



1997

Juan Maldacena propose la dualité qui porte son nom.

2004

Stephen Hawking admet que l'information est préservée dans un trou noir.



2013

Joseph Polchinski postule l'idée de mur de feu.

Par ailleurs, une particule ne peut pas être complètement intriquée en même temps avec deux systèmes quantiques différents (des particules ou des groupes de particules). L'intrication est exclusive ou «monogame».

Dans le cas du trou noir, considérons une particule du rayonnement de Hawking, notée B, émise lorsque le trou noir est plus qu'à moitié évaporé. Le processus de Hawking implique que B fait partie d'une paire et que sa partenaire A tombe dans le trou noir. Les particules A et B sont intriquées. Cependant, en accord avec le principe de complémentarité des trous noirs, l'information qui est tombée dans le trou noir lors de sa formation est encodée dans l'ensemble des particules du rayonnement de Hawking. Donc, si l'information n'est pas perdue, la particule B doit être intriquée avec une combinaison C des autres particules du rayonnement de Hawking qui se sont déjà échappées. Mais il y a alors une contradiction: la particule B est intriquée avec deux systèmes différents, A d'une part, C d'autre part. On a ici un cas de polygamie!

Comment respecter les règles de la physique quantique et ne pas perdre l'information dans le trou noir? La solution est de rompre l'intrication entre A et B, apparues sous la forme d'une paire particule-antiparticule sur l'horizon des événements. Dans la théorie quantique, la rupture d'un lien d'intrication, comme celle

d'une liaison chimique, se traduit par une libération d'énergie. Casser l'intrication de toutes les paires virtuelles sur l'horizon des événements conduit à peupler cette région en particules de haute énergie. Autrement dit, l'horizon devient un «mur de feu».

le raisonnement était simple, et nous ne trouvions pas de faille. D'une certaine façon, nous avons repris à l'envers l'argument original de Stephen Hawking, en supposant que l'information n'est pas perdue et en regardant où cette hypothèse mènerait. Nous avons conclu qu'il y avait une faille dans la relativité générale. Lorsque nous avons exposé notre raisonnement à d'autres physiciens, la réaction initiale était un grand scepticisme, auquel succédait une perplexité comparable à la nôtre.

Soit ces étranges murs de feu existent vraiment, soit il semble que nous devrions une fois de plus envisager de renoncer à certains principes de la théorie quantique. Il se peut que l'information ne soit pas détruite, mais peut-être qu'une réécriture de la physique quantique est à prévoir.

Malheureusement, l'observation de trous noirs réels ne tranchera pas la question: tout rayonnement émanant d'un mur de feu serait très faible et difficile à voir.

Si les murs de feu existent, ils pourraient avoir des conséquences étonnantes. L'une d'elles est qu'ils pourraient marquer la fin de l'espace. Les conditions pour que l'espace-temps se forme n'existeraient pas à l'intérieur du trou noir. Donald Marolf a avancé l'idée que l'intérieur ne peut pas se former parce que «la mémoire quantique du trou noir est pleine». Si l'espace-temps ne peut pas se trouver à l'intérieur, alors

Le mur de feu est une manifestation de la limitation de nos formulations actuelles de la gravité quantique

Un astronaute qui chuterait vers le trou noir, plutôt que de traverser l'horizon en douceur, rencontrerait un milieu extrême.

La découverte d'une telle rupture avec la relativité générale (un mur d'énergie à un endroit où rien de particulier ne devrait se passer) était dérangeante, mais

Selon Samir Mathur, de l'université d'État de l'Ohio, un trou noir ne consisterait pas en une singularité de densité infinie entourée d'un horizon des événements, et ne comporterait pas de mur de feu. Il s'agirait plutôt d'une frontière de l'espace-temps, nommée *fuzzball*, composée de cordes, ces objets élémentaires introduits par la théorie du même nom.

Cette modélisation résout de nombreux problèmes, comme la présence d'une singularité et la non-conservation de l'information. En effet, la surface de la *fuzzball*, structurée par les cordes fondamentales, est rendue floue (*fuzzy* en anglais) par les effets quantiques et est située juste au-delà de la position de l'horizon selon la relativité générale.

Pour certains physiciens, l'absence de singularité et d'horizon rend la *fuzzball* plus proche de l'étoile à neutrons que du trou

noir. Il s'agirait de l'état de la matière le plus compact possible. La surface de la *fuzzball* n'entoure cependant pas un volume de matière répartie dans l'espace, elle marque la fin quantique de ce dernier.

Il existe tout de même certaines similarités avec le trou noir. Samir Mathur a montré que l'aire d'une *fuzzball* de masse donnée est presque identique à celle de l'horizon des événements d'un trou noir classique de même masse. Il a de

plus calculé son entropie, qui correspond à l'agencement des cordes, et a obtenu un résultat voisin de la formule de Bekenstein pour un trou noir.

La *fuzzball* émet par ailleurs un rayonnement dont les caractéristiques rappellent le rayonnement de Hawking des trous noirs. Néanmoins, le trou noir et la *fuzzball* se distinguent par leur description quantique, ce qui est important pour la question de la conservation de l'information.

La difficulté ne se présente pas avec la *fuzzball*, car il n'y a pas d'horizon des événements. L'information contenue dans la matière lors de sa formation s'échappe avec le rayonnement et il est possible, en théorie, de la reconstituer, contrairement au cas du trou noir.

En ce qui concerne la matière qui tombe sur une *fuzzball*, Samir Mathur pense que, par interaction avec la surface, elle induit des vibrations quantiques de cette dernière. L'information apportée s'ajouterait alors à celle de la *fuzzball* sans être perdue, et un observateur en chute libre vers une *fuzzball* suffisamment massive ressentirait quasiment ce que prédit la relativité générale pour un trou noir : rien de spécial puis un écartèlement chaotique.

Le mur de feu proposé par Joseph Polchinski et ses collègues n'existerait pas en raison d'une hypothèse injustifiée dans leur étude. Ces divers travaux restent toutefois très spéculatifs et le débat est loin d'être clos.

— Sean Bailly

BIBLIOGRAPHIE

A. Almheiri et al., *Black holes : complementarity or firewalls ?*, *JHEP*, vol. 2013, n° 2, article 62, 2013.

R. Parentani, *Les prédictions de Stephen Hawking*, *Dossier Pour la Science*, n° 75, avril-juin 2012.

L. Susskind, *Trous noirs : la guerre des savants*, Robert Laffont, 2010.

J. Maldacena, *La gravité est-elle illusion ?*, *Pour la Science*, n° 339, janvier 2006.

l'espace prend fin à l'horizon, et l'astronaute qui y tombe se dissout en bits quantiques d'information au niveau de cette frontière. Et si le mur de feu existe, quelles seraient les implications pour les trous noirs réels, tel celui qui occupe le centre de la Voie lactée ? Il est trop tôt pour le dire.

Pour éviter des scénarios aussi étranges, les physiciens ont tenté de contourner la conclusion du mur de feu. Une piste consiste à dire que la particule B du rayonnement de Hawking peut être intriquée à la fois avec A et avec C si la particule A fait partie du système C : la particule se trouvant sous l'horizon est, d'une certaine façon, le même bit d'information que celui encodé dans le rayonnement de Hawking, même s'ils se trouvent à des endroits très différents.

Cette notion rejoint l'idée originale de complémentarité des trous noirs, mais pour faire de ce scénario un modèle concret, il semble encore nécessaire de modifier la physique quantique. Une façon radicale d'éviter cette difficulté est l'idée de Juan Maldacena et Leonard Susskind consistant à supposer que, dans chaque paire, les particules intriquées sont connectées par un microscopique trou de ver spatio-temporel. Une autre approche est de partir du principe que l'horizon des événements n'existe pas (voir l'encadré ci-dessus).

Stephen Hawking pensait que la relativité générale s'applique correctement aux trous noirs tandis que la physique quantique y atteint ses limites. Juan Maldacena concluait que la physique quantique n'est pas modifiée, mais que l'espace-temps est holographique. Peut-être la vérité se trouve-t-elle à mi-chemin.

Beaucoup d'idées ont été avancées, la plupart d'entre elles abandonnant l'un ou l'autre des principes admis de longue date. Il n'y a pas de consensus sur la bonne direction à suivre pour résoudre ces questions. Pour le moment, les chercheurs sont captivés par la découverte d'une nouvelle contradiction entre les deux théories centrales de la physique. Notre incapacité à déterminer si le mur de feu est une réalité traduit la limitation de nos formulations actuelles de la gravitation quantique. Les physiciens doivent repenser leurs hypothèses sur les rouages de l'Univers.

Ces remises en cause feront peut-être naître une compréhension plus profonde de la nature de l'espace-temps et des principes qui sous-tendent toutes les lois de la physique. À terme, en démêlant les paradoxes au cœur du mur de feu des trous noirs, nous réaliserons peut-être la percée nécessaire pour unifier la physique quantique et la relativité générale en une seule théorie. ■