

1972

Jacob Bekenstein développe le concept d'entropie d'un trou noir.



1974

Le théoricien Stephen Hawking découvre l'évaporation d'un trou noir.

.....1976

D'après Stephen Hawking, l'information qui entre dans un trou noir est définitivement perdue.

qu'il en reste un vestige microscopique contenant toute l'information de l'étoile à partir de laquelle il s'est créé. Mais cette « solution » présente ses propres difficultés. Un objet aussi petit contenant autant d'information n'est pas compatible avec la formule de l'entropie énoncée par Jacob Bekenstein et Stephen Hawking.

Une voie alternative est celle de la théorie des cordes. Des physiciens l'ont élaborée pour concilier la relativité générale et la physique quantique et obtenir une théorie quantique de la gravitation. Dans ce cadre, les particules élémentaires ponctuelles du modèle standard sont remplacées par de microscopiques cordes vibrantes. Cette approche parvient à éliminer certaines des difficultés mathématiques qui surgissent quand on tente de combiner la physique quantique et la relativité générale. Aucune confirmation expérimentale ne permet aujourd'hui de la valider, mais la théorie des cordes a été très fructueuse pour traiter les divers problèmes rencontrés sur l'horizon des trous noirs.

Calculer l'entropie avec des cordes

En 1995, je travaillais sur une expérience de pensée avec des cordes dans des espaces confinés. En poursuivant des travaux réalisés quelques années plus tôt avec des collègues, j'ai montré que la théorie des cordes telle que nous la comprenions alors n'était pas complète. Elle imposait en fait l'existence d'autres objets que les cordes unidimensionnelles : des objets nommés D-branes ayant plusieurs dimensions, voire

plus que les trois d'espace et celle de temps qui nous sont familières. La théorie des cordes, elle-même, nécessite de supposer que l'Univers comporte 9 ou 10 dimensions d'espace. Les dimensions supplémentaires sont enroulées sur elles-mêmes de sorte qu'elles échappent à nos sens (de façon similaire, un câble électrique semble unidimensionnel de loin, son épaisseur n'étant perceptible que si l'on s'en approche). Les D-branes seraient enroulées dans ces dimensions supplémentaires. L'année suivante, Andrew Strominger et Cumrun Vafa, tous deux aujourd'hui à l'université Harvard, ont montré que les cordes et les D-branes fournissent le nombre précis de briques

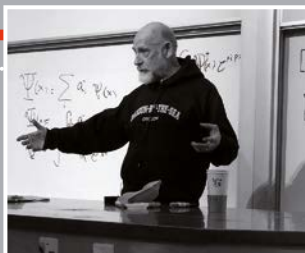


CE TROU NOIR SUPERMASSIF (vue d'artiste) absorbe de la matière, contrairement au trou noir théorique considéré par les physiciens qui étudient le mur de feu. Ici, un disque d'accrétion s'est formé autour du trou noir ; la matière qu'il contient s'échauffe par frottement et rayonne.

© NASA/JPL-Caltech

1990-1993

Gerard 't Hooft et Leonard Susskind postulent le principe de « complémentarité des trous noirs ».



1995

Joseph Polchinski développe l'idée de D-branes en théorie des cordes.

1996

Le problème de l'entropie d'un trou noir est résolu par Andrew Strominger et Cumrun Vafa.



de base requises pour rendre compte de l'entropie du trou noir, au moins pour certains trous noirs très symétriques. L'énigme de l'entropie était en voie de résolution.

La question suivante concernait la perte d'information. En 1997, Juan Maldacena, actuellement à l'Institut d'études avancées de Princeton, dans le New Jersey, a proposé un moyen de contourner le problème de la perte d'information, solution parfois nommée dualité de Maldacena (ou correspondance AdS/CFT). Une dualité est une équivalence entre deux choses en apparence très différentes. La dualité de Maldacena montre que les mathématiques d'une théorie combinant la physique quantique et la gravitation (une théorie quantique de la gravitation), et fondée sur la théorie des cordes, sont équivalentes aux mathématiques d'une théorie quantique ordinaire, sans gravitation, mais dans un jeu de conditions particulières. Par exemple, la physique quantique d'un trou noir est équivalente à celle d'un gaz chaud de particules nucléaires.

La conséquence de la dualité de Maldacena est que l'une des deux façons d'aborder le problème du trou noir ne repose que sur les lois de la physique quantique (sans relativité générale et sans horizon), où l'information ne peut pas être perdue. Le trou noir doit donc préserver l'information. Et comme les trous noirs ne laissent pas de vestiges en s'évaporant, l'information doit ressortir avec le rayonnement de Hawking.

Un aspect étonnant de la dualité est que le scénario sans gravité opère dans un espace ayant une dimension de moins que dans l'autre scénario. Cela signifie que ce que nous nommons l'espace-temps pourrait

être différent de ce que nous percevons ; il faudrait le comprendre davantage comme un hologramme tridimensionnel projeté depuis la surface bidimensionnelle plus fondamentale d'une sphère.

Juan Maldacena a découvert la dualité qui porte son nom en s'attaquant précisément aux questions d'entropie et de perte d'information dans le trou noir. C'est sans doute avec la dualité de Maldacena que nous nous sommes rapprochés le plus d'une unification de la relativité générale et de la physique quantique. Toutefois, il reste à prouver que cette conjecture est vraie même si elle est étayée par de nombreux indices. L'idée a d'ailleurs convaincu Stephen Hawking qui a annoncé, en 2004, qu'il avait changé d'avis concernant la perte d'information dans les trous noirs. Cependant, la dualité de Maldacena n'explique pas clairement comment l'information passerait de l'intérieur à l'extérieur du trou noir.

L'information n'est pas perdue dans le trou noir

Revenons une vingtaine d'années plus tôt, à l'époque où les physiciens essayaient de comprendre comment l'information tombée dans le trou noir pouvait s'en échapper. Leonard Susskind, de l'université Stanford, et Gerard 't Hooft, de l'université d'Utrecht aux Pays-Bas, proposèrent une solution étonnante reposant sur un principe dit de complémentarité des trous noirs. Pour l'essentiel, d'après ce principe, un observateur plongé dans un trou noir voit l'information qui s'y trouve, alors qu'un observateur extérieur voit la même information sortir de l'astre. Selon ces physiciens, il

n'y a pas de contradiction puisque les deux observateurs, situés de part et d'autre de l'horizon des événements, ne peuvent pas communiquer.

La dualité de Maldacena et la complémentarité des trous noirs semblaient dissiper tous les paradoxes. La première implique la conservation de l'information, la seconde indique comment l'information s'échappe du trou noir. Mais de nombreux détails restaient à vérifier. Il y a trois ans, mes collègues et moi (AMPS) avons essayé de combiner toutes ces idées pour voir s'il restait des contradictions, en se fondant sur des travaux de Samir Mathur, de l'université d'État de l'Ohio, et Steven Giddings, de l'université de Californie à Santa Barbara (et en prolongeant, sans le savoir, un raisonnement plus ancien de Samuel Braunstein, de l'université d'York au Royaume-Uni). Après de vaines tentatives d'obtenir un modèle qui fonctionne, nous avons compris que le problème était plus profond et ne se résolvait pas à nos faiblesses mathématiques : une contradiction demeurerait.

Cette contradiction surgit quand on considère le phénomène d'intrication quantique entre particules. L'intrication est sans doute l'aspect de la physique quantique le plus contraire à l'intuition et le plus éloigné de notre expérience. Si les particules étaient des dés, deux particules intriquées seraient comme deux dés dont la somme des faces affichées est toujours égale à sept : si vous lancez les dés, et que le premier affiche deux, alors le second indiquera forcément cinq. De la même façon, quand les physiciens mesurent les propriétés d'une particule intriquée, la mesure détermine aussi les caractéristiques de sa partenaire.