

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.

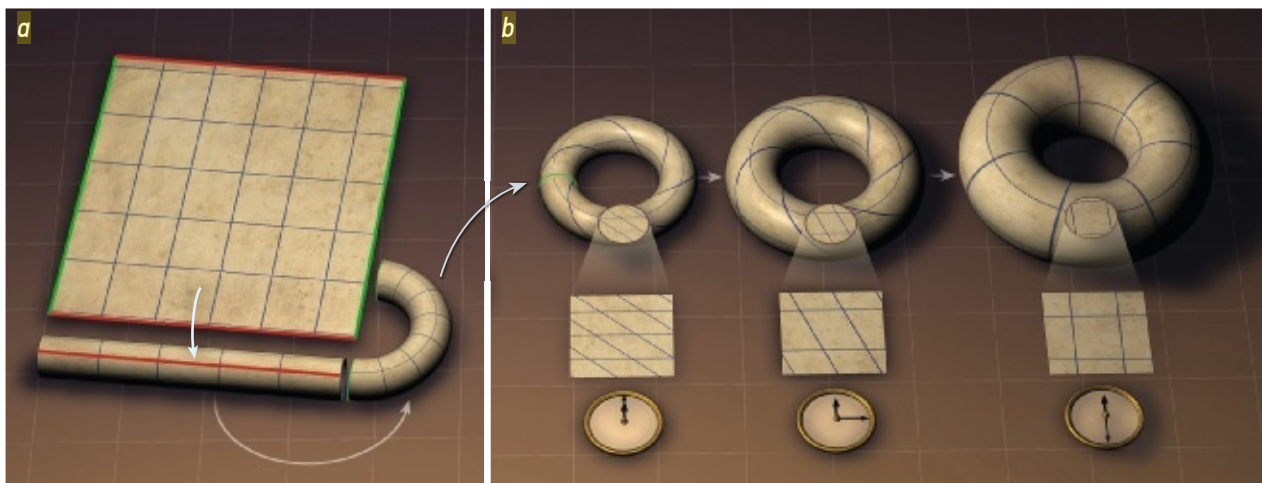
Un troisième problème est celui de la naissance de l'Univers. A-t-il surgi à partir de rien ? Décrit-il un cycle éternel de périodes d'expansion suivies d'effondrements ? Est-ce une bulle en expansion au sein d'un univers parent ? Chaque possibilité pose un problème différent pour une théorie quantique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