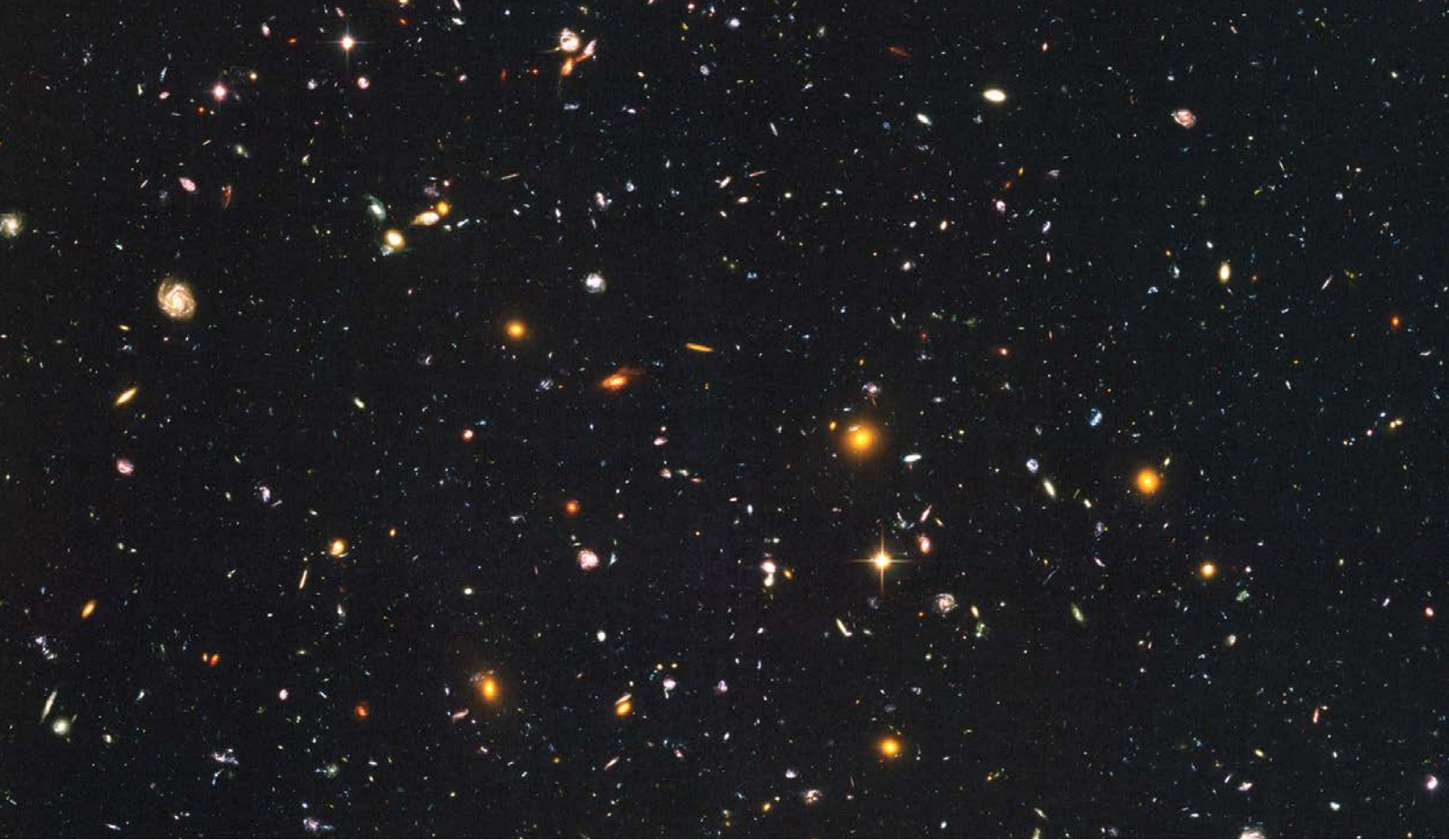




l'idée a toujours à l'heure actuelle nettement moins d'adeptes que l'interprétation de Copenhague. L'intuition clé d'Everett est que l'état d'un système quantique reflète l'état de l'intégralité de l'univers qui l'entoure, de telle sorte que nous devons inclure l'observateur dans une description complète 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

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.

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.

Univers-bulles

Espace
en inflation
éternelle

Observateur

Horizon cosmologique
(limite d'observation)

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.

Superposition des états : plusieurs univers-bulles existent en même temps

Univers A

Univers B

Univers C

Différents résultats de mesure dans l'univers C

Temps cosmique

> 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.

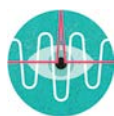
LE PARADOXE DU TROU NOIR

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.