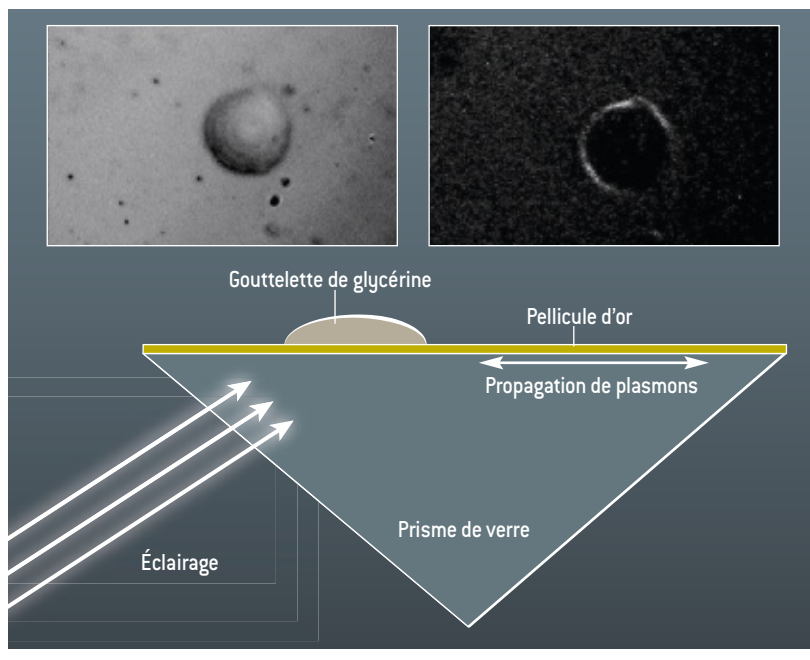


DES TROUS NOIRS 2D EN LABORATOIRE

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.



Titre 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.

Comme les degrés de liberté sont des caractéristiques de l'horizon, on peut dire en un sens qu'ils résident au « bord » de l'espace à deux dimensions. Ils constituent donc une réalisation d'un des principes les plus subtils de la gravitation quantique, le principe holographique. Tout comme un hologramme enregistre une image tridimensionnelle sur une pellicule à deux dimensions, ce principe énonce que la physique d'un univers à n dimensions peut être entièrement décrite par une théorie plus simple à $(n-1)$ dimensions. Dans la théorie des cordes – la théorie la plus aboutie pour unifier la relativité générale et la physique quantique –, cette idée a conduit à une approche novatrice pour créer une théorie quantique de la gravitation.

La gravitation en deux dimensions est un scénario simplifié sur lequel on pourrait tester cette approche. Mais il y a quatre ans, E. Witten et Alexander Maloney, aujourd'hui à l'Université McGill, ont créé la surprise en suggérant que les prédictions de la théorie holographique

pourraient échouer dans le cadre bidimensionnel. Les trous noirs auraient des propriétés thermiques incohérentes.

Un modèle bien fécond

Si ces théoriciens ont raison, alors la gravitation en deux dimensions est un phénomène encore plus subtil que nous ne l'avons suspecté jusqu'à présent. Peut-être n'a-t-elle pas de sens en elle-même et doit-elle être couplée avec d'autres types d'interactions et de particules. Peut-être le principe holographique n'est-il pas toujours valable. Peut-être l'espace, comme le temps, n'est-il pas un ingrédient fondamental de l'univers. Ou encore peut-être faut-il trouver un moyen de réintroduire des degrés de liberté au niveau local. Dans tous les cas, la gravitation en deux dimensions a indiqué une voie d'exploration que nous n'aurions sans doute pas empruntée autrement.

Même s'il nous est impossible de fabriquer un véritable trou noir en deux dimensions, nous pourrions réussir à tester

expérimentalement certaines des prédictions de la théorie quantique de la gravitation en deux dimensions. Plusieurs équipes travaillent sur des analogues bidimensionnels des trous noirs. Un fluide s'écoulant plus vite que la vitesse du son produit par exemple un horizon des événements duquel les ondes sonores quantifiées (les phonons) ne peuvent pas s'échapper. Les expérimentateurs ont également construit des trous noirs bidimensionnels à l'aide de plasmons, des ondes électromagnétiques confinées sur des surfaces (voir l'encadré page 78). De tels dispositifs devraient présenter un analogue du rayonnement quantique des trous noirs.

La gravitation quantique en deux dimensions était au départ un simple cadre destiné à explorer des idées sur la gravitation quantique dans le monde réel. Mais ce modèle nous a surpris par sa richesse : le rôle important de la topologie, ses trous noirs remarquables, ses étranges propriétés holographiques. Abbott n'aurait sans doute pas cru que *Flatland* se révélerait si fécond ! ■

france culture

VOYAGER DANS LE TEMPS

La marche des sciences
Aurélié Luneau
14h/15h - jeudi
En partenariat avec *Pour la Science*

franceculture.fr

Photo : Nati Bourage © Philippe Rivetti. Courtesy: gawie kassir - 402457 - Paris 2011