Cela vous semble étrange ? C'est normal. Il n'est pas évident que les lois de la physique vous permettent de le faire. Mais comme le mathématicien Walter Craig, de l'Université McMaster au Canada, et le philosophe Steven Weinstein, de l'Université de Waterloo (Canada), l'ont récemment montré, c'est possible, du moins dans certaines situations simples.

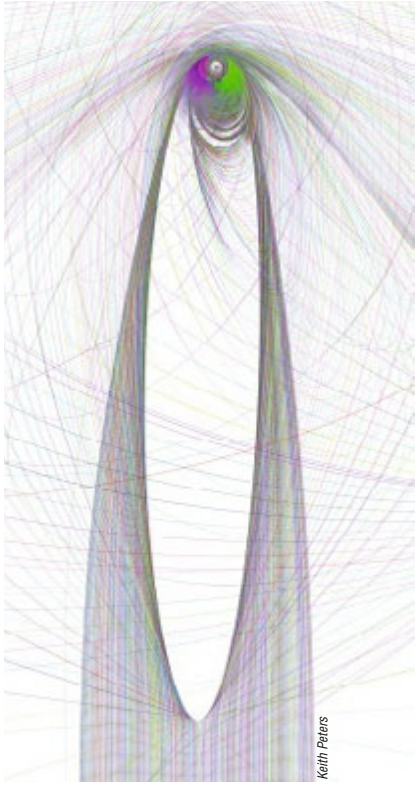
Bien qu'en principe, les deux méthodes de découpage de l'espace-temps soient possibles, elles diffèrent profondément. Dans le découpage usuel, du passé vers le futur, les données qu'il est nécessaire de recueillir sur une tranche sont, en théorie, assez faciles à obtenir. Par exemple, si l'on mesure les vitesses de toutes les particules, la vitesse d'une particule en un endroit est indépendante de la vitesse d'une autre particule ailleurs. Mais dans la seconde méthode de découpage, les propriétés des particules ne sont pas indépendantes ; elles sont entremêlées de façon très particulière. Il faudrait combiner des mesures extrêmement compliquées sur ces particules pour obtenir les informations nécessaires. Et encore, ces mesures ne permettraient de reconstituer l'espace-temps entier que dans des cas particuliers, comme ceux découverts par W. Craig et S. Weinstein.

Le temps, une direction qui simplifie les choses

Dans un sens bien précis, le temps est la direction de l'espace-temps dans laquelle de bonnes prédictions sont possibles, la direction dans laquelle nous pouvons raconter les histoires les plus informatives. Le récit de l'Univers ne se déroule pas dans l'espace ; il se déroule dans le temps.

L'un des objectifs les plus ambitieux de la physique moderne est de réunir la relativité générale et la physique quantique en une théorie unique qui prenne en compte les aspects tant gravitationnels que quantiques de la matière : une théorie quantique de la gravitation. Cette ambition se heurte à plusieurs écueils ; en particulier, la mécanique quantique impose au temps certaines propriétés qui contredisent ce que j'ai dit jusqu'ici.

La mécanique quantique affirme que les objets ont un répertoire de comportements bien plus riche que ce que nous pouvons saisir avec des grandeurs classiques telles que position et vitesse. La description complète d'un objet est donnée par une entité mathématique nommée état quantique. Cet état évolue de façon continue dans le temps, et les physiciens sont capables de calculer la probabilité que tel ou tel résultat expérimental soit obtenu à tel ou tel instant. Si l'on envoie un électron à travers un dispositif qui le défléchit soit vers le haut, soit vers le bas, la mécanique quantique peut ne pas être en mesure de nous dire avec certitude à quel résultat s'attendre. Au lieu de cela, l'état quantique ne donne que la probabilité des différents résultats possibles ; par exemple, 25 pour cent de chances que l'électron parte vers le haut, et 75 pour cent de chances qu'il soit dévié vers le bas. Deux systèmes décrits par des


Keith Peters

états quantiques identiques peuvent ainsi donner des résultats différents.

Les prédictions probabilistes de la théorie exigent du temps certaines caractéristiques. Tout d'abord, le temps est ce qui rend les contradictions possibles. Quand on lance un dé, il ne peut pas tomber sur 3 et sur 5 en même temps. Il ne peut le faire qu'à des instants différents. Cette caractéristique est liée au fait que la probabilité de tomber sur chacune des six faces doit être égale à 100 pour cent, sinon le concept de probabilité perdrait tout son sens. Les probabilités s'additionnent à un instant donné, pas à un endroit donné. Il en va de même des probabilités que les particules quantiques aient une position ou une quantité de mouvement données.

Ensuite, l'ordre temporel des mesures quantiques importe. Supposons que l'on fasse passer un électron à travers un dispositif qui le défléchit d'abord verticalement, puis horizontalement, et que l'on mesure son moment cinétique lorsqu'il sort du dispositif. On répète l'expérience, cette fois en déviant l'électron horizontalement, puis verticalement, et l'on mesure à nouveau le moment cinétique. Les valeurs obtenues seront très différentes.

Un écueil quantique

Enfin, un état quantique fournit les probabilités pour tout l'espace à un instant donné. Si l'état englobe une paire de particules, alors le fait de mesurer l'une des particules affecte instantanément l'autre, indépendamment de l'endroit où elle se trouve ; c'est la célèbre « fantomatique action à distance » qui troublait tant Einstein à propos de la mécanique quantique. Cette corrélation instantanée le chagrinait pour la bonne raison que si les particules réagissent en même temps, alors cela signifie que l'Univers est muni d'une horloge maîtresse, ce que la relativité interdit expressément.

Bien que certaines de ces questions restent controversées, le temps en mécanique quantique est essentiellement une régression au temps de la mécanique newtonienne. Les physiciens se préoccupent de l'absence de temps en relativité, mais le rôle central du temps en mécanique quantique pose peut-être un problème plus grave. C'est pour cette raison profonde que l'unification de la relativité générale et de la physique quantique est si difficile.

De nombreux programmes de recherche ont visé à unir la relativité générale et la physique quantique. Ils se répartissent schématiquement en deux groupes. Les physiciens qui pensent que la mécanique quantique offre le fondement le plus solide, comme les théoriciens des supercordes, ont pour point de départ un temps pur et dur. Ceux qui croient que la relativité générale fournit le meilleur point de départ démarrent avec une théorie où le temps est déjà déchu et sont donc plus ouverts à l'idée d'une réalité atemporelle.

Certes, la distinction entre ces deux approches est floue. Les théoriciens des supercordes ont récemment envisagé des théories dépourvues de temps. Mais pour

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

bien faire comprendre les problèmes fondamentaux que pose le temps, je vais me concentrer sur la seconde approche, dont le principal exemple est la théorie de la gravitation quantique à boucles, elle-même issue de la première théorie de la gravitation quantique, dite canonique.

La théorie canonique a émergé dans les années 1950 et 1960, quand les physiciens ont exprimé les équations de la gravitation d'Einstein sous la même forme que les équations de l'électromagnétisme. L'idée était que les techniques ayant été utilisées pour construire la théorie quantique de l'électromagnétisme s'appliqueraient aussi à la gravité. Ainsi, à la fin des années 1960, les physiciens John Wheeler et Bryce DeWitt sont parvenus à un étrange résultat. L'équation (dite de Wheeler-DeWitt) était totalement dépourvue de variable temporelle. Le symbole *t* désignant le temps avait tout bonnement disparu.

Des équations où le temps a disparu

Les physiciens sont restés perplexes des décennies durant. Si l'on prend le résultat à la lettre, le temps n'existe pas vraiment. Carlo Rovelli, de l'Université de la Méditerranée Aix-Marseille II, l'un des créateurs de la gravitation quantique à boucles, et le physicien anglais Julian Barbour sont les deux partisans les plus en vue de cette idée. Ils ont tenté de réécrire la mécanique quantique d'une façon qui ne fasse pas intervenir le temps, comme semble l'exiger la relativité *(voir l'article de Carlo Rovelli)*.

Ils pensent que cette manœuvre est possible parce que la relativité générale, bien que dépourvue de temps global, parvient encore à décrire le changement. Pour l'essentiel, cette théorie le fait en reliant les systèmes physiques directement les uns aux autres plutôt qu'à travers une notion abstraite de temps global.

Dans les expériences de pensée d'Einstein, les observateurs établissent la chronologie des événements en comparant des horloges utilisant des signaux lumineux. On pourrait décrire la variation de la position d'un satellite en orbite autour de la Terre en termes des battements de l'horloge de votre cuisine, ou *vice-versa*. Ce que l'on fait, c'est décrire les corrélations entre deux objets physiques sans faire intervenir de temps global comme intermédiaire. Au lieu de décrire la couleur de mes cheveux comme changeante dans le temps, on peut la corréler avec l'orbite du satellite. Au lieu de dire qu'une balle de base-ball accélère à dix mètres par seconde carrée, on peut la corréler aux changements d'un glacier. Et ainsi de suite. Le temps devient redondant. Le changement peut être décrit sans lui.

Ce vaste réseau de corrélations est si bien organisé que l'on peut y définir une entité nommée « temps » et tout y relier ; on se débarrasse ainsi du fardeau consistant à suivre toutes les relations directes entre les phénomènes. Les physiciens sont ainsi en mesure de résumer de manière compacte les rouages de l'Univers, en termes de lois physiques qui se jouent dans le temps.

Virtuel comme l'argent

Mais cette commodité ne doit pas nous faire croire que le temps est une entité fondamentale. L'argent aussi nous facilite beaucoup la vie, en nous évitant de faire du troc à chaque fois que nous voulons boire un café ou manger un morceau de pain. Mais c'est une grandeur fictive inventée pour les choses auxquelles nous accordons de la valeur, pas une entité qui a de la valeur en soi. De façon analogue, le temps nous permet de relier des systèmes physiques les uns aux autres sans qu'il soit nécessaire de comprendre exactement comment un glacier est relié à une balle de base-ball. Mais le temps est lui aussi une invention commode qui n'existe pas plus fondamentalement dans la nature que l'argent.

Se débarrasser du temps a un certain attrait, mais cela entraîne certaines difficultés. Entre autres, il faut repenser la

mécanique quantique. Prenons le célèbre exemple du chat de Schrödinger. Ce chat, dont le sort dépend de l'état d'une particule quantique, est suspendu entre la vie et la mort. Dans la représentation classique, le chat devient l'un ou l'autre après une mesure ou un processus équivalent. Mais C. Rovelli prétendrait que le sort du chat n'est jamais déterminé. La pauvre bête peut être morte vis-à-vis d'elle-même, vivante par rapport à un humain présent dans la pièce, morte par rapport à un autre humain dans la pièce d'à côté, et ainsi de suite.

Une chose est de faire dépendre de l'observateur le moment de la mort du chat, comme dans la relativité restreinte ; une autre, encore plus surprenante, est que la mort du chat elle-même soit relative, comme le suggère C. Rovelli, en poussant l'esprit de la relativité à son extrême. Le temps fait tellement partie de notre intuition que son éviction transformerait la vision que les physiciens ont du monde.

Une question pressante pour quiconque épouse la gravitation quantique atemporelle est d'expliquer pourquoi le monde a une temporalité apparente. La relativité générale elle non plus n'intègre pas le temps au sens newtonien, mais au moins elle possède divers substituts partiels qui, ensemble, se comportent comme le temps newtonien quand la gravité est faible et les vitesses relatives petites. L'équation de Wheeler-DeWitt ne laisse même pas la place à ces substituts. J. Barbour et C. Rovelli ont chacun proposé des suggestions sur la manière dont le temps, ou du moins son illusion, pourrait surgir de rien. Mais la gravitation quantique canonique offre déjà une idée plus développée.

Connue sous le nom de temps semi-classique, elle remonte à un article de 1931 du physicien anglais Nevill Mott qui décrivait la collision entre un noyau d'hélium et un atome plus gros. Pour modéliser le système total, Mott utilisait une équation où le temps ne figure pas, et qu'on n'applique généralement qu'aux systèmes statiques. Il décomposait alors le système en deux sous-systèmes et utilisait le noyau d'hélium comme « horloge » pour l'atome. Remarquablement, l'atome obéit, par rapport au noyau, à l'équation usuelle de la mécanique quantique, mais où une fonction spatiale remplace le paramètre temps.

Ainsi, même quand le système dans son ensemble est atemporel, les éléments individuels ne le sont pas. Un temps pour le sous-système se cache dans l'équation atemporelle du système total.

Quelque chose d'assez similaire a lieu avec la gravitation quantique, comme l'a argumenté Claus Kiefer, de l'Université de Cologne, suivant en cela les pas de Thomas Banks, de l'Université de Californie à Santa Cruz, et d'autres. L'Univers est peut-être dépourvu de temps, mais si on le décompose, certaines de ses parties peuvent servir d'horloges aux autres. Le temps émerge ainsi de l'atemporalité. Nous percevons le temps parce que nous sommes, par nature, un de ces éléments de l'Univers.

Reconstituer le temps de l'expérience

Pour intéressante et étrange que soit cette idée, elle nous laisse un peu sur notre faim. L'Univers ne peut pas toujours être décomposé en éléments qui servent d'horloges et, dans ce cas, la théorie ne fait pas de prédictions probabilistes. Le traitement de ces situations nécessitera une théorie complète de la gravitation quantique, et il faudra repenser le temps encore plus en profondeur.

Les physiciens sont partis du temps structuré de l'expérience, le temps d'un passé fixé, du présent et d'un futur ouvert. Ils l'ont petit à petit démantelé, et il n'en reste plus grand-chose. Les chercheurs doivent désormais inverser ce raisonnement et reconstruire le temps de l'expérience, peut-être à partir d'un réseau de corrélations entre éléments d'un monde fondamentalement statique.

Le philosophe français Maurice Merleau-Ponty avançait que le temps lui-même ne s'écoule pas vraiment, et que cet écoulement apparent est un produit du fait « que nous mettons subrepticement dans le ruisseau un témoin de sa course ». En d'autres termes, la tendance à croire que le temps s'écoule vient du fait que nous oublions de nous mettre nous-mêmes et nos relations avec le monde dans le tableau. Merleau-Ponty parlait de notre expérience subjective du temps, et jusque récemment personne n'avait deviné que le temps objectif pourrait lui-même s'expliquer comme résultant de ces relations. Le temps pourrait n'exister qu'en éclatant le monde en sous-systèmes et en regardant ce qui les relie. Dans ce tableau, le temps physique émerge parce que nous nous considérons comme distincts de tout le reste. ■

LES DÉFENSEURS DE L'ÉCOULEMENT DU TEMPS

Tous les physiciens ne pensent pas que le monde est, par essence, intemporel. L'une des idées alternatives les plus intéressantes est la « théorie des ensembles causaux », développée par Rafael Sorkin et David Rideout de l'Institut Perimeter (PI) pour la physique théorique du Canada. Elle suppose que le monde est un ensemble d'événements qui croît à mesure que de nouveaux événements voient le jour selon des règles probabilistes. Ils espèrent que le processus reproduit les caractéristiques de l'espace-temps que nous percevons, y compris l'écoulement du temps. Reste cependant à déterminer si ce processus produit des univers compatibles avec la théorie de la relativité.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010