

développer la théorie de la relativité restreinte, puis générale.

L'expérience de C. Hogan s'appuie elle aussi sur des interféromètres, plus élaborés, pour tenter de mettre en évidence une hypothétique toile de fond invisible de l'espace-temps, qui rappelle l'idée de l'éther. En utilisant deux interféromètres placés l'un à côté de l'autre, il compte sonder l'échelle de Planck, la plus petite échelle de l'Univers, celle où l'information existe sous forme de bits.

Sonder l'échelle de Planck

La longueur de Planck n'est pas simplement petite, c'est la plus petite. Une masse regroupée dans un volume plus petit correspondrait à moins d'un quantum d'énergie, ce qui est impossible.

L'échelle de Planck est plus que celle où la théorie de la relativité générale et la théorie quantique achoppent. Depuis quelques dizaines d'années, un débat sur la nature des trous noirs a fait émerger

une compréhension nouvelle de l'échelle de Planck. L'essence de l'Univers serait l'information, dont les bits constitutifs seraient encodés dans la trame de l'espace-temps à l'échelle de Planck.

Selon un principe fondamental de la physique, l'information ne disparaît jamais. Elle peut changer de forme, être brouillée, mélangée, mais elle subsiste à un niveau fondamental. Même lorsque ce magazine aura été réduit en pâte à l'usine de recyclage, l'information qui y est imprimée sera réorganisée sous une autre forme, mais pas effacée. En théorie, ce processus peut être inversé – les mots et les images peuvent être reconstitués à partir de la pâte à papier – même si, en pratique, cela semble impossible. Les physiciens traduisent cela par le fait que l'entropie, quantité qui mesure le nombre de configurations microscopiques compatibles avec l'état macroscopique d'un système, ne peut que croître avec le temps.

Tous les physiciens sont d'accord sur ce principe, sauf dans un cas particulier : qu'advient-il de l'information engloutie

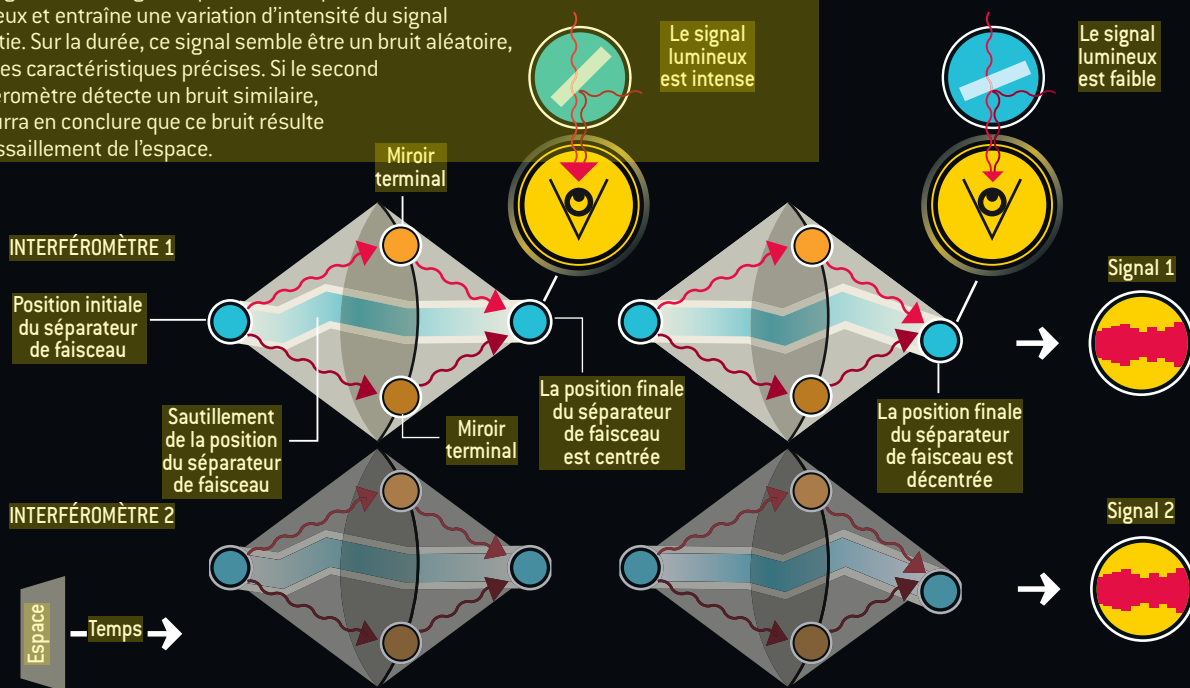
par un trou noir ? En effet, rien, pas même la lumière, ne peut émerger d'un trou noir. Pire, Stephen Hawking a montré en 1975 que les trous noirs ne sont pas immuables : ils perdent de l'énergie en émettant un rayonnement thermique, « s'évaporant » ainsi lentement jusqu'à disparaître. L'information qu'ils renferment est alors perdue à jamais (le rayonnement de Hawking est dépourvu de structure et ne peut restituer l'information contenue dans le trou noir) ! En résumé, selon S. Hawking, l'information qui pénètre dans un trou noir y est irrémédiablement piégée.

Pour Leonard Susskind, de l'Université Stanford, et Gerard 't Hooft, de l'Université d'Utrecht aux Pays-Bas, ce paradoxe de la disparition de l'information soulevé par S. Hawking était tout simplement inacceptable.

Dans les décennies suivantes, ce désaccord a conduit les physiciens à développer une théorie aujourd'hui nommée principe holographique. Selon ce principe, quand un objet tombe dans un trou noir, la matière est définitivement perdue, mais

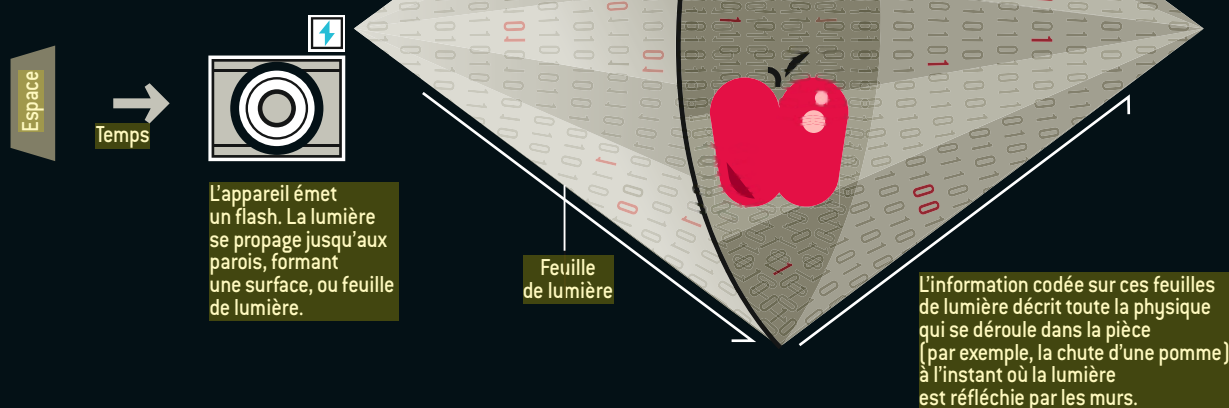
Le tressaillement de l'espace

Si l'espace est discret à l'échelle de Planck, cela devrait se manifester à l'échelle macroscopique par un infime et rapide sautilllement de la position des objets à l'échelle macroscopique. En particulier, le séparateur de faisceau devrait vibrer de façon aléatoire. Ainsi, durant le temps que met la lumière pour parcourir les bras et revenir, le séparateur de faisceau aura légèrement bougé, ce qui décale les phases des faisceaux lumineux et entraîne une variation d'intensité du signal de sortie. Sur la durée, ce signal semble être un bruit aléatoire, avec des caractéristiques précises. Si le second interféromètre détecte un bruit similaire, on pourra en conclure que ce bruit résulte du tressaillement de l'espace.



Leonardo Casella

D'après le principe holographique, le monde tridimensionnel émerge de l'information contenue sur des surfaces bidimensionnelles. Raphael Bousso a proposé en 1999 une interprétation en termes de « feuille de lumière ». Imaginons une pomme qui tombe dans une pièce. Des surfaces qui se propagent vers l'intérieur d'un volume à la vitesse de la lumière contiennent toute l'information sur les objets présents dans ce volume et les processus physiques qui s'y déroulent. On peut visualiser ces feuilles de lumière comme le flash lumineux d'un appareil photo qui fait « apparaître » un objet en train de tomber dans une pièce.



Léandro Castéjo

L'AUTEUR

Michael MOYER est rédacteur au magazine *Scientific American*.

l'information qu'elle porte est, d'une façon ou d'une autre, sauvegardée à la surface du trou noir – plus précisément à l'horizon des événements, la surface virtuelle de non-retour, en deçà de laquelle la lumière ne peut plus revenir. Ainsi, l'horizon des événements se double d'un grand livre d'archives. L'information n'est pas perdue.

Des bits d'information à la surface des trous noirs

Dans les années 1980, Raphael Sorkin, de l'Université de Syracuse, a montré que l'entropie fondamentale d'un trou noir vaut un quart de la surface de son horizon mesurée en unités égales à l'aire de Planck. En d'autres termes, sur l'horizon du trou noir, chaque petit carré dont le côté mesure deux longueurs de Planck contient un bit d'information. Ainsi, un trou noir de un centimètre de diamètre – ou plutôt, sa surface – renferme 10^{66} bits d'information. Il s'agit de l'entropie fondamentale, qui mesure les états microscopiques de l'espace à l'échelle la plus fondamentale. La

nature de ces bits d'information, ou degrés de liberté, reste cependant inconnue à ce jour faute d'une théorie complète de la gravitation quantique.

Cette conception selon laquelle l'information comprise dans une région d'espace dépend de sa surface et non de son volume est plus qu'une astuce pour résoudre le paradoxe de l'information des trous noirs. L. Susskind et G. 't Hooft ont étendu l'idée à l'Univers entier en 1993. Selon le principe holographique, à l'instar d'un hologramme qui enregistre une image en trois dimensions sur une pellicule à deux dimensions, toute l'information sur l'univers tridimensionnel qui nous entoure serait encodée sur des surfaces bidimensionnelles (qui restent à déterminer).

Depuis, il a été montré que ce principe est valable pour certains modèles d'espace-temps. Le physicien argentin Juan Maldacena a par exemple établi en 1997 qu'une théorie des supercordes dans un espace-temps dit anti-de Sitter à cinq dimensions est équivalente à une théorie quantique des champs sur la frontière de cet espace-temps.

En 1999 et 2000, Raphael Bousso, maintenant à l'Université de Californie à Ber-