

Or dans un espace à deux dimensions, il n'y a pas de place pour un tel comportement. Une fois que la direction du mouvement est fixée, il ne reste qu'une dimension perpendiculaire. Les ondes gravitationnelles et leurs gravitons ne peuvent tout simplement pas être contenus dans deux dimensions spatiales.

Malgré quelques ponctuels regains d'intérêt, la théorie de A. Staruszkiewicz était donc restée sans suite. Jusqu'à ce qu'en 1989, Edward Witten, de l'Institut d'études avancées de Princeton, apporte une contribution décisive. E. Witten travaillait sur une classe particulière de champs où les ondes ne se propagent pas librement. Lorsqu'il s'est rendu compte que la gravitation en deux dimensions appartenait à cette classe, il a ajouté l'ingrédient crucial qui manquait : la topologie.

Quand l'espace ressemble à une chambre à air

E. Witten a fait remarquer que même si la gravitation ne peut pas se propager sous forme d'ondes, elle peut avoir un effet sur la forme générale de l'espace, ce que les mathématiciens appellent sa topologie. La topologie décrit les caractéristiques générales d'une surface, comme le nombre de trous. Deux surfaces ont la même topologie si l'on peut passer de l'une à l'autre par une déformation continue, sans rien couper, déchirer ou coller. Un hémisphère et un disque ont par exemple la même topologie ; il suffit d'étaler le premier pour obtenir le second. Une sphère a une autre topologie, car pour la transformer en un disque, il faudrait en couper un bout (au moins un point). Une chambre à air, ou tore, a encore une autre topologie, identique à celle d'une tasse munie d'une anse.

Bien que les tores apparaissent courbes vus de l'extérieur, ils sont plats du point de vue de leur géométrie interne. Ce qui caractérise un tore, c'est qu'on peut décrire une courbe fermée dans deux directions indépendantes, l'une entourant le trou et l'autre perpendiculaire. Cette caractéristique est similaire à celle de l'ancien jeu vidéo *Pac man*, où les personnages qui sortent par un côté de l'écran rentrent par le côté opposé. L'écran de jeu est plat ; il obéit aux règles de la géométrie plane – par exemple deux droites parallèles ne se rencontrent jamais – mais sa topologie est celle d'un tore.

En fait, il existe une famille infinie de tores, caractérisés par un paramètre nommé module. Lié au rapport entre les tailles des deux cercles qui définissent le tore, il donne une mesure de la « forme » du tore (plus ou moins épais, avec un trou plus ou moins large, etc.).

Dans un univers à deux dimensions en forme de tore, la gravitation crée une dynamique qui fait évoluer le module, c'est-à-dire la géométrie globale du tore, au fil du temps (voir l'encadré page 75). E. Witten a montré que ce processus peut être quantifié, c'est-à-dire qu'on peut transformer la théorie classique de la gravitation en deux dimensions en une théorie quantique.

TROUS DE VER ET AUTRES BIZZARRIES

Dans l'une des formulations de la gravitation quantique à deux dimensions, contrairement à ce qui se passe en théorie de la relativité générale, la topologie de l'univers peut changer. Cela pourrait résoudre des questions posées de longue date. Par exemple, un tore à un seul trou a une probabilité non nulle d'évoluer vers un tore doté d'une anse, c'est-à-dire à deux trous. Cela reviendrait à créer un trou de ver, un passage direct d'un endroit à un autre. L'univers pourrait aussi subitement devenir un point et disparaître.



Le tore développe un second trou

En un bref instant, le tore se réduit à un point et disparaît

Malcolm Godwin

Ainsi, la gravitation quantique à deux dimensions n'est pas une théorie des gravitons, mais une théorie de l'évolution de la forme globale des tores. Cette vision diffère de la représentation habituelle de la théorie quantique comme une description de l'infiniment petit. La gravitation quantique en deux dimensions est, en fait, une théorie qui porte sur l'Univers dans son ensemble en tant qu'objet contrôlé par les lois quantiques. Ce point de vue livre un modèle suffisamment riche pour explorer certains des problèmes conceptuels fondamentaux de la gravitation quantique.

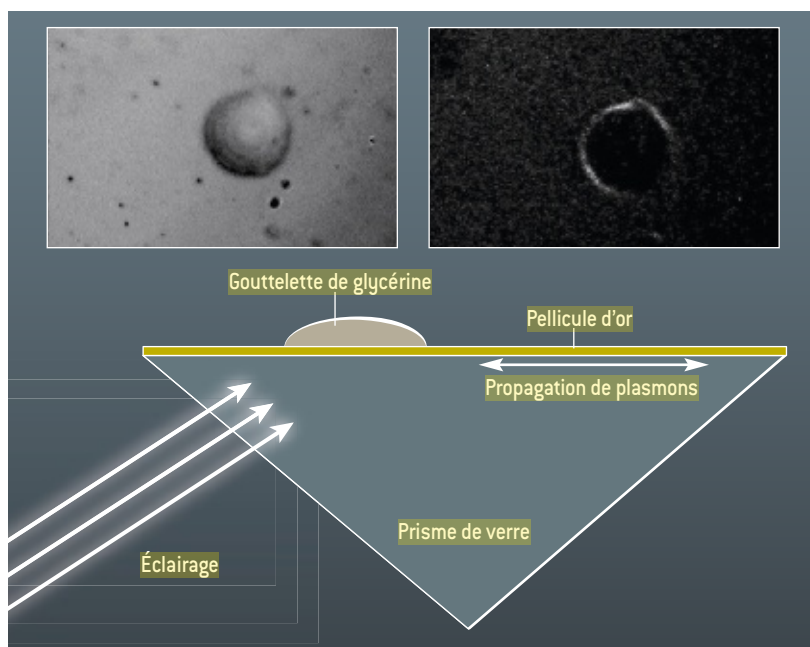
La gravitation en deux dimensions indique par exemple comment le temps pourrait émerger d'un cadre fondamentalement atemporel. Dans l'une des formulations de la théorie, l'univers entier est décrit par une unique fonction d'onde quantique. Mais cette fonction d'onde ne dépend pas explicitement du temps. En effet, le temps, lié à l'espace, est partie prenante de la géométrie et est donc inclus dans la quantification. Ce n'est pas un paramètre indépendant.

D'une façon ou d'une autre, cette fonction d'onde « atemporelle » fait émerger le flux du temps tel que nous l'observons. Selon l'aphorisme d'Einstein, le temps est ce qui est mesuré par une horloge. Cela semble être une banalité, mais signifie qu'il n'existe pas de temps absolu déconnecté de la réalité physique. Le temps est toujours déterminé par un sous-système qui est corrélé avec le reste de l'univers, par exemple le mouvement de rotation de la Terre ou la fréquence d'un rayonnement de l'atome de césium.

La théorie offre différentes options en matière d'horloge – en fait, l'évolution de toute grandeur observable – et le choix définit ce que signifie le « temps ». Une fois ce choix fait, toutes les autres observables physiques changent en fonction du temps de cette horloge.

DES TROUS NOIRS 2D EN LABORATOIRE

Des analogues bidimensionnels des trous noirs ont été réalisés en laboratoire. Ils mettent en jeu des plasmons, des ondes électromagnétiques qui se propagent le long d'une surface métallique. Une gouttelette de liquide déposée sur la surface piège les plasmons comme un trou noir tridimensionnel piège les photons. L'analogue de l'horizon des événements se manifeste sous la forme d'un bord blanc (ci-dessous à droite). Ces systèmes électromagnétiques bidimensionnels sont susceptibles de trouver des applications en optique.



Tiré de « Surface plasmon toy-models of black holes and wormholes », I. I. Smolyaninov et C. C. Davis, *Physical Review B*, vol. 69 (20), 15 mai 2004

Enfin, la gravitation à deux dimensions réserve une bonne nouvelle aux partisans des trous de vers, ces hypothétiques raccourcis entre deux points distants de l'Univers. Il existe au moins une formulation de la théorie qui autorise la topologie de l'espace à changer sous l'effet de la gravitation. Un espace torique pourrait par exemple développer une anse et devenir un tore à deux trous, ce qui revient à créer un passage entre deux régions (voir la figure page 77). Dans certaines versions de la gravitation quantique à deux dimensions, on peut même décrire la création de l'Univers à partir de rien, en d'autres termes le changement ultime de topologie.

Des trous noirs en 2D

La gravitation étant limitée dans l'espace à deux dimensions, tous les spécialistes pensaient que les trous noirs ne pouvaient pas y exister. Et pourtant, en 1992, trois physiciens chiliens, Máximo Bañados, Claudio Teitelboim et Jorge Zanelli, ont montré que cette théorie autorise en fait l'existence de trous noirs, à condition que l'univers contienne une certaine forme d'énergie comparable à l'énergie sombre, qui dans notre Univers s'oppose à l'effet de la gravitation.

Un trou noir BTZ (les initiales des trois chercheurs) ressemble assez à un vrai trou noir de notre Univers. Formé par l'effondrement de matière sous son propre poids, il est entouré d'un horizon des événements, une frontière virtuelle d'où rien ne peut s'échapper. Conformément aux calculs de S. Hawking, un trou noir BTZ devrait émettre un rayonnement correspondant à une température qui dépend de sa masse et de sa vitesse de rotation.

Ce résultat est une énigme. Dépourvue d'ondes gravitationnelles ou de gravitons, la gravitation en deux dimensions est aussi dénuée des degrés de liberté gravitationnels qui permettraient d'expliquer la température et d'autres grandeurs thermodynamiques des trous noirs. Et pourtant, ils se manifestent quand même.

C'est en fait l'horizon des événements qui apporte une structure supplémentaire faisant défaut à l'espace bidimensionnel vide. L'horizon est topologiquement équivalent à un cercle, ce qui enrichit la théorie de degrés de liberté supplémentaires : les vibrations de ce cercle. De façon remarquable, leurs propriétés correspondent exactement aux résultats de S. Hawking.

L'AUTEUR

Steven CARLIP est professeur à l'Université de Californie à Davis (États-Unis).

BIBLIOGRAPHIE

C. Callender, *Le temps est-il une illusion ?*, *Pour la Science*, n° 397, novembre 2010.
http://bit.ly/397_callender

Juan Maldacena, *La gravité est-elle une illusion ?*, *Pour la Science* n° 339, janvier 2006.
http://bit.ly/339_maldacena

S. Carlip, *Quantum gravity in 2+1 dimensions : The case of a closed universe*, *Living Reviews in Relativity*, vol. 8, 2005.
www.livingreviews.org/lrr-2005-1

S. Carlip, *Quantum Gravity in 2+1 Dimensions*, Cambridge University Press, 1998.

Dans le tore-univers, le module est par exemple corrélé avec la taille du tore, et un habitant perçoit son évolution comme une évolution de la taille de l'univers au fil du temps. La théorie introduit donc le temps à partir d'un univers atemporel. Ces idées ne sont pas nouvelles, ni spécifiques à la gravitation en deux dimensions, mais ce modèle fournit un cadre dans lequel on peut faire des calculs et vérifier la validité de cette approche.

Quant au problème des observables, l'espace toroïdal offre une quantité mesurable, à savoir le module. C'est une observable non locale : elle ne prend pas de valeurs en des points précis, mais décrit la structure de l'espace entier. Tout ce qu'on peut mesurer de l'intérieur de l'espace à deux dimensions, c'est en fin de compte par son intermédiaire. En 2008, Catherine Meusburger, maintenant à l'Université d'Erlangen-Nuremberg en Allemagne, a par exemple montré comment le module est lié à des mesures cosmologiques concrètes telles que le décalage vers le rouge de rayons lumineux. J'ai pour ma part montré qu'il est lié au mouvement des objets.