

# Des atomes d'espace et de temps

L'espace et le temps semblent continus. Selon la théorie de la « gravitation quantique à boucles », ils seraient, comme la matière, constitués de minuscules entités discrètes.

Lee SMOLIN

est physicien théoricien au *Perimeter institute for theoretical physics*, à l'Université de Waterloo, dans l'Ontario (Canada).

## L'ESSENTIEL

➔ La théorie de la gravitation quantique à boucles a pour objectif de concilier la physique quantique et la relativité générale.

➔ En exprimant deux principes clés de ces théories dans un nouveau formalisme, on montre que l'espace peut être discontinu à très petite échelle.

➔ Les états quantiques d'espace sont représentés par des réseaux de spins et le temps s'écoule par pas discrets.

➔ Alternative à la théorie des cordes, cette approche fournit des prédictions qui pourront être bientôt testées.

**D**epuis l'Antiquité, philosophes et scientifiques caressaient l'idée qu'en divisant la matière en parties assez petites, on finirait par rencontrer des entités minuscules et indivisibles : des atomes. Toutefois, certains pensaient que leur existence ne serait jamais prouvée. Aujourd'hui, nous visualisons des atomes isolés et nous étudions les particules qui les composent. Les caractéristiques granulaires de la matière nous sont devenues familières. Au cours des dernières décennies, des physiciens se sont demandé si l'espace n'était pas, lui aussi, constitué d'entités discrètes. Est-il continu, comme nous l'avons appris à l'école, ou ressemble-t-il davantage à un morceau d'étoffe, tissé de fibres distinctes ? Si nous sondions l'espace à des échelles suffisamment petites, découvririons-nous des « atomes » d'espace, de minuscules volumes irréductibles, impossibles à diviser en constituants plus petits ? Et qu'en est-il du temps ? Le monde physique change-t-il de façon continue, ou, au contraire, évolue-t-il par bonds minuscules, un peu comme un ordinateur ?

Au cours des 20 dernières années, pour tenter de répondre à ces questions, nous avons élaboré une théorie nommée gravitation quantique à boucles (*loop quantum gravity*). Cette dernière prédit que l'espace et le temps sont constitués d'entités fondamentales discrètes, et les calculs faits dans ce cadre révèlent un monde à la fois simple et élégant. La gravitation quantique à boucles éclaire d'une façon nouvelle certains phénomènes étranges, tels les trous noirs et le Big Bang. De surcroît, nous pourrions la mettre à l'épreuve de l'expérience : elle prédit les résultats d'expériences qui nous permettront de savoir si oui ou non les atomes d'espace-temps existent.

Nous avons élaboré cette théorie alors que nous nous heurtions à une difficulté tenace de la physique : la conception d'une théorie quantique de la gravitation. Afin d'expliquer comment cette



Dusan Petric

question nous a conduits aux propriétés granulaires de l'espace-temps, retraçons à grands traits la théorie quantique et la théorie de la gravitation.

### Concilier l'inconciliable

La mécanique quantique, formulée au cours du premier quart du XX<sup>e</sup> siècle, résulte des travaux qui ont confirmé que la matière est constituée d'atomes. Les équations de la mécanique quantique exigent que certaines grandeurs, telle l'énergie d'un atome, ne prennent que des valeurs discrètes. Cette théorie prédit avec succès les propriétés et le comportement des atomes, des particules qui les composent et des forces qui les gouvernent. Elle sous-tend notre compréhension de la chimie, de la physique atomique et subatomique, de l'électronique et même de la biologie.

Simultanément, Albert Einstein construisait la relativité générale, qui est une théorie de la gravitation. Selon cette dernière, la force gravitationnelle découle du fait que l'espace et le temps (l'espace-temps) sont déformés par la présence de matière. On obtient une vague analogie de ce phénomène en plaçant une boule de bowling sur une mince feuille de plastique où l'on fait aussi rouler une bille. Les deux sphères représentent le Soleil et la Terre, tandis que la feuille de plastique est l'espace lui-même. La boule de bowling creuse une profonde dépression dans la feuille, et la bille suit la pente vers la boule, comme si une force – la gravitation – l'attirait. De même, toute matière ou toute concentration d'énergie déforme la géométrie de l'espace-temps, déviant les particules et les rayons lumineux. Ce phénomène est nommé gravité.



La mécanique quantique et la théorie de la relativité générale d'Einstein ont été, chacune de leur côté, confirmées par l'expérience avec une précision étonnante. Cependant, jusqu'à présent, aucune expérience n'a exploré de systèmes dont la description théorique nécessiterait l'une et l'autre des deux théories. Cela tient au fait que les effets quantiques sont prédominants à très petite échelle, tandis que les effets relevant de la relativité générale requièrent de grandes quantités d'énergie... et ces conditions ne sont réunies qu'exceptionnellement.

Ce manque de données expérimentales s'accompagne d'une difficulté conceptuelle. La relativité générale est une théorie classique, c'est-à-dire non quantique. Or, si la physique, dans son ensemble, est cohérente, il doit exister une théorie unique qui, d'une façon ou d'une autre, rassemble la mécanique quantique et la relativité générale : la gravitation quantique. Puisque la relativité générale traite de la géométrie de l'espace-temps, une théorie quantique de la gravitation sera aussi une théorie quantique de l'espace-temps.

### Des tentatives infructueuses

Les physiciens ont développé un impressionnant outillage mathématique afin de transformer les théories classiques en théories quantiques. Ces méthodes furent appliquées à la relativité générale, mais en vain. Les calculs effectués dans les

années 1960 et 1970 semblaient montrer que la théorie quantique et la relativité générale ne pourraient jamais être combinées correctement (voir *Einstein et la quête d'une théorie unitaire*, par C. Goldstein et J. Ritter, page 86). Il semblait donc nécessaire de recourir à des postulats ou des principes nouveaux, qui n'étaient inclus ni dans la théorie quantique ni dans la relativité générale, par exemple de nouvelles particules, de nouveaux champs, ou toute autre nouvelle entité. À l'aide d'un tel artefact ou d'une nouvelle structure mathématique, on espérait développer une théorie de type quantique qui, lorsqu'on considérerait son approximation dans le domaine classique, redonnerait les résultats de la relativité générale. Afin de conserver les puissantes prédictions de la mécanique quantique et de la relativité générale, ces ingrédients exotiques devaient rester inaccessibles à l'expérience, sauf dans des circonstances exceptionnelles où les deux théories partielles prédisent des effets notables. Parmi les différentes approches relevant de cette stratégie, citons la théorie des twisteurs, la géométrie non commutative ou encore la supergravitation.

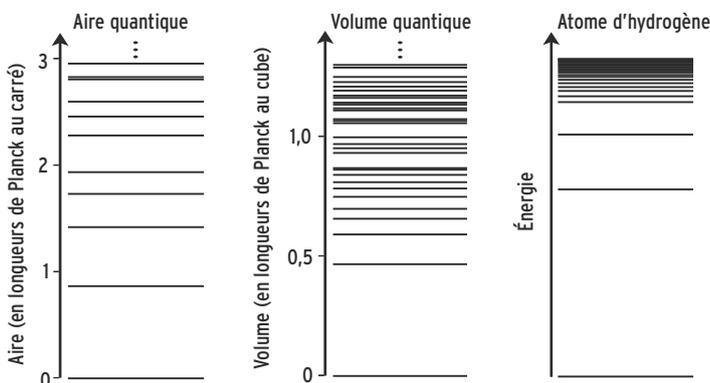
Aujourd'hui, la voie la mieux explorée est celle de la théorie des cordes selon laquelle l'espace a six ou sept dimensions – inobservées – en plus des trois qui nous sont familières. La théorie des cordes prédit un grand nombre de nouvelles particules élémentaires et de forces fondamentales dont l'existence n'est encore qu'hypothétique. Certains physiciens pensent que la théorie des cordes serait elle-même incluse dans une théorie plus vaste, nommée théorie M, mais aucune définition précise n'en a encore été donnée. Pour toutes ces raisons, il faut explorer de nouvelles pistes, et la gravitation quantique à boucles en est une.

Au milieu des années 1980, nous avons été plusieurs, dont Abhay Ashtekar, de l'Université de Pennsylvanie, Ted Jacobson, de l'Université du Maryland, et Carlo Rovelli, de l'Université de Méditerranée à Marseille, à réexaminer les tentatives de quantification de la relativité générale. Nous savions que tous les résultats infructueux obtenus dans les années 1970 reposaient sur l'hypothèse d'un espace continu, quelle que soit l'échelle considérée (de même qu'avant la découverte des atomes, on admettait que la matière était continue). Et si cette hypothèse était fautive ? Les anciens calculs seraient à revoir de fond en comble. Nous avons commencé par chercher une façon de faire les calculs sans supposer que l'espace est lisse et continu. De plus, nous avons veillé à ne faire aucune supposition qui aille au-delà des principes bien établis par l'expérience et déjà contenus dans la relativité générale et dans la mécanique quantique. En particulier, nous avons conservé deux des principes clés de la relativité générale.

F

### ÉTATS QUANTIQUES D'ESPACE

Une des prédictions de la gravitation quantique à boucles concerne la mesure des aires et des volumes. Considérons une coquille sphérique délimitant la frontière *F* d'une région de l'espace (à gauche). Selon la physique classique (c'est-à-dire non quantique), ce volume peut prendre n'importe quelle valeur réelle positive. Au contraire, selon la théorie de la gravitation quantique à boucles, d'une part, il existe un volume minimal absolu non nul (de l'ordre de  $10^{-105}$  mètre cube, soit la longueur de Planck au cube) et, d'autre part, pour les volumes supérieurs à cette limite, les valeurs possibles sont limitées à une série discrète de nombres. De même, l'aire de la surface de la sphère est au moins égale à  $10^{-70}$  mètre carré environ (la longueur de Planck au carré), et ne peut prendre qu'une série discrète de valeurs supérieures. Les valeurs discrètes du spectre des états permis d'aires (ci-dessous à gauche) et de volumes (ci-dessous au centre) sont comparables aux niveaux d'énergie discrets d'un atome d'hydrogène (ci-dessous à droite).



R. De Pietri et C. Rovelli ; N. Strasser

Le premier de ces principes est l'indépendance de fond, stipulant que la géométrie de l'espace-temps est, non pas fixe, mais en perpétuelle évolution. Pour la déterminer, on doit résoudre certaines équations qui décrivent tous les effets de la matière et de l'énergie. À ce propos, la théorie des cordes, telle qu'elle est formulée aujourd'hui, n'obéit pas à ce principe. Les équations qui décrivent les cordes opèrent dans un espace-temps classique (non quantique) prédéterminé.

Le second principe, lié à l'indépendance de fond et désigné par le terme d'invariance par difféomorphisme, se rapporte aux coordonnées dans l'espace d'un événement : on peut choisir n'importe quelle coordonnée d'espace et de temps. Ce système de coordonnées s'apparente à la longitude et à la latitude utilisées à la surface de la Terre, mais sous une forme généralisée à un espace-temps comportant quatre dimensions. Cette invariance garantit que les équations d'une théorie conservent la même forme dans tout système de coordonnées bien choisi. Un point de l'espace-temps n'est défini que par les événements physiques qui s'y déroulent, non par un jeu spécial de coordonnées (aucune

coordonnée n'est « spéciale »). L'invariance par difféomorphisme est un outil puissant qui a guidé Einstein lors des premiers développements de la relativité générale.

### Premiers encouragements

En combinant ces deux principes aux techniques standards de la mécanique quantique, nous avons élaboré un langage mathématique susceptible de nous aider à déterminer si l'espace est discret ou continu. Pour notre plus grande joie, les calculs ont montré que l'espace est quantifié. Nous venons de poser les bases de la théorie de la gravitation quantique à boucles, ce qualificatif provenant du fait que certains des calculs font apparaître de petites boucles dans l'espace-temps. Avec les années, l'étude de la gravitation quantique à boucles a rallié de nombreuses équipes dans le monde. Nos efforts combinés nous permettent d'accorder une grande confiance à l'image de l'espace-temps, dont je vais esquisser les grandes lignes.

La théorie de la gravitation quantique à boucles est une théorie quantique de la structure de l'espace-temps aux échelles infiniment petites. Pour

## Représentation des états quantiques d'espace

Les physiciens qui étudient la gravitation quantique à très petite échelle à l'aide de diagrammes qualifiés de réseaux de spins. Certains de ces diagrammes correspondent à des volumes en forme de polyèdres. Ainsi, un cube (*a*) est un volume délimité par six faces carrées. Le réseau de spins correspondant (*b*) est un point, ou nœud, représentant le volume, d'où partent six lignes correspondant aux six faces. On complète le réseau en attribuant au nœud et aux lignes des nombres qui indiquent respectivement le volume du cube et l'aire de chaque face. Ici, le volume est égal à huit longueurs de Planck au cube et les faces mesurent chacune quatre longueurs de Planck au carré. Les règles de la gravitation quantique à boucles restreignent les valeurs permises pour les aires et les volumes à certaines quantités spécifiques, telles que seules certaines combinaisons de lignes et de nœuds sont permises. Si l'on place une pyramide sur l'une des faces du cube (*c*), la ligne représentant cette face dans le réseau de spins doit relier le nœud correspondant au cube au nœud correspondant à la pyramide (*d*). Les lignes qui représentent les faces exposées des deux polyèdres s'éloignent de leur nœud respectif (par souci de clarté, nous n'avons pas indiqué les nombres). En général, dans un réseau de spins, une surface composée d'un seul quantum d'aire est représentée par une ligne unique (*e*), tandis qu'une surface composée de plusieurs quanta est représentée par autant de lignes (*f*). De même, un quantum de volume est représenté par un nœud (*g*), tandis qu'il en faut plusieurs pour représenter des volumes supérieurs (*h*). Quand une région de l'espace est définie par une sphère, le volume, à l'intérieur de l'enveloppe, correspond à la somme de tous les nœuds inclus et l'aire de sa surface est donnée par la somme de toutes les lignes qui la traversent. Les réseaux de spins sont plus fondamentaux que les représentations à base de polyèdres : tout arrangement de polyèdres peut être représenté à l'aide d'un réseau de spins, mais certains réseaux de spins représentent des combinaisons de volumes et d'aires qu'on ne peut dessiner sous forme de polyèdres. On rencontre ces réseaux de spins lorsque l'espace est courbé par un champ gravitationnel intense ou lors des fluctuations quantiques de la géométrie de l'espace à l'échelle de Planck.

*a* *b* *c* *d* *e* *f* *g* *h*

Un quantum d'aire  
Surface d'aire supérieure  
Un quantum de volume  
Volume supérieur

N. STRASSER

expliquer ses principes, examinons ce qu'elle prédit pour un volume microscopique de l'espace. Précisons d'abord les grandeurs physiques mesurées. Considérons une région, quelque part dans l'espace, délimitée par une frontière  $F$  (voir l'encadré page 94). Cette frontière peut correspondre à une limite matérielle concrète, telle une coquille de fer, ou être définie par la géométrie de l'espace-temps lui-même, par exemple l'horizon d'un trou noir (c'est-à-dire la surface à l'intérieur de laquelle rien, pas même la lumière, ne peut échapper à l'emprise gravitationnelle du trou noir).

Et si nous mesurions le volume de cette région ? Quels sont les résultats autorisés à la fois par la mécanique quantique et par l'invariance par difféomorphisme ? Si le résultat peut être un nombre

réel quelconque, c'est que la région étudiée peut avoir n'importe quelle taille (aussi proche de zéro qu'on le souhaite). Dans ce cas, la géométrie de l'espace est continue. En revanche, si le résultat de la mesure ne peut prendre qu'un ensemble de valeurs discrètes non nulles et ne peut être inférieur à une certaine valeur minimale, la géométrie de l'espace est granulaire.

### Quanta d'aire et de volume

Le calcul de l'énergie des électrons circulant autour d'un noyau atomique pose le même type de problème. La mécanique classique prédit qu'un électron peut avoir une quantité quelconque d'énergie, tandis que la mécanique quantique n'autorise que certaines valeurs et que l'on ne mesure

## Évolution temporelle de la géométrie

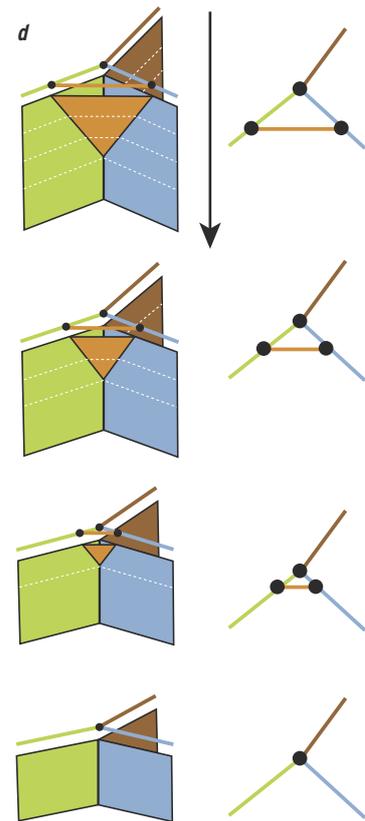
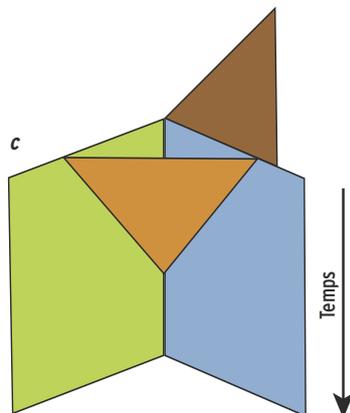
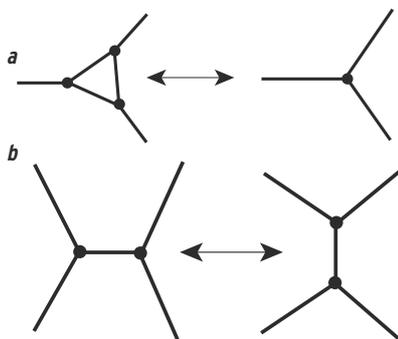
Les modifications de la forme de l'espace – par exemple, lorsque la matière et l'énergie s'y déplacent ou que des ondes gravitationnelles le traversent – sont représentées par des réarrangements discrets, s'effectuant par sauts sur le réseau de spins. Imaginons qu'un groupe de trois quanta de volume interconnectés (a) fusionne pour former un quantum de volume unique. Le processus inverse est aussi permis. Deux volumes peuvent aussi changer leur façon de diviser l'espace (b) et de se connecter aux volumes adjacents. Dans une représentation à base de polyèdres, on verrait les deux polyèdres fusionner par leur face commune, puis se diviser comme un cristal que l'on casse le long d'un plan de clivage différent. Ces sauts ont lieu sur le réseau de spins lorsque des modifications à grande échelle se produisent dans la géométrie de l'espace, mais aussi, sans cesse, à cause des fluctuations quantiques.

On peut représenter ces sauts d'une autre façon en ajoutant la dimension temporelle à un réseau de spins. Le résultat est qualifié de mousse de spins (c). Les lignes du réseau de spins deviennent des surfaces, et les nœuds des lignes. Quand on considère une tranche de cette mou-

se de spins coupée à une date donnée, on obtient un réseau de spins. En coupant une série de tranches à divers instants, on obtient les images d'un film retraçant l'évolution du réseau de spins (d). Cette évolution, qui apparaît de prime abord continue, est, en fait, discontinue. Tous les réseaux de spins qui incluent la ligne orange (les trois premières séquences) représentent la même géométrie de l'espace. La longueur de la ligne orange n'a aucune importance, tout ce qui compte pour la géométrie c'est la façon dont les lignes sont connectées et les nombres qui les étiquettent. Ces nombres déterminent la taille des quanta de volume et de surface, et leurs dimensions. Ainsi, dans le diagramme (d), la géométrie reste constante au cours des trois premières séquences, comportant trois quanta de volume et six de surface. Puis, la géométrie change brusquement, pour ne plus présenter qu'un quantum de volume et trois de surface sur la dernière séquence. Ainsi, le temps défini par une mousse de spins s'écoule selon une série de pas discrets, et non de façon continue.

Même si la comparaison de ces séquences avec les images d'un film est pratique pour visualiser

le principe, il est plus exact de comprendre l'évolution de la géométrie comme les « tics-tacs » discrets d'une horloge. Au « tic », le quantum d'aire représenté en rouge est présent, au « tac », il disparaît. En fait, c'est la disparition de ce quantum qui définit le « tic-tac ». L'intervalle de temps qui sépare un « tic » d'un « tac » est approximativement égal au temps de Planck, soit  $10^{-43}$  seconde : le temps n'existe pas entre les deux. Pas plus qu'il n'y a d'eau entre une molécule d'eau et sa plus proche voisine.



A et B : F. Markopoulou / C : Rovelli, N. Strasser

jamais d'énergie comprise entre ces valeurs. La distinction est analogue à celle qui sépare la mesure d'une quantité s'écoulant continûment (l'eau, telle qu'on l'imaginait au XIX<sup>e</sup> siècle) et la mesure d'une quantité dénombrable (les atomes dans cette eau).

La théorie de la gravitation quantique à boucles prédit que l'espace est discontinu, c'est-à-dire que les résultats possibles de la mesure expérimentale d'un volume sont contenus dans un ensemble discret de valeurs. On peut aussi mesurer l'aire de la frontière  $F$ . Les calculs fondés sur notre théorie indiquent que cette aire est, elle aussi, quantifiée. Autrement dit, l'espace n'est plus continu, mais constitué de quanta d'aire et de volume.

La valeur de ces quanta d'aire et de volume est calculée à partir d'une grandeur nommée longueur de Planck, liée à l'intensité de la gravitation, à la taille des quanta et à la vitesse de la lumière ; elle vaut  $10^{-35}$  mètre et correspond à l'échelle au-dessous de laquelle la géométrie de l'espace ne peut plus être considérée comme continue. La plus petite aire possible est comparable au carré de la longueur de Planck, soit  $10^{-70}$  mètre carré. Le plus petit volume non nul est de l'ordre de la longueur de Planck au cube, c'est-à-dire  $10^{-105}$  mètre cube. Ce quantum d'espace est minuscule ! Ainsi, la théorie prédit qu'il y a  $10^{105}$  « atomes de volume » dans un mètre cube d'espace, beaucoup plus qu'il n'y a de mètres cubes dans l'Univers observable ( $10^{91}$ ) !

### Des réseaux de spins

L'espace quantifié est-il constitué d'une multitude de petits cubes ou de petites sphères ? Non, ce n'est pas aussi simple, mais nous pouvons dessiner des diagrammes qui représentent ces états quantiques d'aire et de volume. Pour comprendre comment fonctionnent ces diagrammes, imaginez que nous ayons un morceau d'espace en forme de cube (voir l'encadré page 95). Dans notre diagramme, ce cube sera un point d'où partent six lignes, chacune représentant une face du cube. Nous écrivons un nombre près du point qui indique le volume et un nombre sur chaque ligne, correspondant à l'aire de la face représentée par cette ligne.

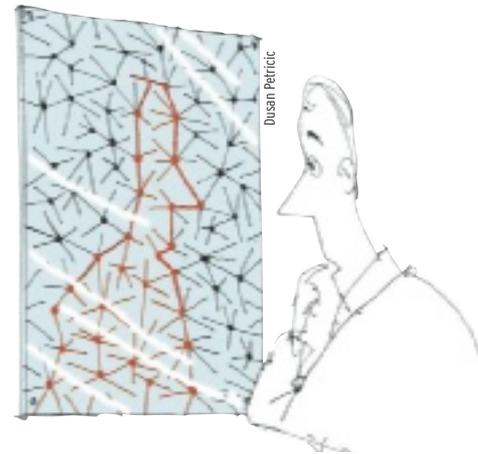
Supposons que l'on pose une pyramide au-dessus du cube. Ces deux polyèdres, qui ont une face commune, seraient représentés par deux points reliés par une ligne (la face qui joint les deux volumes). Le cube a cinq autres faces et nous dessinons cinq lignes qui partent du point correspondant. La pyramide en a quatre, représentées par quatre lignes issues du second point. Ainsi, nous savons comment il faut procéder pour représenter, à l'aide de ces diagrammes, des arrangements compliqués comportant des polyèdres plus complexes que des cubes ou des pyramides : chaque polyèdre est représenté par un point, ou nœud, et chaque face plane par une ligne. Ces lignes

relient les nœuds de la même façon que les faces forment les polyèdres. Les mathématiciens qualifient ces diagrammes de graphes.

Dans notre théorie, nous oublions les polyèdres et nous ne conservons que les graphes. Les mathématiques qui décrivent les états quantiques de volume et d'aire nous fournissent des règles qui déterminent la façon dont les nœuds et les lignes peuvent être connectés, et quels nombres peuvent être associés à tel point ou à telle ligne. Chaque état quantique peut être représenté par l'un de ces graphes, et chaque graphe qui obéit aux règles du jeu correspond à un état quantique possible. Les graphes sont pratiques pour résumer tous les états quantiques possibles de l'espace. Les graphes représentent mieux les états quantiques que les polyèdres. En effet, certains graphes correspondant à des états quantiques possibles sont connectés d'une façon trop particulière pour être traduits par un empilement de polyèdres jointifs. Par exemple, si l'espace est courbé, on ne peut dessiner de polyèdres qui s'emboîtent correctement, alors que l'on peut dessiner un graphe, et l'on sait déterminer la courbure de l'espace qu'il représente. Puisque cette courbure est la cause de la gravitation, ces diagrammes prennent en compte la gravitation.

Bien que par souci de simplicité nous dessinions souvent des graphes à deux dimensions, il vaut mieux se les représenter dans un espace à trois dimensions. Cependant, nous devons éviter un piège conceptuel : les nœuds et les lignes ne sont pas localisés dans l'espace. En fait, chaque graphe est défini par la façon dont ses éléments sont connectés et par leurs relations avec des frontières bien définies, telle la frontière  $F$ . L'espace continu que ces graphes occupent dans notre imagination n'existe pas en tant que tel. Tout ce qui existe, ce sont les nœuds et les lignes : ils sont l'espace, et la façon dont ils sont connectés représente la géométrie de cet espace.

Ces graphes sont qualifiés de réseaux de spins, parce qu'ils sont utilisés pour étudier les spins. Dans les années 1960, Roger Penrose, de l'Université d'Oxford, a, le premier, suggéré que ces réseaux pourraient aussi jouer un rôle dans la gravitation quantique. En 1994, nous avons constaté que des calculs précis confirmaient son intuition. Chaque nœud et chaque ligne de ces diagrammes définissent une petite portion d'espace. Un nœud correspond en général à une longueur de Planck au cube, et une ligne est souvent une surface d'une longueur de Planck au carré. Toutefois, en principe, rien ne limite la taille ou la complexité d'un diagramme de spins. Si nous



LA MATIÈRE existe aux nœuds d'un réseau de spins.

### LES UNITÉS DE LA GRAVITÉ QUANTIQUE

**Longueur de Planck** obtenue en combinant les constantes fondamentales de la relativité ( $c$ , la vitesse de la lumière), de la gravitation ( $G$ ) et de la physique quantique ( $\hbar$ , la constante de Planck) :  $10^{-35}$  mètre.

**Temps de Planck** égale à la longueur de Planck divisée par la vitesse de la lumière :  $10^{-43}$  mètre.

**Énergie de Planck** égale à la constante de Planck divisée par le temps de Planck :  $10^{28}$  électronvolts.

pouvions dessiner un diagramme détaillé de l'état quantique de notre Univers – la géométrie de tout l'espace courbée et cisailée par l'action gravitationnelle des galaxies, des trous noirs et des divers constituants –, nous obtiendrions un réseau de spins gigantesque, d'une complexité inimaginable, comportant  $10^{184}$  nœuds !

Les réseaux de spins décrivent la géométrie de l'espace. Qu'en est-il de la matière et de l'énergie contenues dans cet espace, et comment y représentons-nous les particules et les champs ? Les particules élémentaires, par exemple les électrons, sont représentées par certains types de nœuds auxquels nous attribuons, en plus du volume, des étiquettes supplémentaires qui décrivent leurs attributs et propriétés. Les champs, par exemple le champ électromagnétique, sont représentés, eux, par des étiquettes supplémentaires ajoutées sur les lignes du graphe. Le mouvement de ces particules et de ces champs dans l'espace correspond au déplacement par sauts des étiquettes sur le réseau.

### Une mousse de spins

Les particules et les champs ne sont pas les seules entités dynamiques. Selon la relativité générale, la géométrie de l'espace change au cours du temps. Les « bosses » et les « creux » de l'espace se modifient à mesure que la matière et l'énergie se déplacent, et des ondes peuvent le traverser, telles des rides à la surface d'un lac. Dans la gravitation quantique à boucles, les ondes gravitationnelles sont représentées par des modifications dans les graphes. Elles évoluent dans le temps par une succession de sauts, au cours desquels la connectivité des graphes est modifiée.

Lorsque les physiciens décrivent un phénomène à l'aide de la mécanique quantique, ils déterminent les modalités selon lesquelles il peut se produire, et attribuent à chacune une probabilité. De même, en théorie de la gravitation quantique à boucles, nous calculons les probabilités quantiques de chaque saut permis sur le réseau de spins. Avec ces probabilités, la théorie est complètement déterminée, et elle peut prévoir l'issue de telle ou telle expérience.

Les réseaux de spins qui représentent l'espace dans la théorie de la gravitation quantique à boucles adaptent le concept d'espace-temps de la relativité d'Einstein sous la forme de ce que nous nommons une « mousse » de spins. En ajoutant une dimension supplémentaire – le temps –, les lignes et les nœuds d'un réseau de spins deviennent respectivement des surfaces bidimensionnelles et des lignes. Les points de transition où le réseau de spins change (correspondant aux sauts sur le réseau) sont représentés par des nœuds où se croisent les lignes dans la mousse.

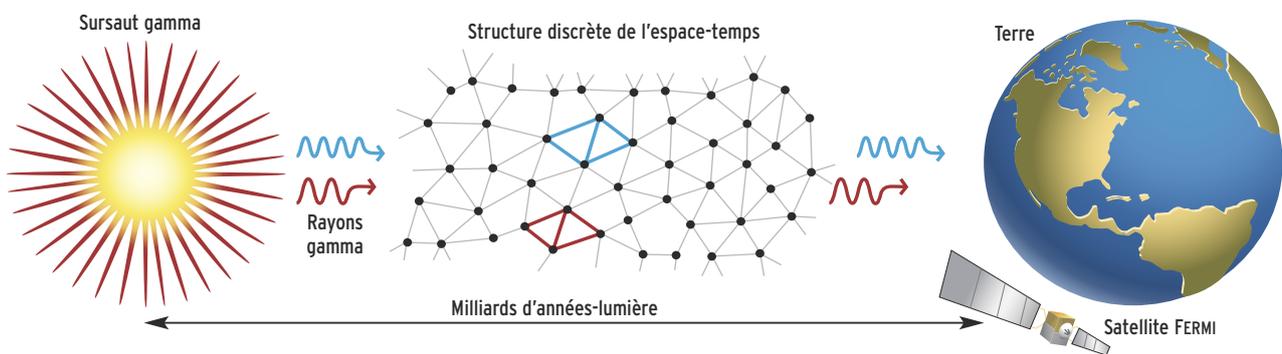
Dans la conception de l'Univers qui fait appel à l'espace-temps, un instantané du monde n'est autre qu'une tranche découpée dans l'espace-temps. De la même façon, lorsque l'on découpe une telle tranche dans une mousse de spins, on obtient un réseau de spins. Il serait cependant incorrect d'imaginer que cette tranche se transforme de façon continue le long de la dimension temporelle de la mousse de spins. Au contraire, de même que l'espace est défini par la géométrie discrète du réseau de spins, le temps est défini par la séquence des différents sauts qui président au réarrangement du réseau (*voir l'encadré page 96*). De cette façon,

## UNE VITESSE DE LA LUMIÈRE VARIABLE ?

Les sursauts gamma, émis à des milliards d'années-lumière de distance, fourniront un moyen de tester les prédictions de la théorie quantique à boucles. Ils concentrent une grande quantité de photons de haute énergie en un laps de temps très court. Selon la gravitation quantique à boucles, quand un photon se déplace dans la mousse

de spins, il occupe plusieurs lignes à chaque instant (bien plus que sur la figure). La structure discrète de l'espace conduit les rayons gamma de plus haute énergie à se déplacer plus vite que ceux d'énergie inférieure. La différence est infime, mais ses effets s'accumulent pendant les milliards d'années que dure leur voyage. Si l'on observait que les

rayons gamma émis par un même sursaut atteignent la Terre à des moments légèrement différents selon leur énergie, cela constituerait une preuve en faveur de la théorie de la gravitation quantique à boucles. Le satellite *Fermi-GST* (*Gamma-ray spatial telescope*) de la NASA, lancé en 2008, pourra mener à bien cette expérience.



le temps apparaît, lui aussi, discret : il ne s'écoule pas tel un flot continu, mais comme les « tics » et les « tacs » d'une horloge, chacun durant à peu près un temps de Planck (la longueur de Planck divisée par la vitesse de la lumière), soit  $10^{-43}$  seconde. Pour être plus précis, disons que, dans notre Univers, le temps s'écoule comme le tic-tac d'une multitude d'horloges puisque, dans un sens, un quantum de temps s'écoule en chaque point de la mousse où un saut quantique est effectué.

### Une théorie à éprouver

Hélas l'échelle de Planck est si petite qu'il est impossible de tester directement nos prédictions. Dès lors, comment éprouver notre théorie ? Il est d'abord impératif de vérifier que la relativité générale est bien une approximation de la théorie de la gravité quantique à boucles. Si l'on compare les réseaux de spins aux fibres tissées qui constituent une étoffe, cela revient à se demander si l'on pourrait retrouver les propriétés élastiques de cette étoffe en calculant une moyenne sur des milliers de fibres. Autrement dit, moyennés sur de nombreuses longueurs de Planck, les réseaux de spins décrivent-ils la géométrie de l'espace et son évolution d'une façon compatible avec « l'étoffe » continue de la théorie classique d'Einstein ? Récemment, les théoriciens ont progressé dans des cas particuliers, pour certaines configurations de l'étoffe pourrait-on dire. Ainsi, on a montré que les ondes gravitationnelles de grande longueur d'onde, se déplaçant dans un espace plan (c'est-à-dire sans courbure), peuvent être décrites comme des excitations de certains états quantiques de notre théorie.

On peut aussi étudier ce que la gravitation quantique à boucles apporte comme éléments nouveaux à certains mystères apparus dans le cadre des théories actuelles, par exemple, les questions que soulève la thermodynamique des trous noirs. Les théoriciens ont établi des prédictions concernant la thermodynamique des trous noirs, en utilisant une théorie approximative et hybride où la matière est traitée à l'aide de la mécanique quantique, mais dont l'espace-temps est absent. Une théorie complète de la gravitation quantique devrait reproduire ces prédictions. Dans les années 1970, Jacob Bekenstein, à l'Université hébraïque de Jérusalem, postula qu'il fallait attribuer aux trous noirs une entropie (liée au désordre) proportionnelle à leur surface. Peu de temps après, Stephen Hawking en déduisit que les trous noirs, en particulier les plus petits, doivent émettre du rayonnement. Ces prédictions comptent parmi les résultats les plus importants de la physique théorique obtenus au cours des 30 dernières années.

Pour faire ces calculs dans le cadre de la gravitation quantique à boucles, nous choisissons la fron-

tière  $F$  correspondant à l'horizon d'un trou noir. Lorsque nous analysons l'entropie des états quantiques adéquats, nous retrouvons les résultats de J. Bekenstein. La théorie reproduit aussi les prédictions de S. Hawking concernant le rayonnement des trous noirs, et en fournit d'autres quant à la structure fine du spectre de ce rayonnement. Si nous observons un jour un trou noir microscopique, cette prédiction pourra être testée par l'étude du spectre du rayonnement qu'il émet. Hélas, dans le cadre de notre théorie, ceci pourrait n'avoir lieu que dans un futur lointain, car nous ne disposons pas des techniques nécessaires pour fabriquer un trou noir, aussi petit fût-il.

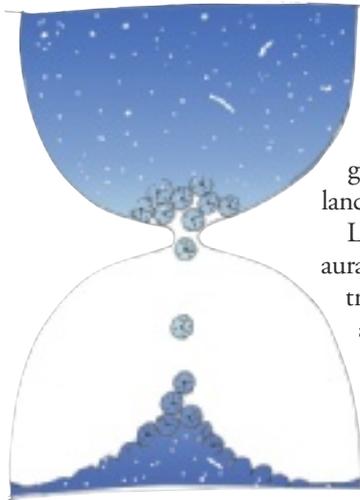
Tout test expérimental de la théorie de la gravitation quantique à boucles apparaît comme un immense défi technique. Les effets caractéristiques de la théorie ne deviennent significatifs qu'à l'échelle de Planck, à laquelle les minuscules quanta d'aire et de volume deviennent perceptibles. Aujourd'hui, l'échelle de Planck est inférieure de 16 ordres de grandeur à celle que l'on pourra tester dans les plus puissants accélérateurs en construction (plus la distance à sonder est petite, plus l'énergie nécessaire est grande). Par conséquent, on n'atteindra pas l'échelle de Planck de cette façon.

Toutefois, des chercheurs ont imaginé de nouvelles façons de tester dès aujourd'hui la gravitation quantique à boucles. Ces méthodes reposent sur la propagation de la lumière à travers le cosmos. Lorsque la lumière se déplace dans un milieu, sa longueur d'onde subit des altérations telles que la réfraction ou la diffraction. Ces phénomènes doivent aussi se produire dans le cas où les photons (ou d'autres particules) se déplacent dans l'espace granulaire décrit par un réseau de spins. L'amplitude de ces effets serait proportionnelle au quotient de la longueur de Planck par la longueur d'onde de la lumière. Pour le rayonnement visible, ce rapport est inférieur à  $10^{-28}$ , et il est de l'ordre d'un milliardième pour les rayons cosmiques les plus puissants jamais observés. Ainsi, pour tous les rayonnements que nous pouvons détecter, les effets de la structure granulaire de l'espace-temps sont infimes. Toutefois, ces effets s'accumulent lorsque les distances parcourues sont très longues. Or, dans le cas de cataclysmes astrophysiques, tels que les sursauts gamma, nous détectons des photons et des particules émis sur une vaste gamme d'énergie au cours d'une explosion très brève, et qui ont parcouru plusieurs milliards d'années-lumière.

Rodolfo Gambini, de l'Université d'Uruguay, Jorge Pullin, de l'Université de Louisiane, notamment, ont calculé, dans le cadre de la théorie de la gravitation quantique à boucles, que des photons émis au même moment à diverses énergies devraient



L'ESPACE est tissé avec des fibres.



LE TEMPS s'écoule, comme les « tics » et les « tacs » d'innombrables horloges.

voyager à des vitesses légèrement différentes et, par conséquent, nous parvenir à des moments distincts. Nous pouvons rechercher ces effets dans les données recueillies par les satellites qui enregistrent les sursauts gamma, comme le télescope spatial *Fermi-GST*, lancé en juin 2008 (voir les encadrés pages 98 et 66). La constitution granulaire de l'espace-temps aurait aussi un effet sur les rayons cosmiques de très haute énergie. Il y a plus de 30 ans, des astrophysiciens ont établi que les particules cosmiques (par exemple des protons émis par une supernova) dont l'énergie dépasse  $3 \times 10^{19}$  électronvolts doivent être diffusées par les photons du fond diffus cosmologique qui emplit l'espace ; par conséquent, aucune particule cosmique dépassant cette énergie ne devrait jamais atteindre la Terre. Cette énergie serait toutefois élevée par la structure discrète de l'espace, de sorte que si nous observions des protons cosmiques de plus haute énergie, nous aurions un indice en faveur de notre théorie. Hélas, les observations récentes des rayons cosmiques d'ultra-haute énergie par l'Observatoire *Auger*, en Argentine, ont confirmé la valeur de l'énergie de diffusion des rayons cosmiques par le fond diffus cosmologique, réduisant à néant notre espoir de détecter par ce moyen l'aspect granulaire de l'espace.

### Des indices cosmiques

La gravitation quantique à boucles ne se contente pas de faire des prédictions sur certains phénomènes spécifiques, comme les protons cosmiques de très haute énergie. Elle ouvre une nouvelle fenêtre sur des questions cosmologiques, telle l'origine de notre Univers. Nous pouvons utiliser la théorie pour étudier des périodes toutes proches du commencement du temps, juste après le Big Bang. La relativité générale prédit qu'il y a eu un commencement au temps, un premier moment, mais cette conclusion ne tient pas compte de la physique quantique. Martin Bojowald, de l'Institut Max Planck de physique gravitationnelle, à Golm, en Allemagne, a récemment démontré, dans le cadre de la gravitation quantique à boucles, que la « grande explosion » du Big Bang est, en fait, un grand rebond : avant ce rebond, l'Univers était en contraction rapide. Les théoriciens travaillent d'arrache-pied pour établir des prédictions sur l'état de l'Univers primordial qui pourraient être testées lors de futures observations cosmologiques. Il n'est pas impossible que l'on découvre, de notre vivant, des indices sur ce qui se passait avant le Big Bang.

La constante cosmologique – une énergie de densité positive ou négative qui imprégnerait l'espace vide – constitue une question tout aussi importante. À la fin des années 1990, l'observation de supernovae lointaines et l'étude du fond de rayon-

nement cosmologique ont fourni des indices suggérant que cette énergie existe et qu'elle est positive, ce qui signifie qu'elle accélère l'expansion cosmique. Cette densité d'énergie positive est compatible avec la gravitation quantique à boucles. Ceci a été démontré dès 1989, lorsque Hideo Kodama, de l'Université de Kyoto, formula les équations décrivant l'état quantique exact d'un univers doté d'une constante cosmologique positive.

### « La » théorie attendue ?

La gravitation quantique à boucles soulève encore bien des questions auxquelles il nous faut répondre. Certaines sont des problèmes techniques qui devront être clarifiés. Nous aimerions également savoir si la relativité restreinte doit être modifiée aux très hautes énergies, et, dans l'affirmative, comment. Jusqu'ici, nos spéculations ne sont pas solidement reliées à la gravitation quantique à boucles.

Nous voudrions aussi savoir si la relativité générale est une bonne approximation de la théorie de la gravitation quantique à boucles à des échelles bien supérieures à l'échelle de Planck, quelles que soient les circonstances (nous ne l'avons vérifié que pour des états décrivant la propagation d'ondes gravitationnelles assez faibles sur un espace-temps plan). Enfin, nous voudrions savoir si la gravitation quantique à boucles permet la description des différentes interactions de la nature – y compris la gravitation – comme des aspects différents d'une unique force fondamentale. Des travaux conduits par Laurent Friedel, dans notre Institut, et ceux du groupe de Carlo Rovelli montrent que la force gravitationnelle émerge de l'espace-temps quantique. Par ailleurs, avec Sundance Bilson-Thompson, à l'Université d'Adélaïde (Australie), et Fotini Markopoulou, de notre Institut, nous avons montré que des diagrammes en forme de tresse se propagent au sein du réseau de spins comme des particules. Ainsi les particules ne seraient que des nœuds dans la topologie de l'espace.

Notre théorie occupe une place importante dans le développement actuel de la physique. En effet, elle est la traduction quantique de la théorie de la relativité générale, parce qu'elle ne repose sur aucune supposition au-delà des principes de base de la théorie quantique et de la relativité générale. Un résultat remarquable – à savoir que l'espace-temps est discontinu et décrit par des réseaux et par des mousses de spins – émerge des mathématiques de la théorie elle-même et n'est pas un postulat *ad hoc*.

Pourtant, toute cette discussion reste théorique. Peut-être, malgré tout, l'espace est-il réellement continu, quelle que soit l'échelle à laquelle on le considère. Si tel est le cas, les physiciens devront adopter des postulats plus radicaux, tels ceux de la théorie des cordes : l'expérience tranchera. La bonne nouvelle est qu'on le saura peut-être rapidement. ■

### livre

• L. SMOLIN, *Rien ne va plus en physique. L'échec de la théorie des cordes*, Dunod, 2007.

### articles

• M. BOJOWALD, *L'Univers rebondissant*, in *Pour la science*, n° 375, janvier 2009.  
 • P. RAMON, *Le monde des cordes est-il le nôtre ?*, in *Pour la Science*, n° 300, octobre 2002.