquement aux indices correspondants du test. Globalement, les traits psychologiques typiques que l'astrologie associait aux signes horoscopiques paraissaient être respectés. Les

défenseurs de la magie des astres firent connaître ces résultats partout où ils le purent en prétendant, un peu vite, avoir fourni la preuve de l'existence d'un déterminisme astrologique.

En réalité, leur enthousiasme les avait aveuglés sur le fait pourtant évident que les individus qui avaient passé le test connaissaient bien les théories astrologiques auxquelles, de surcroît, ils croyaient fermement. Or il s'agissait là d'une donnée cruciale. Pour le démontrer, Eysenk, d sirieux de savoir si les corrélations chères aux astrologues apparaîtraient également si les mêmes tests étaient proposés à des populations ignorant tout de la causalité astrologique ou n'y adhérant pas, a mené ultérieurement deux autres enquêtes d'envergure.

La première portait sur une population test de 1000 enfants qui ne connaissaient rien de l'astrologie. Les résultats furent bien différents : on ne nota aucune corrélation entre les signes du zodiaque et les caractéristiques psychosociales des sujets. La seconde est plus intéressante encore, puisque, réalisée avec des adultes cette fois, elle séparait nettement ceux qui connaissaient bien les récits astrologiques et ceux qui avouaient n'avoir aucune compétence en la matière : n'en d pla e aux astrologues, ces derniers adultes présentaient des niveaux d'extraversion ou de névrotisme tout à fait indépendants de leurs signes zodiacaux.

L'approche statistique a donc disqualifié les prétentions descriptives de l'astrologie en matière de psychologie humaine, mais les résultats de cette étude ont une portée plus générale. M fions-nous des récits déterministes que nous assignons aux individus, qu'ils invoquent les astres, le prénom ou même encore l'origine sociale. Pour infondés que soient les uns et fondés que soient les autres, ils peuvent produire à l'unisson des croyances que le sociologue américain Robert Merton qualifiait d'autoréalisatrices et qui ne sont pas toujours profitables aux individus qui les endossent. ■

GÉRALD BRONNER est professeur de sociologie à l'université Paris-Diderot.

Les univers multiples

Miroir du monde quantique?

Notre univers serait loin d'être unique. Tout au contraire, il existerait, d'après les théories les plus récentes de l'inflation cosmologique, une infinité d'univers formant le « multivers ». D'un autre côté, la physique quantique présente elle aussi une multiplicité de mondes... tout du moins dans l'interprétation proposée par Hugh Everett en 1957. Peut-on relier les deux théories ? Oui, avance le physicien Yasunori Nomura : malgré leurs différences apparentes, le multivers et les mondes multiples d'Everett seraient équivalents.

L'ESSENTIEL

> La théorie de l'inflation cosmique décrit la phase brutale d'expansion subie par l'Univers à ses tout débuts. Dans ce cadre, notre monde pourrait n'être qu'un élément d'un univers multiple, le multivers.

> L'idée de multivers est problématique car elle fait perdre à la théorie tout potentiel prédictif.

> L'auteur résout cette difficulté en faisant le lien entre le multivers et l'interprétation des mondes multiples en physique quantique.

> Selon cette conception, notre univers ne serait qu'un parmi de nombreux autres qui coexistent dans l'espace des probabilités plutôt que dans un unique espace réel.

L'AUTEUR



YASUNORI NOMURA
directeur du Centre
de physique théorique
de l'université de
Californie à Berkeley

Le multivers quantique

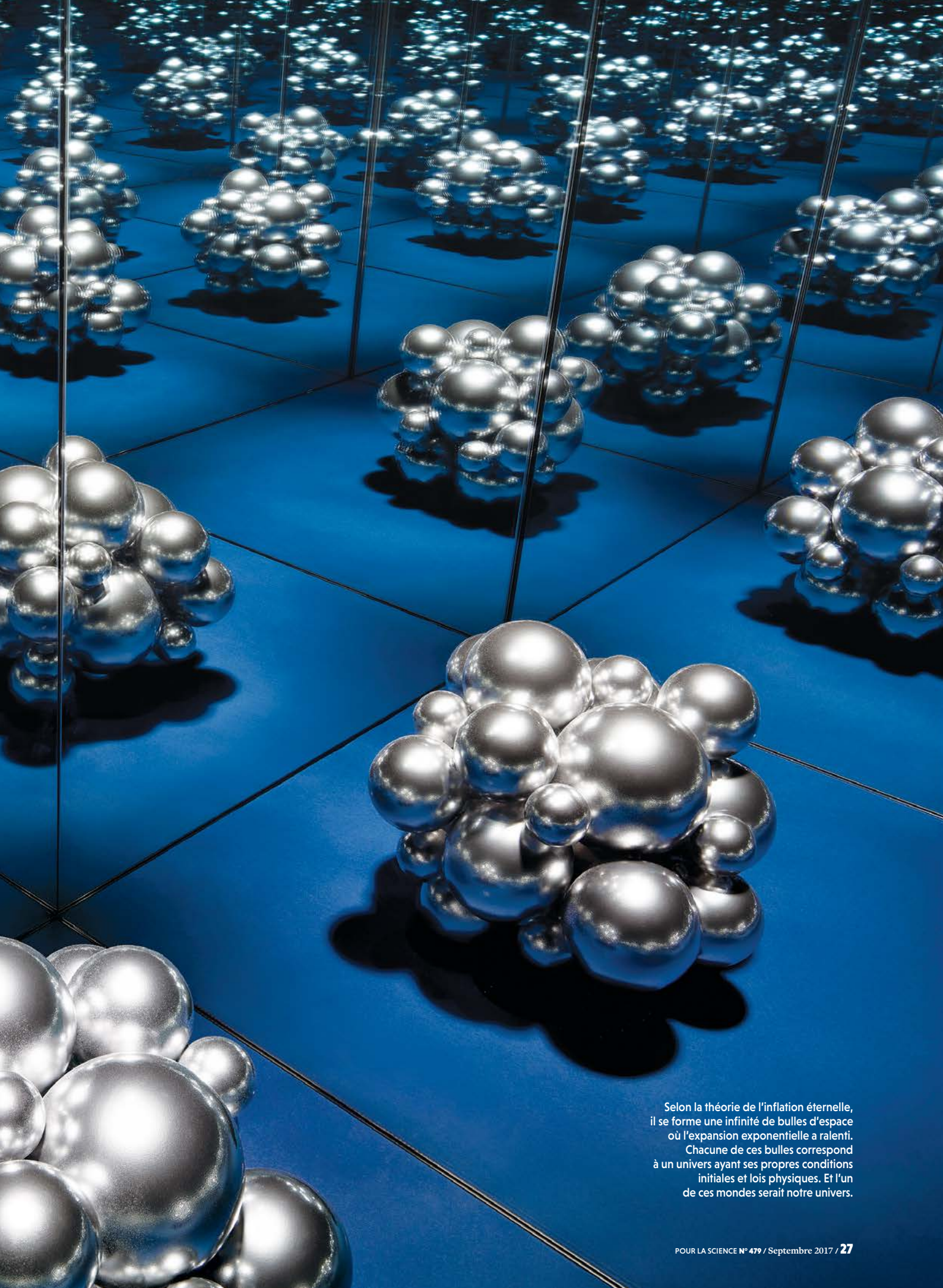
LA COSMOLOGIE LAISSE PENSER QUE NOTRE UNIVERS N'EN SERAIT QU'UN PARMIS D'INNOMBRABLES AUTRES. ET SI CETTE MULTIPLICITÉ D'UNIVERS COÏNCIDAIT AVEC L'IDÉE DES MONDES MULTIPLES AVANCÉE IL Y A SOIXANTE ANS POUR COMPRENDRE LA PHYSIQUE QUANTIQUE ?

Pour de nombreux cosmologistes, ce que nous pensons être l'Univers dans son intégralité ne serait qu'une infime partie d'un ensemble bien plus vaste : le multivers. Selon ce scénario, il existerait une multitude d'univers, dont l'un serait celui où nous vivons. Et chacun de ces mondes serait régi par des lois différentes ; ce que nous pensions être les principes fondamentaux de la nature ne serait plus si absolu. Ainsi, les types et propriétés des particules élémentaires et de leurs interactions pourraient varier d'un univers à l'autre.

L'idée du multivers émerge d'une théorie suggérant que le cosmos primordial a subi une expansion fulgurante, exponentielle. Au cours de cette période d'« inflation cosmique », certaines régions de l'espace auraient vu leur expansion rapide prendre fin plus tôt que d'autres, formant ce qu'on appelle des « univers-bulles », un peu comme des bulles dans un volume d'eau bouillante. Notre univers correspondrait à l'une de ces bulles, au-delà de laquelle il y en aurait une infinité d'autres.

L'idée que notre univers ne représente qu'une petite partie d'une structure beaucoup plus vaste n'est pas aussi bizarre qu'il y paraît. Après tout, à travers l'histoire, les scientifiques ont appris à maintes reprises que le monde ne se résume pas à ce qui en est visible. Cependant, la notion de multivers, avec son nombre illimité d'univers-bulles, présente un problème théorique majeur : elle semble supprimer la capacité de la théorie de l'inflation à faire des prédictions sur les propriétés de notre univers, une exigence centrale pour qu'une théorie soit utile. Pour reprendre les mots d'un des pères de la théorie de l'inflation, Alan Guth, du MIT (l'Institut de technologie du Massachusetts), >





Selon la théorie de l'inflation éternelle, il se forme une infinité de bulles d'espace où l'expansion exponentielle a ralenti. Chacune de ces bulles correspond à un univers ayant ses propres conditions initiales et lois physiques. Et l'un de ces mondes serait notre univers.

> « dans un univers éternellement en inflation, tout ce qui peut arriver arrive; en fait, tout arrive un nombre infini de fois ».

Dans un univers unique où les événements se produisent un nombre limité de fois, les chercheurs peuvent calculer la probabilité relative qu'un événement se produise plutôt qu'un autre en comparant les nombres de fois que ces événements se produisent. Mais dans un multivers où tout se produit un nombre infini de fois, un tel décompte est impossible et, dès lors, rien n'a plus de chances de se produire que le reste. On peut faire les prédictions que l'on veut, elles sont amenées à se réaliser dans l'un ou l'autre univers, mais cela ne nous renseigne en rien sur ce qui va se passer dans notre propre univers.

Cette absence d'efficacité prédictive dérange depuis longtemps les physiciens. Certains chercheurs, dont je fais partie, suggèrent que la théorie quantique (qui décrit le comportement des particules aux plus petites échelles) pourrait, ironiquement, indiquer la voie de la solution. Plus précisément, le scénario cosmologique d'un univers en éternelle inflation serait mathématiquement équivalent à l'interprétation des « mondes multiples » de la physique quantique. Cette idée est très spéculative, mais, comme nous le verrons, une telle connexion entre les deux théories donne des

Dans le multivers, tout ce qui peut se réaliser se réalise un nombre infini de fois

pistes pour résoudre le problème des prédictions, mais pourrait aussi révéler des informations surprenantes sur l'espace et le temps.

L'idée d'une correspondance entre les deux théories m'est venue alors que je travaillais sur les principes de l'interprétation des mondes multiples de la physique quantique. Cette interprétation a vu le jour pour expliquer certains des aspects les plus étranges et contre-intuitifs de la physique quantique: cause et effet ne s'articulent pas comme dans le monde macroscopique qui nous est familier, et le résultat de tout processus y est toujours probabiliste. Pour l'illustrer, prenons l'exemple d'un ballon qu'on lance.

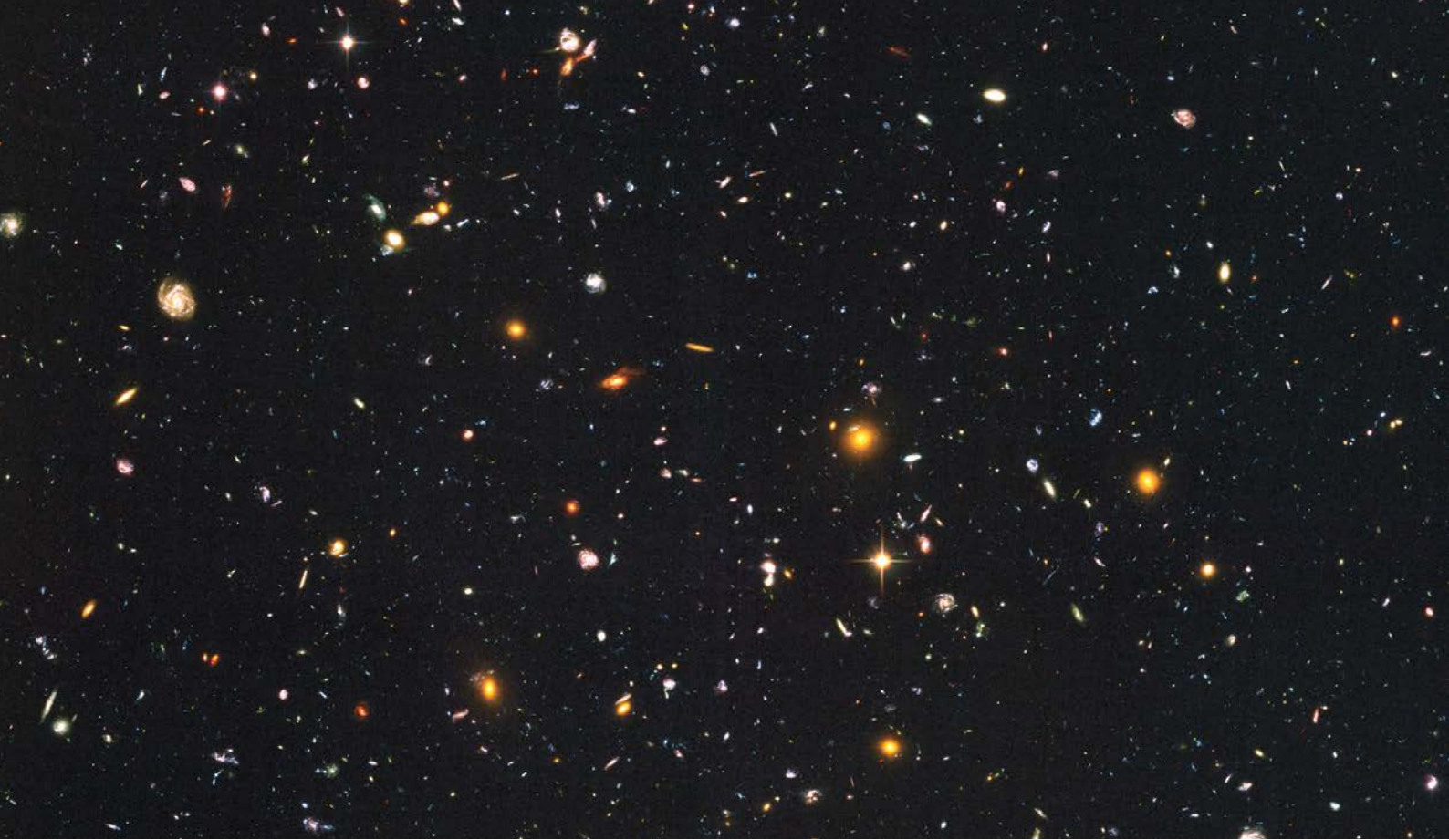
Dans notre vécu macroscopique, nous pouvons prédire où le ballon va atterrir en prenant en compte le point d'où il a été lancé, sa vitesse et d'autres paramètres. Si ce ballon était une particule quantique, tout ce que nous pourrions dire est qu'il a une certaine probabilité d'atterrir à tel endroit ou à un autre. Ce caractère probabiliste ne peut pas être éliminé par une meilleure connaissance des courants d'air ou autres facteurs liés au ballon; c'est une propriété intrinsèque de la nature. Le même ballon quantique lancé plusieurs fois exactement dans les mêmes conditions atterrira parfois au point A et parfois au point B. Cette conclusion paraît étrange, mais d'innombrables expériences ont confirmé les lois de la physique quantique, indispensables pour décrire le comportement des particules et des forces subatomiques.

LE CASSE-TÊTE DE LA MESURE QUANTIQUE

Dans le monde quantique, nous disons qu'une fois le ballon lancé, mais avant de chercher à voir son point de contact avec le sol, il est dans un état de superposition des résultats A et B, c'est-à-dire qu'il n'est ni dans l'état A ni dans l'état B, mais dans un brouillard probabiliste de A et de B à la fois. Mais une fois que nous regardons ce que devient le ballon, nous le trouvons en un point (disons A), et toute autre personne qui examine le ballon confirmera elle aussi qu'il se trouve bien en A. En d'autres termes, avant qu'un système quantique ne soit mesuré, son résultat est incertain, mais dès qu'il est mesuré, toutes les mesures ultérieures trouveront le même résultat que la première.

Dans l'interprétation habituelle, dite de Copenhague, de la physique quantique, on explique ce basculement en disant que la première mesure a fait passer le système de l'état de superposition à l'état A. Mais tout en prédisant correctement le résultat des expériences de laboratoire, l'interprétation de Copenhague mène à de sérieuses difficultés conceptuelles. Que signifie réellement la « mesure », et pourquoi fait-elle passer le système d'un état de superposition de possibilités à un état de certitude unique? Ce changement d'état se produit-il quand un chien ou une mouche observe le système? Et que se passe-t-il quand une molécule de l'air interagit avec le système, ce qui doit se produire tout le temps mais que nous ne traitons généralement pas comme une mesure susceptible d'interférer avec le résultat? Est-ce que le fait qu'un être humain apprenne consciemment l'état du système revêt une importance particulière?

En 1957, Hugh Everett, alors étudiant en thèse à l'université de Princeton, a proposé une nouvelle interprétation de la physique quantique, dite des mondes multiples. Elle traite de façon très élégante le problème, même si, à l'époque, beaucoup la tournaient en ridicule, et



l'idée a toujours à l'heure actuelle nettement moins d'adeptes que l'interprétation de Copenhague. L'intuition clé d'Everett est que l'état d'un système quantique reflète l'état de l'intégralité de l'univers qui l'entoure, de telle sorte que nous devons inclure l'observateur dans une description complète de la mesure. En d'autres termes, nous ne pouvons pas considérer le ballon, la main qui le lance et le vent séparément du reste, nous devons aussi inclure dans la description fondamentale la personne qui vient inspecter le point d'impact avec le sol, ainsi que tout le reste du cosmos à cet instant.

UN UNIVERS QUI SE DÉDOUBLE

Dans ce contexte, l'état quantique après la mesure est encore une superposition, mais pas juste la superposition de deux points d'impact : celle de deux mondes entiers ! Dans le premier monde, l'observateur trouve que le ballon est au point A, et par conséquent tout observateur situé dans ce monde-là obtiendra le résultat A lors de chaque nouvelle mesure. Mais au moment de la mesure, l'univers s'est dédoublé et dans le second univers, l'observateur trouve, mesure après mesure, que le ballon est tombé au point B. Cette propriété explique pourquoi l'observateur a l'impression que sa première mesure a modifié l'état du système ; ce qui se passe en réalité, c'est que quand il fait une mesure, il se dédouble lui-même en deux personnes différentes qui vivent dans deux univers parallèles correspondant à deux résultats distincts.

Dans l'idée d'Everett, les humains qui font les mesures n'ont pas d'importance

particulière. L'état du monde entier se ramifie continuellement en de nombreux univers parallèles qui coexistent en superposition. Un observateur humain, faisant partie de la nature, ne peut échapper à ce cycle : il ne cesse de se diviser en de nombreux observateurs qui vivent dans des mondes parallèles et qui sont tous aussi « réels » les uns que les autres. Une implication évidente mais importante de ce scénario est que tout, dans la nature, obéit aux lois de la physique quantique, les petites choses comme les grandes.

Mais quel rapport y a-t-il entre cette interprétation de la physique quantique et le multivers issu de l'inflation éternelle, qui semble exister dans un espace réel continu et non comme des réalités parallèles ? En 2011, j'ai suggéré que le multivers et les mondes quantiques multiples à la Everett sont, d'une certaine façon, un seul et même concept. Dans cette approche, l'espace infiniment grand associé à l'inflation éternelle est une sorte d'illusion : les nombreux univers-bulles de l'inflation ne cohabitent pas physiquement dans un unique espace réel, mais représentent les différentes branches sur l'arbre des probabilités des mondes multiples d'Everett.

À peu près au moment où je faisais cette proposition, Raphael Bousso, de l'université de Californie à Berkeley, et Leonard Susskind, de l'université Stanford, ont avancé une idée assez similaire. Si elle est confirmée, l'interprétation des mondes multiples appliquée au multivers signifierait que les lois de la physique quantique jouent aussi un rôle crucial dans la détermination

Cette photographie du champ ultraprofond du télescope spatial Hubble montre des galaxies jusqu'à 13 milliards d'années-lumière de nous. Du fait de l'expansion de l'Univers, des objets beaucoup plus lointains s'éloigneraient de nous à des vitesses supérieures à celle de la lumière. Aucun photon ne parviendrait jusqu'à nous depuis ces objets, inaccessibles à jamais. Cet « horizon cosmologique » a des implications importantes pour la théorie du multivers.

>

LA RENCONTRE DE L'INFLATION ET DES MONDES MULTIPLES

MULTIVERS INFLATIONNAIRE

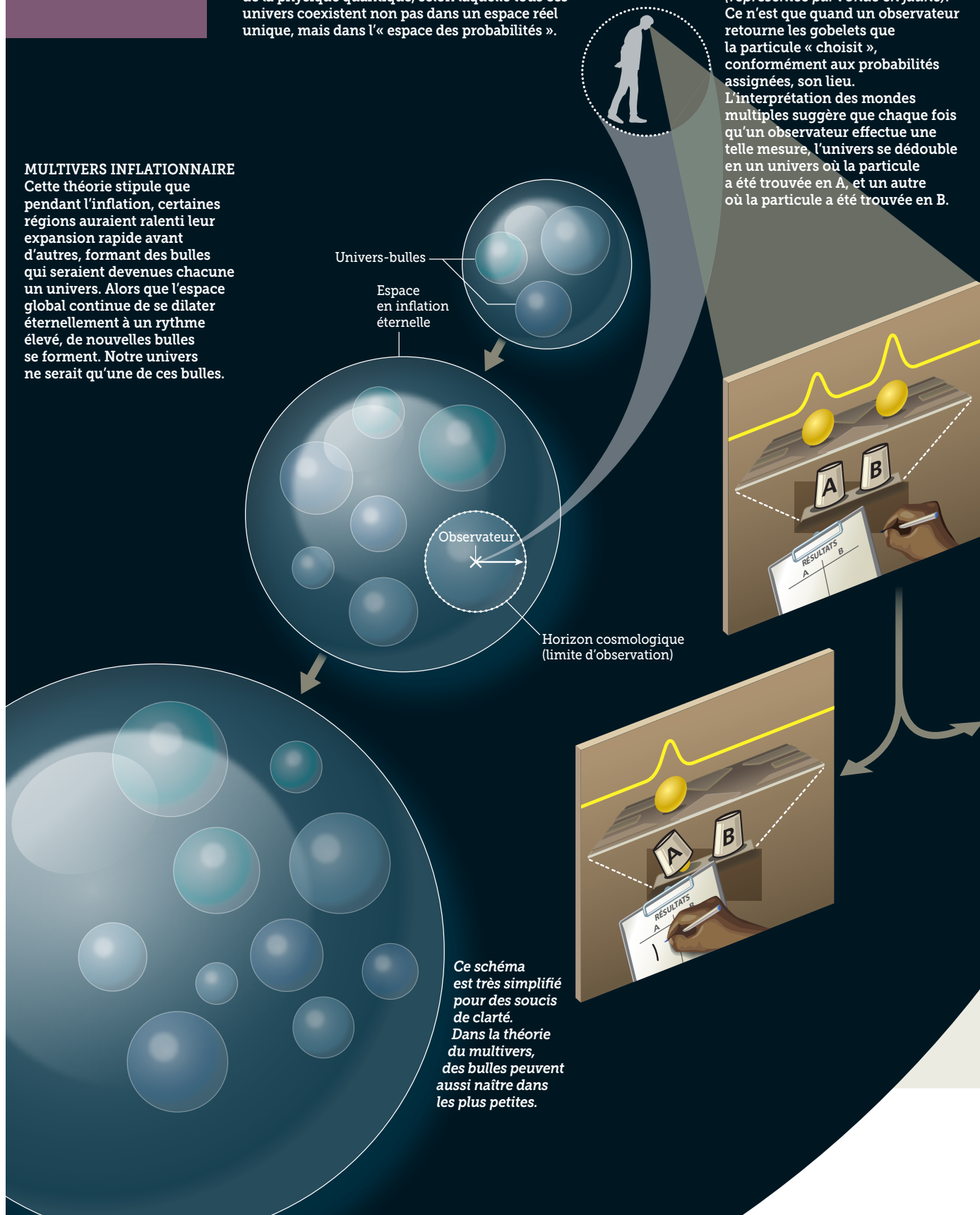
Cette théorie stipule que pendant l'inflation, certaines régions auraient ralenti leur expansion rapide avant d'autres, formant des bulles qui seraient devenues chacune un univers. Alors que l'espace global continue de se dilater éternellement à un rythme élevé, de nouvelles bulles se forment. Notre univers ne serait qu'une de ces bulles.

La théorie de l'inflation éternelle produit une infinité d'univers, dont le nôtre, où l'expansion exponentielle du cosmos a cessé. Cette théorie ne permet pas de faire des prédictions, parce que tout ce qui peut se produire dans un multivers infini s'y produit une infinité de fois. Cependant, le problème est résolu si le multivers est équivalent à l'interprétation des « mondes multiples » de la physique quantique, selon laquelle tous ces univers coexistent non pas dans un espace réel unique, mais dans l'« espace des probabilités ».

MONDES MULTIPLES

La physique quantique affirme qu'une particule, au lieu d'être cachée soit sous le gobelet A, soit sous le gobelet B, occupe les deux positions à la fois, chacune étant associée à une certaine probabilité (représentée par l'onde en jaune). Ce n'est que quand un observateur retourne les gobelets que la particule « choisit », conformément aux probabilités assignées, son lieu.

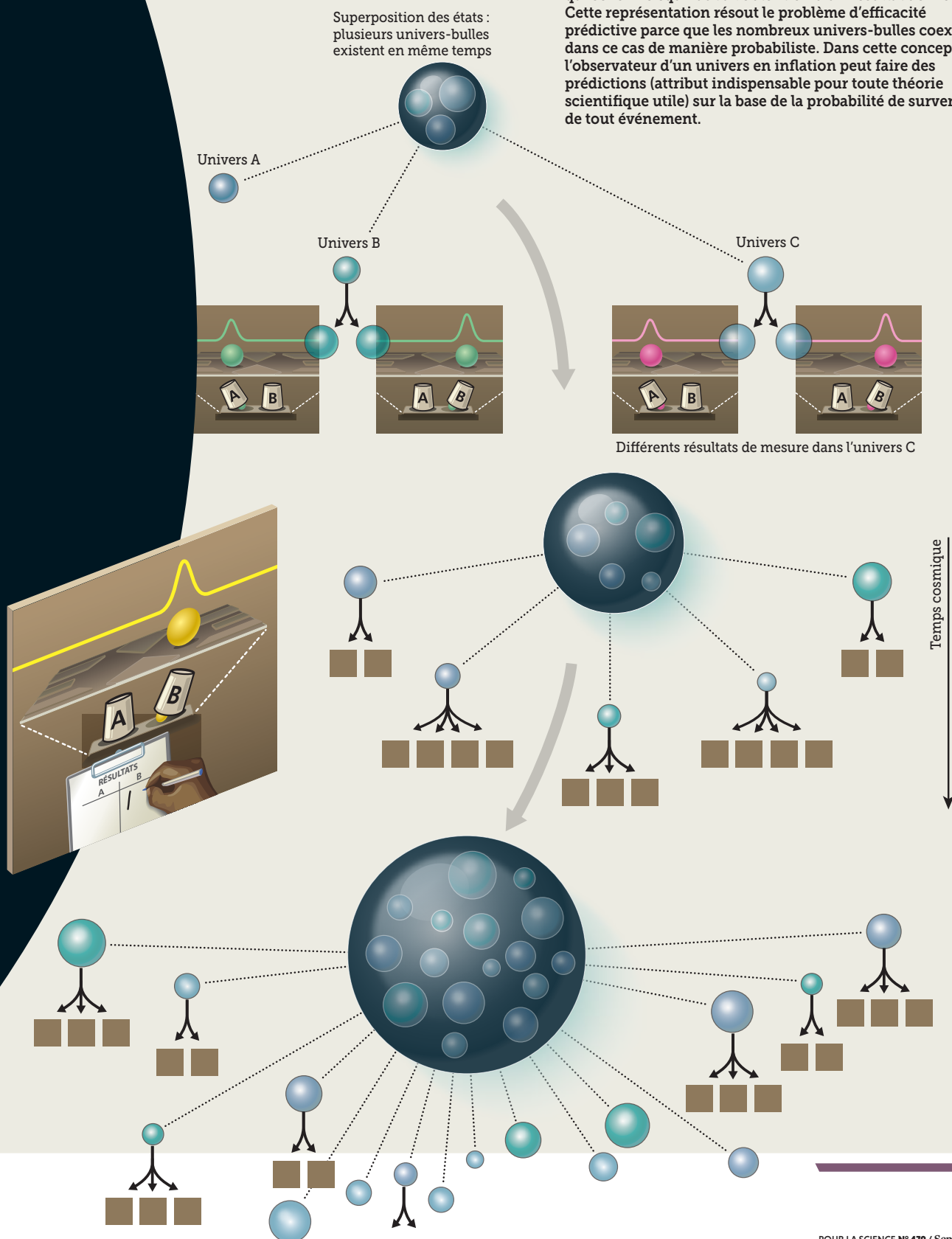
L'interprétation des mondes multiples suggère que chaque fois qu'un observateur effectue une telle mesure, l'univers se dédouble en un univers où la particule a été trouvée en A, et un autre où la particule a été trouvée en B.



Ce schéma est très simplifié pour des soucis de clarté. Dans la théorie du multivers, des bulles peuvent aussi naître dans les plus petites.

QUAND LA PHYSIQUE QUANTIQUE REJOINT LE MULTIVERS

Si le multivers inflationnaire et l'interprétation des mondes multiples de la mécanique quantique correspondent à la même chose, la formation de nouveaux univers-bulles au cours du temps (voir ci-dessous) est simplement un exemple de ramification quantique : une nouvelle bulle qui se forme équivaut à l'obtention d'un résultat de mesure. Cette représentation résout le problème d'efficacité prédictive parce que les nombreux univers-bulles coexistent dans ce cas de manière probabiliste. Dans cette conception, l'observateur d'un univers en inflation peut faire des prédictions (attribut indispensable pour toute théorie scientifique utile) sur la base de la probabilité de survenue de tout événement.



> de la structure globale du multivers, même aux plus grandes échelles de distance.

Afin de mieux expliquer comment l'interprétation des mondes multiples de la physique quantique pourrait décrire le multivers inflationnaire, je dois faire une digression et parler des trous noirs. Ces astres très compacts déforment l'espace-temps environnant de façon extrême, au point que tout objet qui y tombe ne peut s'en échapper. La frontière qui définit le point de non-retour et qui sépare l'intérieur de l'extérieur du trou noir est nommée l'horizon des événements. Les trous noirs représentent un terrain de réflexion idéal pour la physique faisant intervenir des effets quantiques et gravitationnels forts. Une expérience de pensée sur ces entités nous montre où le concept traditionnel de multivers fait fausse route et rend impossibles les prédictions.

Imaginez que nous fassions tomber un livre dans un trou noir et que nous observions de l'extérieur ce qui se passe. Alors que le livre lui-même ne pourra jamais s'échapper du trou noir, la théorie quantique impose que l'information contenue dans celui-ci ne sera pas perdue. Or un trou noir s'évapore progressivement en émettant un faible rayonnement (un phénomène connu sous le nom de rayonnement de Hawking, découvert par le physicien Stephen Hawking). Il finit donc par disparaître. Que devient l'information? Elle se cacherait dans le rayonnement de Hawking. Ainsi, un observateur extérieur devrait, en principe, être capable de reconstituer toute l'information contenue dans le livre initial en examinant attentivement le rayonnement émis.

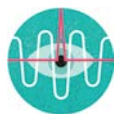
LE PARADOXE DU TROU NOIR

Il se passe quelque chose de curieux si nous imaginons la même situation du point de vue de quelqu'un qui tombe dans le trou noir en même temps que le livre. Dans ce cas, le livre semble simplement franchir la frontière du trou noir et rester à l'intérieur de ce dernier. Ainsi, pour l'observateur dans le trou noir, l'information du livre est contenue à jamais au sein du trou noir. D'un autre côté, nous venons d'expliquer que, du point de vue d'un observateur situé à l'extérieur, l'information finit par sortir de l'astre. Laquelle de ces propositions est la bonne? On pourrait penser que l'information est simplement dupliquée: une copie à l'intérieur, une copie à l'extérieur. Mais une telle solution est exclue. En physique quantique, un théorème très fort, d'impossibilité de clonage quantique, interdit d'avoir une copie à l'identique de l'information. Par conséquent, il semble que les deux situations vues par les observateurs respectifs ne peuvent être vraies toutes deux.

Les physiciens Gerard 't Hooft, de l'université d'Utrecht, aux Pays-Bas, Leonard Susskind et leurs collaborateurs ont proposé la solution

QUATRE INTERPRÉTATIONS DE LA PHYSIQUE QUANTIQUE

Le monde quantique est très étonnant et contre-intuitif. Les physiciens ont développé diverses façons de comprendre ce qui est sous-jacent au formalisme mathématique de la théorie quantique. Les univers multiples ne sont qu'une des interprétations possibles. Sur le plan expérimental, les diverses conceptions sont équivalentes : les résultats de mesure qu'elles prédisent sont les mêmes. Il est donc difficile de savoir quelle interprétation est la plus pertinente, et la question reste débattue.



L'interprétation dite de Copenhague a été développée entre 1925 et 1927 notamment par le Danois Niels Bohr et l'Allemand Werner Heisenberg. C'est la version « orthodoxe » de la théorie quantique. Selon cette interprétation, un système physique n'a pas de propriété bien définie avant une mesure. Ses propriétés mesurables sont données par un objet mathématique, la fonction d'onde. En appliquant la règle dite de Born à la fonction d'onde, on calcule les probabilités des résultats de la mesure. L'opération de mesure provoque la réduction de l'état quantique en un nouvel état, qui correspond au résultat effectif de l'expérience. Cette réduction instantanée de la fonction d'onde soulève de nombreuses difficultés conceptuelles. Par ailleurs, cette interprétation donne un rôle particulier à l'observateur.



Selon l'interprétation des univers multiples proposée par Hugh Everett en 1957, l'état quantique de l'Univers est unique, évolue régulièrement et de manière prévisible. Quand on effectue une mesure ayant deux résultats possibles (pour déterminer par laquelle de deux fentes un électron est passé, par exemple), cet état ne se réduirait pas à l'état correspondant à une seule des fentes ; l'Univers se dédoublerait en deux branches indépendantes, chacune correspondant à un des deux résultats. Ainsi, au cours du temps, l'Univers se ramifierait indéfiniment, comme un arbre où chacune des branches correspond à la réalisation d'un des résultats possibles. Mais cette théorie des « multivers » est incapable d'expliquer le processus responsable de la ramification et a du mal à justifier la règle de Born.



L'interprétation de l'onde-pilote a été proposée par Louis de Broglie (dans les années 1920) et David Bohm (dans les années 1950). Ils ont privilégié une réécriture du corpus mathématique de la physique quantique de façon à inclure un champ de force réel, nommé onde-pilote, qui contrôle le mouvement des particules. L'évolution au cours du temps de cette onde est décrite par l'équation de Schrödinger. Elle guide la particule et agit sur cette dernière à la façon d'un champ électrique. La particule a un état déterminé même sans mesure. Cependant, cette image séduisante échoue dès que plusieurs particules sont impliquées. Plus troublant encore, l'onde-pilote exerce une action à distance, par laquelle des effets physiques sont transmis instantanément à grande distance.



Les théories de la réduction spontanée ont été introduites dans les années 1970 par l'Allemand Dieter Zeh. Plutôt que d'éliminer la réduction de la fonction d'onde due à l'observateur, ces théories postulent qu'il s'agit d'un processus entièrement naturel : de tels processus ont lieu spontanément, bien que rarement, pour chaque système quantique, mais deviennent prépondérants quand le système quantique interagit avec un objet macroscopique. Ces théories doivent cependant expliquer comment est réalisée la réduction. Des expériences de laboratoire, portant sur des systèmes constitués de quelques atomes ou photons, ont été réalisées ou sont en cours afin d'analyser les mécanismes à l'œuvre et de les élucider.

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.

ABONNEZ-VOUS À **POUR LA SCIENCE** EN TOUTE LIBERTÉ

NOUVELLE
FORMULE



FORMULE
PASSION
-28%



FORMULE
DÉCOUVERTE
-25%

FORMULE
INTÉGRALE
-42%



8,20€*



6,50€*



4,90€*

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à : Pour la Science - Service abonnements - 19 rue de l'Industrie - BP 90 053 - 67 402 Illkirch cedex

☐ OUI, JE M'ABONNE À **POUR LA SCIENCE** EN PRÉLÈVEMENT AUTOMATIQUE, JE CHOISIS MA FORMULE ET JE COMPLÈTE L'AUTORISATION DE PRÉLÈVEMENT CI-DESSOUS.

☐ FORMULE **INTÉGRALE**
12 n° de Pour la Science + 4 Hors-Séries
+ Accès illimité aux archives en ligne depuis 1996

8,20€
Par mois
-42%
IPV8E20

☐ FORMULE **PASSION**
12 n° de Pour la Science
+ 4 Hors-Séries

6,50€
Par mois
-28%
PPV6E50

☐ FORMULE **DÉCOUVERTE**
12 n° de Pour la Science

4,90€
Par mois
-25%
DPV4E90

MES COORDONNÉES

Nom : _____
Prénom : _____
Adresse : _____

Code postal _____

Ville : _____

Tél. Pour le suivi client (facultatif) : _____

E-mail obligatoire : _____@_____

J'accepte de recevoir les informations de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON
et de ses partenaires ☐ OUI ☐ NON

MANDAT DE PRÉLÈVEMENT SEPA

PAS479P

En signant ce mandat SEPA, j'autorise Pour la Science à transmettre des instructions à ma banque pour le prélèvement de mon abonnement dès réception de mon bulletin. Je bénéficie d'un droit de rétractation dans la limite de 8 semaines suivant le premier prélèvement. Plus d'informations auprès de mon établissement bancaire.

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte

Nom : _____

Adresse : _____

Code postal _____ Ville : _____

Désignation du compte à débiter

BIC (Identification internationale de la banque) _____

IBAN _____

(Numéro d'identification international du compte bancaire)

Établissement teneur du compte

Nom : _____

Adresse : _____

Code postal _____ Ville : _____

Date et signature

Organisme Créancier : Pour la Science
170 bis, bd. du Montparnasse - 75014 Paris
N° ICS FR92ZZZ426900
N° de référence unique de mandat (RUM)

Merci de joindre impérativement un RIB

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire

* Par mois et par rapport au prix de vente en kiosque, l'accès numérique aux archives. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31/12/2017 en France métropolitaine. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site www.pourlascience.fr. Conformément à la loi "Informatique et libertés" du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant en adressant un courrier à Pour la Science. Votre abonnement en prélèvement est reconduit automatiquement et peut être interrompu par simple lettre. Photos non contractuelles.

**SÉBASTIEN
RENAUX-PETEL**

est chercheur du CNRS dans
le groupe Physique théorique :
gravitation et cosmologie
de l'IAP (Institut
d'astrophysique de Paris).
Il est spécialiste
de l'inflation cosmique.



L'inflation cosmologique reste le scénario le plus satisfaisant



INGRÉDIENT ESSENTIEL DE LA THÉORIE MODERNE
DU BIG BANG ET DES SPÉCULATIONS SUR LES UNIVERS
MULTIPLES, L'INFLATION COSMIQUE EST UNE IDÉE QUI AGITE
ENCORE BEAUCOUP LES THÉORICIENS. POURQUOI ?
LES EXPLICATIONS DE SÉBASTIEN RENAUX-PETEL.