



Notre idée s'appuie sur de nombreux travaux réalisés ces dernières décennies. Citons notamment un article publié en 1976 par Werner Israel, alors à l'université de l'Alberta, au Canada, sur la thermodynamique des trous noirs. En 2006, Shinsei Ryu et Tadashi Takayanagi, à l'université de Californie à Santa Barbara, ont étudié la relation entre l'intrication et la géométrie de l'espace-temps. Mais c'est surtout un article récent d'Ahmed Almheiri, Donald Marolf, Joseph Polchinski et James Sully, tous alors à l'université de Californie à Santa Barbara, qui nous a incités à regarder de plus près le lien entre intrication quantique et trous de ver. Ces chercheurs ont réexaminé ce que nous savions des trous noirs. Et ils ont mis au jour un paradoxe.

Les trous noirs brûlent-ils ?

Une question majeure concernant les trous noirs est celle de la perte d'information. En effet, toute information qui traverse l'horizon des événements d'un trou noir ne peut en ressortir. *A priori*, cette information ne serait pas réellement perdue, mais juste hors de portée, pour nous autres

à l'extérieur du trou noir. Mais avec les travaux de Stephen Hawking, le sort de l'information est devenu moins trivial. Pour un observateur distant, un trou noir qui rayonne perd de la masse. Il s'évapore jusqu'à disparaître complètement. Que devient l'information (que le rayonnement de Hawking ne peut transporter, en raison de sa nature aléatoire) ? Les physiciens en débattent encore car, en physique quantique, un principe fondamental impose la conservation de l'information.

Les trous noirs violent-ils ce principe ? Pas nécessairement. En 1997, j'ai apporté un élément de réponse en développant le principe holographique. Ce modèle établit une équivalence mathématique entre un univers tridimensionnel régi par la gravitation (qui peut donc contenir des trous noirs) et un univers bidimensionnel dépourvu de gravitation, qui borde l'espace tridimensionnel. Ainsi, la description de l'évolution d'un trou noir en trois dimensions, où le problème de la conservation de l'information se pose, peut être réalisée à l'aide de champs vivants dans un espace à deux dimensions, où le problème ne se pose pas car, sans gravitation, il n'y a pas de trous noirs ! En conséquence, puisque l'information

est préservée dans l'univers 2D, elle l'est nécessairement dans l'univers 3D.

Cependant, cela n'explique pas ce que devient l'information. Dans les années 1990, Leonard Susskind a montré que le rayonnement de Hawking peut porter l'information s'il constitue un système de particules intriquées entre elles. Mais un nouveau problème surgissait : chaque particule du rayonnement de Hawking est *a priori* corrélée à son partenaire tombé dans le trou noir. Or, d'après un principe nommé monogamie de l'intrication, une particule ne peut être simultanément intriquée avec deux systèmes différents (ici, le partenaire tombé dans le trou noir et l'ensemble du rayonnement de Hawking émis par le trou noir).

Pour résoudre cette difficulté, Joe Polchinski et ses collègues ont alors supposé que les intrications des paires étaient rompues au niveau de l'horizon des événements du trou noir. Mais ce phénomène devrait s'accompagner d'une libération d'énergie qui, à l'échelle de l'astre, devient importante au voisinage de l'horizon, ce que les physiciens ont nommé le *firewall* (« mur de feu »). Cette solution a un inconvénient majeur : l'horizon ne serait plus, comme en relativité générale, une frontière virtuelle



© université de Delft

où rien de particulier ne se passe. Mais l'idée ER = EPR, qui stipule que l'intérieur du trou noir fait partie d'un trou de ver reliant l'astre à un autre système, atténue certains aspects de ce paradoxe.

Bien que nous ayons identifié une connexion entre les trous de ver et les états intriqués en considérant des trous noirs, il est tentant de spéculer que le lien est plus général : qu'à chaque fois que nous avons une intrication, nous avons une sorte de connexion géométrique. Il en serait ainsi même dans le cas le plus simple, quand nous n'avons que deux particules intriquées.

Un principe universel ?

Pour en revenir au paradoxe du *firewall*, du fait de l'intrication des paires de particules, l'une s'échappant et l'autre tombant dans le trou noir, un trou de ver devrait les relier et, de fait, les espaces à l'intérieur et à l'extérieur seraient connectés. Pour se faire une image de la situation, le trou noir ressemblerait à une pieuvre géante dont les tentacules (les trous de ver) seraient reliés aux particules du rayonnement de Hawking.

Si l'équivalence entre les trous de ver et l'intrication quantique se généralise, la

connexion spatiale pourrait impliquer de minuscules structures quantiques qui ne suivraient pas notre vision habituelle de la géométrie. Nous ne savons toujours pas décrire ces géométries microscopiques, mais l'intrication de ces structures pourrait, d'une manière ou d'une autre, donner naissance à l'espace-temps lui-même. C'est comme si l'intrication pouvait être considérée comme un fil reliant deux systèmes. Quand la quantité d'intrication augmente, nous avons beaucoup de fils, et ensemble ces fils pourraient tisser la trame de l'espace-temps. Dans cette représentation, les équations de la relativité d'Einstein régissent les connexions et les reconnexions de ces fils, tandis que la physique quantique serait l'essence de la construction de l'espace-temps.

Pour le moment, ce tableau relève encore d'une spéculation débridée, mais plusieurs indices pointent vers lui, et de nombreux physiciens se penchent sur ses implications. L'hypothèse de l'équivalence entre intrication et trous de ver fournit une piste pour développer une description quantique de l'espace-temps – ainsi qu'une unification très attendue, et jusqu'à présent insaisissable, de la relativité générale et de la physique quantique. ■

L'INTRICATION QUANTIQUE

et sa nature non locale sont testées avec des dispositifs de plus en plus complexes afin d'éliminer toute faille possible dans l'interprétation. En 2015, l'équipe de Ronald Hanson de l'université de Delft, aux Pays-Bas, a réalisé l'une des expériences les plus abouties, à l'aide de deux dispositifs distants de 1,3 kilomètre.

BIBLIOGRAPHIE

L. Susskind, ER=EPR, GHZ, and the consistency of quantum measurements, *Fortschritte der Physik*, vol. 64(1), pp. 72-83, 2016.

J. Polchinski, L'horizon des trous noirs brûle-t-il ?, *Pour la Science*, n° 456, octobre 2015.

R. Cowen, The quantum source of space-time, *Nature*, vol. 527, pp. 290-293, 2015.

J. Maldacena et L. Susskind, Cool horizons for entangled black holes, *Fortschritte der Physik*, vol. 61(9), pp. 781-811, 2013.