

dans l'espace-temps. L'espace et le temps sont ainsi des concepts plus secondaires.

Einstein n'a fait qu'empirer les choses en 1915 avec sa théorie de la relativité générale, qui étend la relativité restreinte à des situations où la gravitation est présente. La gravitation déforme le temps, de telle sorte que l'écoulement d'une seconde ici peut ne pas signifier la même chose que l'écoulement d'une seconde ailleurs. Sauf dans de rares cas, il est alors impossible de synchroniser des horloges et d'obtenir qu'elles restent synchronisées. Il n'est plus possible de considérer que le monde évolue seconde après seconde en étant régi par un unique paramètre temporel. Il devient alors impossible de dire qu'un événement s'est produit avant ou après un autre (voir l'article de Marc Lachièze-Rey).

Le temps était déjà déchu en 1915

La relativité générale met en jeu de nombreuses notions où apparaît le mot « temps » : coordonnée temporelle, temps propre, temps global... Elles remplissent collectivement de nombreuses tâches qui incombaient au temps unique de Newton, mais, isolément, aucune d'elles ne s'impose. Soit la physique n'écoute pas ces horloges, soit, si elle le fait, ces horloges ne s'appliquent qu'à de petites portions de l'Univers ou à des observateurs particuliers. Les physiciens d'aujourd'hui s'émeuvent de ce qu'une théorie unifiée devra éliminer le temps, mais on peut raisonnablement dire que le temps était déjà passé à la trappe en 1915 et que nous ne l'avons pas encore tout à fait intégré.

On serait tenté de penser que la différence entre l'espace et le temps a presque disparu, et que la véritable arène des événements est quadridimensionnelle. La relativité semble transformer le temps en une simple dimension (ou direction) supplémentaire dans cette arène. L'espace-temps est comme une miches de pain que l'on peut découper en tranches de différentes façons, arbitrairement nommées « espace » ou « temps ».

Pourtant, même en relativité générale, le temps conserve une fonction distincte et importante : celle de distinguer localement entre les directions « du genre temps » et celles « du genre espace ». Les événements séparés par un intervalle du genre temps sont ceux qui peuvent être causalement reliés (voir la figure 2) – des évé-

nements tels qu'un objet ou un signal peut passer de l'un à l'autre, et ainsi l'influencer. Deux événements séparés par un intervalle du genre espace sont sans relation causale. Aucun objet ou signal ne peut passer de l'un à l'autre.

Les différents observateurs ne sont pas d'accord sur la succession des événements séparés par des intervalles du genre espace, mais ils sont tous d'accord sur l'ordre des événements séparés par des intervalles du genre temps. Et si, pour un observateur, un événement peut en provoquer un autre (par causalité), il en est de même pour tous les autres observateurs.

Il y a deux ans, dans un essai, j'explorais ce que signifie cette caractéristique du temps. Imaginons que l'on découpe en tranches l'espace-temps du passé vers le futur ; chaque tranche est la totalité tridimensionnelle de l'espace à un instant donné (voir l'encadré page précédente). La somme de toutes ces tranches d'événements (dans chaque tranche, les événements sont séparés par des intervalles du genre espace) est l'espace-temps quadridimensionnel. Alternativement, imaginons que l'on regarde le monde de travers et qu'on le découpe dans ce sens. Dans cette perspective, chaque tranche tridimensionnelle est un étrange amalgame d'événements séparés par des intervalles du genre espace et d'autres séparés par des intervalles du genre temps.

La première méthode est familière aux physiciens ou aux cinéphiles. Les images d'un film représentent des tranches d'espace-temps : elles montrent l'espace à des instants successifs. Un peu comme les passionnés de cinéma qui deviennent l'intrigue et prédisent la suite de l'histoire racontée par le film, les physiciens peuvent prendre une seule tranche spatiale complète et reconstruire ce qui se passe dans les autres tranches spatiales, simplement en appliquant les lois de la physique.

Un découpage étrange

La seconde méthode de découpage n'a pas d'analogie simple. Elle correspond au découpage de l'espace-temps non pas du passé vers le futur, mais d'Est en Ouest. Un exemple d'une telle tranche pourrait être le mur Nord d'une maison et tout ce qui arrivera à ce mur dans le futur. À partir de cette tranche, les lois de la physique permettraient de reconstituer le reste de la maison (et même le reste de l'Univers).

L'AUTEUR



Craig CALLENDER est professeur de philosophie à l'Université de Californie à San Diego, aux États-Unis.

BIBLIOGRAPHIE

S. M. Carroll, *From Eternity to Here: The Quest for the Ultimate Theory of Time*, Dutton, 2010.

C. Callender, *Introducing Time*, Totem Books, 2005.

B. Greene, *La magie du cosmos*, Robert Laffont, 2005.

L. Smolin, *Des atomes d'espace et de temps*, *Pour la Science*, n° 316, février 2004.

R. Healey, « Can physics coherently deny the reality of time ? », dans C. Callender, *Time, Reality & Experience*, University of Cambridge, 2002.

C. Rovelli, *Relational quantum mechanics*, *International Journal of Theoretical Physics*, vol. 35(8), pp. 1637-1678, 1996. arxiv.org/abs/quant-ph/9609002

SUR LE WEB

FQXi FORUM : The Nature of Time Essay Contest, sur : <http://www.fqxi.org/community/forum/category/10> (voir en particulier les essais de Claus Kiefer, Carlo Rovelli, Julian Barbour et Craig Callender).

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.

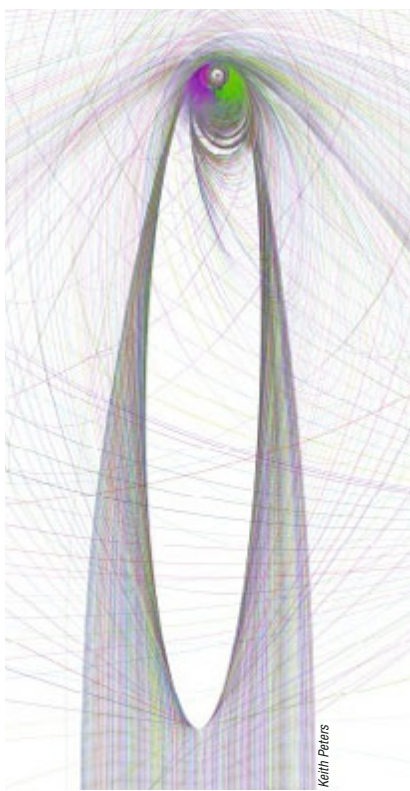
Le temps, une direction qui simplifie les choses

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 nom-

mée 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



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 chagrina 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