

La gravitation quantique en deux dimensions

Steven Carlip

Quelle serait l'action de la gravitation si l'espace avait deux dimensions seulement, au lieu de trois ?

L'exploration de cette idée guide les physiciens vers une théorie unifiée des forces fondamentales.

L'ESSENTIEL

✓ Tenus en échec par l'unification de la physique quantique et de la théorie de la relativité générale, les physiciens ont étudié une version simplifiée du problème où l'univers n'a que deux dimensions.

✓ Bien que les ondes gravitationnelles ne puissent exister en deux dimensions, un tel univers peut néanmoins changer de forme globale sous l'effet de la gravitation.

✓ La théorie quantique de la gravitation qui en découle éclaire diverses énigmes des théories d'unification, telles que la façon dont le temps émerge d'une toile de fond atemporelle ou le rayonnement des trous noirs.

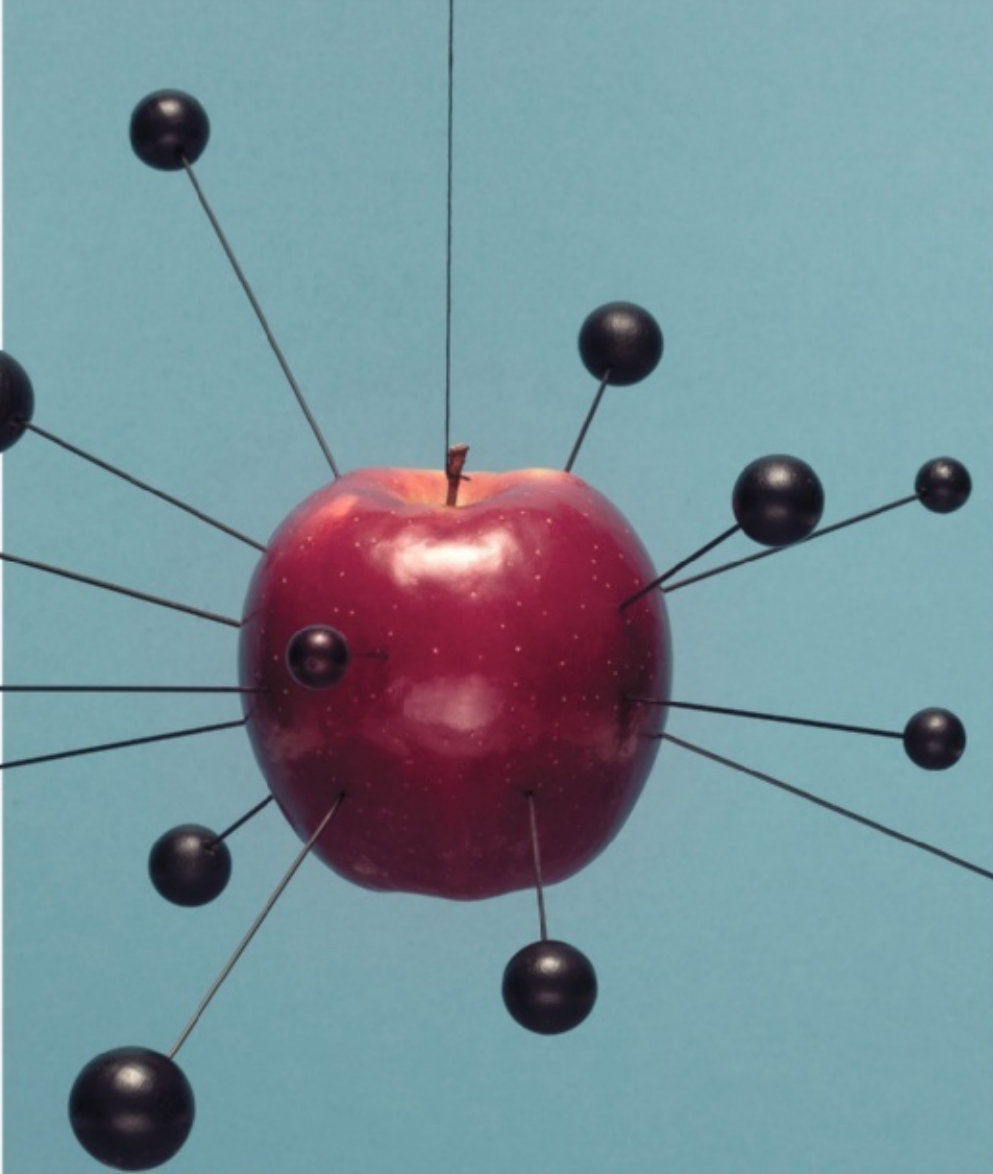
Depuis qu'elle existe en tant que science, la physique recherche l'unité dans la nature. Newton a ainsi montré que la force responsable de la chute d'une pomme est la même que celle qui maintient les planètes sur leur orbite. Maxwell a rassemblé les descriptions de l'électricité, du magnétisme et de la lumière en une théorie unique, l'électromagnétisme. Un siècle plus tard, les physiciens y ajoutaient l'interaction faible pour créer la théorie unifiée dite électrofaible. Einstein, quant à lui, réunissait au début du XX^e siècle l'espace et le temps en un unique continuum, l'espace-temps.

Aujourd'hui, le principal chaînon manquant dans cette quête unificatrice est la réunion de la gravitation et de la physique quantique. La théorie de la gravitation d'Einstein, la relativité générale, décrit aussi bien l'évolution de l'Univers que les mouvements des planètes et la chute des pommes. La physique quantique décrit les atomes, les électrons et les quarks, les interactions fondamentales subatomiques, et bien d'autres phénomènes. Mais là où les deux théories devraient s'appliquer ensemble, dans les situations extrêmes où les effets quantiques et ceux de la gravitation sont importants, par exemple au cœur des trous noirs ou durant les premières fractions de seconde de l'Univers, elles semblent incompatibles. En dépit de tous leurs efforts

depuis plus de 80 ans pour combiner la relativité générale et la physique quantique, les physiciens n'ont pas encore réussi. La théorie de la gravitation quantique nous échappe toujours.

Posez à un physicien une question trop difficile, et il aura le réflexe professionnel de répondre : « Demandez-moi quelque chose de plus simple. » La physique progresse en étudiant des modèles simples qui capturent certains éléments d'une réalité complexe. Les chercheurs ont ainsi travaillé sur de nombreux modèles restreints de la gravitation quantique, par exemple des approximations valables lorsque la gravitation est faible, ou sur des cas particuliers tels que les trous noirs. Une autre approche consiste tout simplement à négliger une dimension de l'espace et à étudier comment la gravitation s'exerce alors. On parle d'approche 2 + 1 dimensionnelle, pour deux dimensions spatiales et une dimension temporelle. Les principes qui gouvernent la gravitation dans cet univers simplifié pourraient s'appliquer à notre Univers tridimensionnel et livrer de précieux indices pour l'unification.

L'idée d'oublier une dimension a déjà connu son heure de gloire. Le roman *Flatland*, publié en 1884 par Edwin Abbott, dépeint les aventures d'un carré, habitant d'un « monde plat », à deux dimensions, peuplé de triangles, de carrés et autres figures géométriques. Bien que ce roman se voulût en fait une satire de la société victorienne, il a aussi déclenché une vague d'intérêt pour la géométrie dans diverses dimensions et a toujours du succès à l'heure actuelle auprès des mathématiciens et des physiciens.



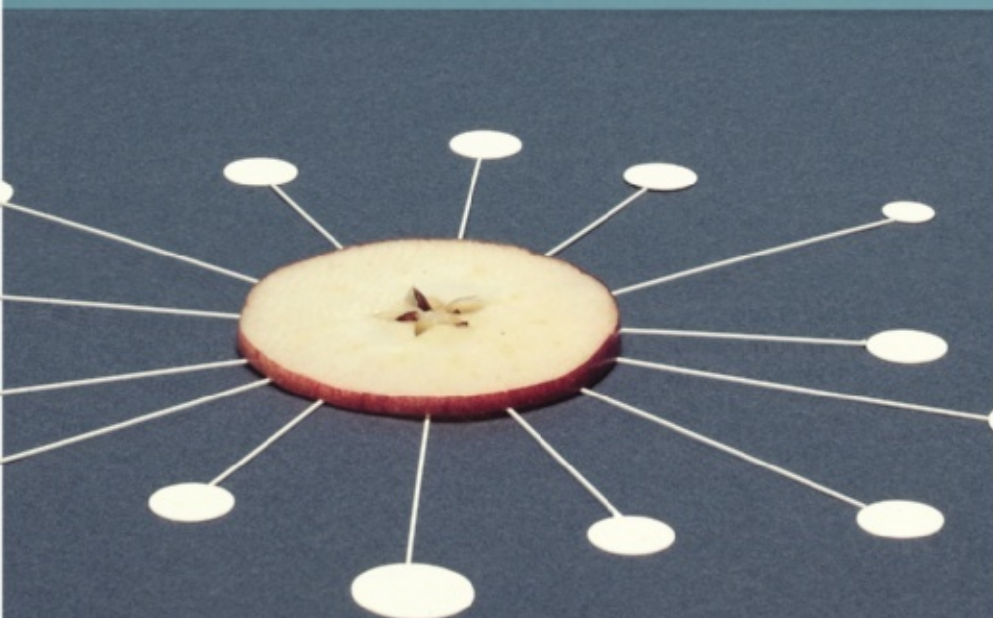
Les premières études de la gravitation dans un monde à deux dimensions, dans les années 1960, furent décevantes. L'espace plan semblait être dépourvu de gravitation, car cette interaction – plus précisément les ondes gravitationnelles – n'a littéralement pas assez d'espace pour se propager. À la fin des années 1980, cependant, le sujet renaît quand les chercheurs s'aperçoivent que la gravitation fonctionne d'une façon inattendue dans un espace à deux dimensions. Certes, deux masses ne s'attirent pas selon la loi de Newton (avec une force proportionnelle à l'inverse du carré de la distance), mais la gravitation joue néanmoins sur la forme générale de l'espace et pourrait même y engendrer des trous noirs. Récemment, la gravitation en deux dimensions a apporté un éclairage sur certains concepts fondamentaux de la gravitation quantique, tels que le principe holographique ou la question de l'émergence du temps à partir d'un cadre atemporel.

Afin de développer une théorie quantique pour une interaction donnée, les physiciens partent en général de la théorie classique correspondante, et cherchent à la réécrire en appliquant les principes quantiques. Pour la gravitation, le point de départ est la relativité générale. C'est là que les ennuis commencent.

Selon la relativité générale, la gravitation n'est pas une force, mais une manifestation de la géométrie de l'espace-temps lui-même. La Terre tourne autour du Soleil non pas parce qu'une force s'exerce sur elle, mais parce qu'elle se déplace en suivant le chemin le plus court dans l'espace-temps, qui est courbé par la masse du Soleil. Unifier la mécanique quantique et la gravitation signifie ainsi quantifier d'une manière ou d'une autre la structure même de l'espace-temps, et pas simplement une interaction.

Pourquoi est-ce difficile ? L'une des pierres angulaires de la physique quantique est le principe d'incertitude de Heisenberg. Selon ce principe, les quantités physiques fluctuent de façon aléatoire et ne peuvent pas être fixées avec une précision infinie toutes en même temps. Dans une théorie quantique de la gravitation, l'espace et le temps eux-mêmes fluctuent, ce qui ébranle tout l'échafaudage de la physique classique. Sans un espace-temps donné *a priori* en toile de fond, nous ne savons pas décrire

Kyle Bean



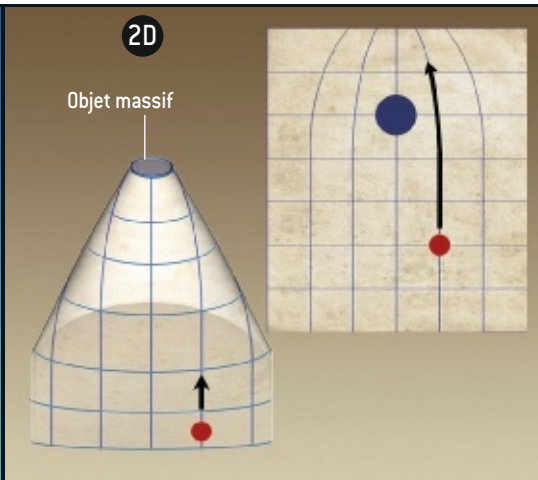
COMMENT LA GRAVITATION FONCTIONNE EN 2D

Si l'on aplatisait un espace tridimensionnel pour le réduire à deux dimensions, les objets deviendraient plats, mais ce n'est pas tout. La force de gravitation, notamment, aurait un comportement complètement différent. Imaginer com-

ment fonctionnerait la gravitation en deux dimensions est une étape utile pour élaborer une théorie quantique de la gravitation, qui réconcilierait la théorie de la relativité générale d'Einstein avec la physique quantique.

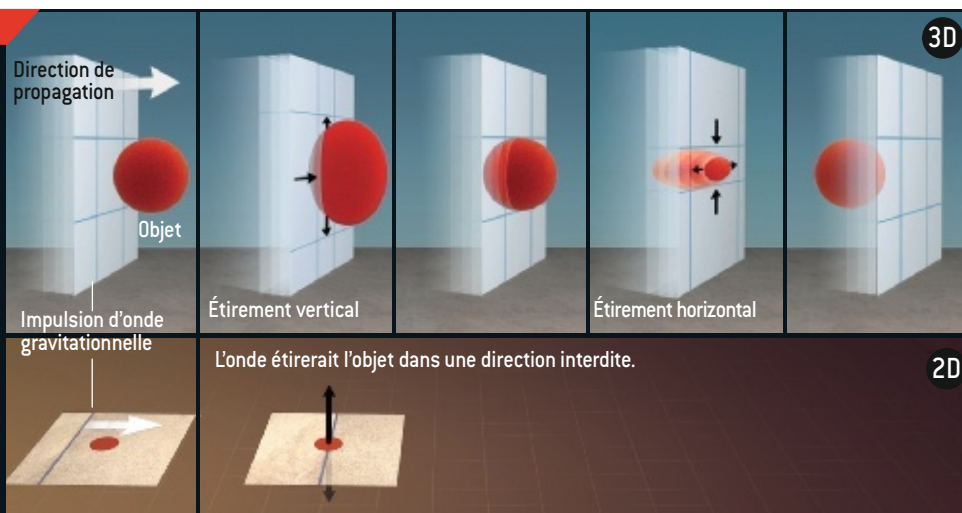
UNE ATTRACTION DIFFÉRENTE

Un objet massif courbe l'espace. En trois dimensions, cette distorsion a pour effet que deux objets s'attirent comme le décrit la loi de l'attraction universelle de Newton. En deux dimensions, un objet massif déforme l'espace en lui imprimant une forme conique. Les trajectoires des objets sont toujours déviées, mais selon une loi qui n'est plus celle de Newton.



LES ONDES IMPOSSIBLES

D'après la relativité générale, les variations du champ gravitationnel se propagent sous la forme d'ondes gravitationnelles, qui sont fondamentalement tridimensionnelles : elles étirent périodiquement les objets dans les deux directions perpendiculaires à l'axe de propagation (*en haut*). Elles ne peuvent se propager en deux dimensions (*en bas*). Or sans ondes gravitationnelles, on ne sait pas quantifier la gravitation.



DES TROUS NOIRS EXISTENT

Les trous noirs sont des régions où les objets peuvent pénétrer, mais dont ils ne peuvent sortir en raison de l'attraction gravitationnelle intense de l'objet central. L'une des découvertes les plus surprenantes de la théorie de la gravitation en deux dimensions est que des trous noirs peuvent exister dans l'espace bidimensionnel à condition que l'espace contienne de l'énergie sombre. En raison d'effets quantiques, les trous noirs, en 3D comme en 2D, émettent un faible rayonnement thermique dit de Hawking.



Malcolm Godwin

les positions, les vitesses, les accélérations et les autres grandeurs de base de la physique. En d'autres termes, nous ne savons pas donner un sens précis à l'espace-temps quantique.

Ces obstacles à la définition d'un espace-temps quantifié se manifestent de plusieurs façons. L'une d'entre elles est le célèbre « problème du temps ». Le temps est fondamental dans la réalité que nous observons. Presque toutes les théories physiques sont en fin de compte une description de la façon dont certaines grandeurs varient au cours du temps. Il importe donc de savoir précisément ce que signifie le concept de « temps ». Mais en réalité, nous ne le savons pas.

Pour Newton, le temps était absolu, hors de la nature. Les formulations habituelles de la mécanique quantique intègrent cette idée d'un temps absolu. Les théories de la relativité restreinte puis générale, en revanche, ont détrôné le temps absolu. Des observateurs en mouvement relatif ont une perception différente de l'écoulement du temps, et ne peuvent s'accorder sur la simultanéité de deux événements. Le rythme d'une horloge est plus lent dans un champ gravitationnel intense. Dans la théorie de la relativité, le temps n'est plus un simple paramètre externe, mais une composante dynamique de l'espace-temps.

Cependant, s'il n'y a pas d'horloge idéale universelle, existant « en dehors »

de la réalité matérielle, l'écoulement apparent du temps doit émerger de la structure même de l'Univers. Mais comment ? On ne sait même pas par où commencer pour répondre à cette question.

Pas de temps ni de coordonnées absolus

Le problème du temps a un cousin moins célèbre : le problème des observables. La physique est une science empirique. Une théorie doit faire des prédictions testables portant sur des quantités observables. En physique classique, ces quantités sont affectées à des positions spécifiques. On calcule l'intensité du champ électrique « ici » ou la probabilité de trouver un électron « là ». Les lieux sont étiquetés avec des coordonnées, et les théories prédisent comment les observables dépendent des valeurs de ces coordonnées spatiales et du temps.

Or d'après la théorie de la relativité, les coordonnées spatiales sont des étiquettes artificielles et arbitraires, et il n'existe pas de repère absolu. Mais si vous ne pouvez pas identifier objectivement un point dans l'espace, vous ne pouvez prétendre savoir ce qui s'y passe. Charles Torre, de l'Université de l'État de l'Utah, a montré qu'une théorie quantique de la gravitation ne peut pas avoir d'observables purement locales, c'est-à-dire des observables dont les valeurs dépendent d'un seul point de l'espace-

temps. Les scientifiques en quête d'une telle théorie doivent composer avec des observables non locales, dont la valeur dépend de plusieurs points en même temps (c'est notamment le cas des systèmes quantiques intriqués). De façon générale, on ne sait pas comment définir de tels objets, et encore moins les utiliser pour décrire le monde que nous observons.

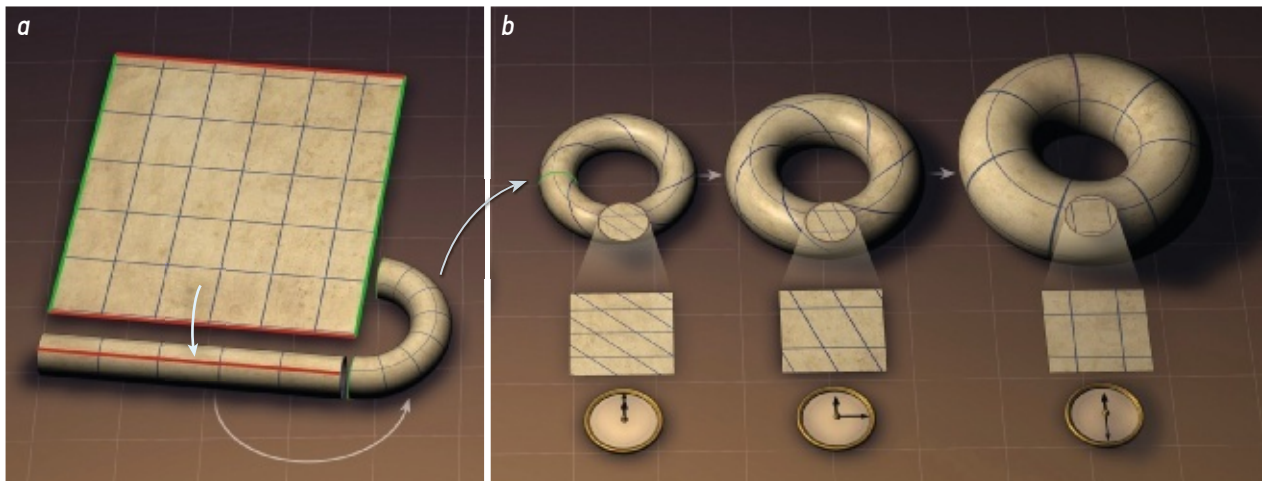
Un troisième problème est celui de la naissance de l'Univers. A-t-il surgi à partir de rien ? Décrit-il un cycle éternel de périodes d'expansion suivies d'effondrements ? Est-ce une bulle en expansion au sein d'un univers parent ? Chaque possibilité pose un problème différent pour une théorie quantique de la gravitation.

Enfin, toute une série de questions concernent les trous noirs, objets parmi les plus mystérieux. Ces astres extrêmes offrent une fenêtre sans équivalent sur la nature ultime de l'espace et du temps. Au début des années 1970, le Britannique Stephen Hawking a montré que les trous noirs ne sont pas totalement noirs. Ils doivent émettre un rayonnement similaire à celui d'un corps noir, c'est-à-dire le rayonnement de tout objet porté à une certaine température. La température reflète habituellement le comportement sous-jacent des composants microscopiques d'un système. Dire qu'une pièce est chaude, c'est dire que les molécules d'air qui la remplissent sont agitées. Dans le cas d'un trou noir, la nature

COMMENT QUANTIFIER LA GRAVITATION EN DEUX DIMENSIONS

En deux dimensions, la gravitation ne peut pas se propager. Contrairement à la situation tridimensionnelle, elle ne modifie pas la courbure de l'espace, mais modifie sa forme globale. Les physiciens ont étudié un modèle d'univers torique, obtenu par exemple en recollant les côtés opposés d'un carré du plan deux à deux [a]. L'univers torique évolue au fil du temps sous

l'influence de la gravitation en des tores de tailles et de proportions différentes [b] (ces changements se traduisent par la variation d'une grandeur nommée module). Ce qui se passe dans chaque petite région de l'espace [zooms] reflète l'état global de l'espace. Dans ce modèle, le microcosme et le macrocosme sont inextricablement liés.



Malcolm Godwin



Muséum national
d'Histoire naturelle

Écologie acoustique



des chiroptères d'Europe

Identification des
espèces, études de
leurs habitats et
comportements
de chasse

Michel Barataud

Animaux nocturnes, les chiroptères ont développé un système de repérage dans l'espace du type sonar. Inaudibles à l'oreille humaine, les cris des chauves-souris peuvent être perçus, enregistrés et analysés grâce à différents appareils et logiciels.

Cet ouvrage dresse le bilan des connaissances acquises par l'auteur depuis plus de vingt ans en matière de détection ultrasonore. Aux premières approches, purement auditives, il ajoute une autre dimension : l'identification par l'analyse informatique des ultrasons. Grâce aux détecteurs de plus en plus performants et à l'analyse informatique, la méthode décrite permet d'identifier en Europe environ 85 % des contacts acoustiques, de mener des inventaires et d'entreprendre des études toujours plus fines sans perturber les animaux. Ce livre traite 33 des 42 espèces de chauves-souris européennes.

DVD en supplément

Vous y trouverez les échantillons sonores illustrant la méthode ainsi que les fichiers (graphiques) nécessaires à l'identification des espèces.



ISBN : 978-2-85653-685-8

format 170 x 245 mm • impression quadri
nombreuses photos • DVD • 344p. • 49,90 € TTC

ouvrage en vente dans la librairie des Publications
Scientifiques face à la Grande Galerie de l'Évolution

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES DU MUSÉUM

Commandes et renseignements :

Muséum national d'Histoire naturelle
Publications scientifiques
Case postale 41 • 57 rue Cuvier • 75231 Paris cedex 05
Tél. : 01 40 79 48 05 • Fax : 01 40 79 38 40
diff.pub@mnhn.fr • <http://www.mnhn.fr/pubsci>

de ces composants microscopiques susceptibles de prendre différents états reste inconnue. Appelés « degrés de liberté », ils devraient être décrits dans le cadre d'une théorie quantique de la gravitation.

De prime abord, l'espace à deux dimensions semble peu prometteur pour chercher des réponses à ces questions. En 1963, le physicien polonais Andrzej Staruszkiewicz a déterminé une loi de la gravitation en deux dimensions en appliquant la relativité générale. Alors qu'en trois dimensions, la présence d'un objet massif courbe doucement l'espace-temps, en deux dimensions, elle tord l'espace pour former un « cône » centré sur l'objet, comme un « cornet de frites » fait d'une feuille de papier enroulée (voir l'encadré page 74). Un petit objet qui passe près du sommet du cône voit sa trajectoire défléchie, de la même façon que le Soleil courbe la trajectoire d'une comète. En 1984, le Hollandais Gerard 't Hooft et les Américains Stanley Deser et Roman Jackiw ont déterminé comment des particules quantiques (c'est-à-dire représentées par des fonctions d'onde) se déplaceraient dans un tel espace.

La déformation de l'espace bidimensionnel qu'induit la gravitation est beaucoup plus simple que le motif complexe de courbure qu'elle crée dans notre Univers tridimensionnel : la géométrie du cône reste essentiellement plane. En conséquence, il n'y a pas d'équivalent de la loi de l'attraction newtonienne. Deux corps initialement immobiles l'un à côté de l'autre ne « tomberont » pas l'un vers l'autre.

Un modèle simpliste ?

Cette simplicité est séduisante, et laisse penser que quantifier la gravitation à deux dimensions est plus facile que quantifier la relativité générale complète en trois dimensions d'espace. Malheureusement, la théorie de A. Staruszkiewicz est trop simple : elle ne possède pas assez de degrés de liberté pour être quantifiée. Un espace à deux dimensions ne laisse aucune place aux ondes gravitationnelles, un élément important de la théorie d'Einstein.

Considérons le cas plus simple de l'électromagnétisme. Les champs électriques et magnétiques sont produits par des charges et des courants électriques. Comme l'a montré James Clerk Maxwell, les variations de ces champs se propagent librement sous forme d'ondes électromagnétiques. Dans la version quantique de la théorie de Maxwell, l'énergie de ces ondes est véhiculée par des quanta, les photons, particules qui transmettent l'interaction électromagnétique. De la même façon, les variations du champ gravitationnel de la relativité générale se propagent sous forme d'ondes gravitationnelles, et une théorie quantique de la gravitation devrait associer à ces ondes des particules nommées gravitons, médiatrices de l'interaction gravitationnelle.

Mais les ondes gravitationnelles sont fondamentalement tridimensionnelles : le champ varie périodiquement dans deux directions perpendiculaires à la direction du mouvement (voir l'encadré page 74).

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.

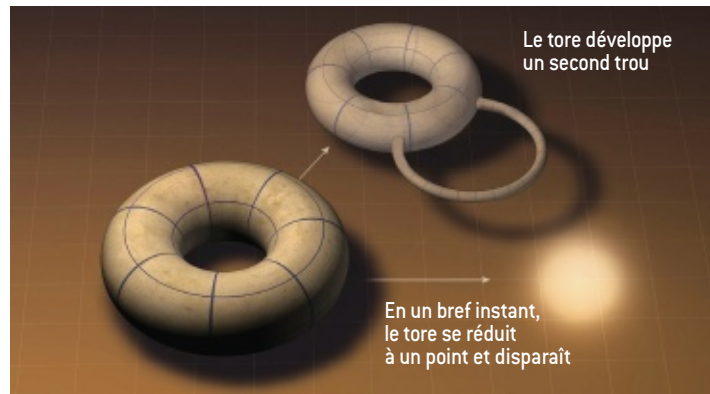
Bien que les tores apparaissent courbes vus de l'extérieur, ils sont plats du point de vue de leur géométrie interne. Ce qui caractérise un tore, c'est qu'on peut décrire une courbe fermée dans deux directions indépendantes, l'une entourant le trou et l'autre perpendiculaire. Cette caractéristique est 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 BIZARRERIES

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.

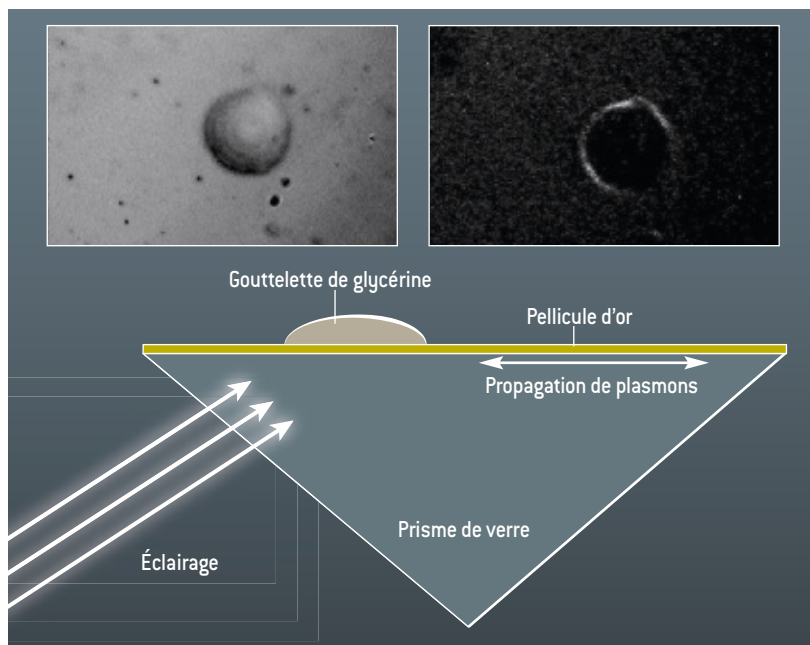
La gravitation en deux dimensions indique par exemple comment le temps pourrait émerger d'un cadre fondamentalement atemporel. Dans l'une des formulations de la théorie, l'univers entier est décrit par une unique fonction d'onde quantique. Mais cette fonction d'onde ne dépend pas explicitement du temps. 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'analogie 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 : Mark Bourke © Philippe Rivetti / Courtesy Getty Images - 402497 - Paris 2011

HISTOIRE DES SCIENCES

Halley, Mairan et les aurores boréales

Quelle est l'origine des aurores boréales ? Le magnétisme terrestre proposé par le Britannique Halley en 1716 ou l'atmosphère solaire invoquée par le Français Dortous de Mairan en 1733 ? La question ne fut résolue qu'au début du XX^e siècle.

Stéphane LE GARS

C'étoit une maniere d'aurore boréale, ou plutôt australe. [...] Un chevron couleur de feu, dont les jambes s'appuyoient l'une à peu près sur l'Orient, & l'autre sur l'Occident.

Au début du XVIII^e siècle, une recrudescence d'aurores boréales en Europe, telle celle décrite ici en février 1730 par un observateur à Montpellier (et rapportée par Mairan), conduit la Société royale de Londres et l'Académie des sciences de Paris à demander des explications rationnelles du phénomène. Celui-ci, en effet, inquiète et effraie la population, qui y voit un événement surnaturel : les aurores boréales, de même que les comètes, les éclipses ou les tremblements de terre, sont accompagnées d'un imaginaire symbolique fort, présageant des

désastres. En Écosse, par exemple, les aurores sont souvent prises pour des batailles ayant lieu dans le ciel, les couleurs rouges représentant des bains de sang. C'est dans ce contexte que les deux sociétés savantes invitent respectivement Edmond Halley et Jean-Jacques Dortous de Mairan, deux astronomes, à proposer une théorie explicative de ces apparitions colorées, fondée sur les lois de la nature.

Alors que Halley invoque des fluides magnétiques émanant des pôles, Mairan, de son côté, refuse de faire intervenir l'électricité ou le magnétisme, pour privilégier le rôle de l'atmosphère solaire. Deux théories s'affrontent alors. Laquelle vainquit ? Les deux, direz-vous : nous savons aujourd'hui que chacune possède une part de vérité, les aurores boréales étant le fruit de l'ionisation

de particules de la haute atmosphère par des particules chargées éjectées du Soleil et piégées dans le champ magnétique terrestre. Pourtant, les choses n'ont pas été aussi simples. Tandis que l'idée de Halley s'imposait dans les milieux savants, confortée au début du XIX^e siècle par les découvertes sur l'électricité et le magnétisme, celle de Mairan fut critiquée, discréditée, et mit plus d'un siècle à faire son chemin, au gré d'arguments scientifiques, mais aussi politiques et économiques.

Un fluide magnétique aimanté par la Terre

C'est à la suite de l'aurore spectaculaire du 6 mars 1716 que Halley propose sa théorie rationnelle du phénomène. Son étude tente de dégager l'aurore tout à la fois d'un imaginaire populaire et d'une explication aristotélicienne qui l'attribue à un phénomène météorologique. Avec Halley, l'aurore reste un phénomène atmosphérique, comme dans la physique d'Aristote, mais dû à des vapeurs brillantes issues de la Terre. En 1714, il penchait pour de la vapeur d'eau brillant dans l'air, car dilatée par un feu souterrain, et teintée de vapeurs soufrées provenant de l'intérieur de la Terre. En 1716, après l'observation de l'aurore du 6 mars, Halley modifie sa théorie : il suppose que les vapeurs ne sont pas aqueuses, mais magnétiques. Il imagine la Terre comme un immense aimant, autour duquel les effluves magnétiques, à l'origine de la lumière observée, se comporteraient comme de la limaille de fer. Sa théorie non seulement explique l'apparition fréquente des aurores près des pôles, mais est renforcée



Archives départementales des Hauts-de-Seine, bibliothèque André-Desguine, cote D1232, photo: Gilles Vannat

1. AUREORE BORÉALE VUE À BREUILLÉPONT, dans l'Eure, le 26 septembre 1731 à 9 heures, par Jean-Jacques Dortous de Mairan et rapportée dans son *Traité physique et historique de l'aurore boréale* (2^{nde} édition, 1754).