

du spécimen. J'en suis resté bouche bée : ce que je voyais était un tyrannosaure de l'extrême fin du Crétacé, mais il était très différent de *T. rex*. Mesurant entre 8 et 9 mètres de long, donc nettement plus petit, il ne pesait vraisemblablement qu'une tonne. Contrairement à celui de *T. rex*, armé d'une mâchoire apte à broyer tout adversaire, son crâne était long et délicatement constitué.

Junchang Lü m'a invité à l'aider à décrire la nouvelle espèce, car j'avais déjà étudié de près deux tyrannosaures à long museau découverts il y a environ 40 et 10 ans. Ces dinosaures avaient alors plongé les paléontologues dans une grande perplexité. La première de ces formes, *Alioramus remotus*, a d'abord été connue par un squelette incomplet qu'une équipe russe mit au jour en Mongolie dans les années 1970. Ces chercheurs avaient souligné son aspect anormal. Comme, au cours de la guerre froide, peu de paléontologues ont eu la possibilité de l'étudier, on a continué à se demander s'il s'agissait d'une nouvelle espèce atypique ou d'un jeune représentant de l'espèce *Tarbosaurus*, déjà connue.

Plusieurs tyrannosaures à long museau

Cette incertitude dura jusqu'au début des années 2000, quand une équipe américano-mongole dirigée par mon directeur de thèse, Mark Norell, du Muséum américain d'histoire naturelle, découvrit un spécimen d'*Alioramus* bien plus complet et mieux conservé. Mark Norell me demanda alors de l'étudier. C'est ainsi qu'en 2009 nous propositions une nouvelle espèce : *Alioramus altai*. Ce fossile semblait distinct de *Tarbosaurus* ; toutefois, comme le squelette dont nous disposions était celui d'un individu juvénile (ce que révélait la structure interne des os), on ne pouvait exclure que ses traits particuliers soient la conséquence d'une croissance incomplète.

Une fois n'est pas coutume, cette question paléontologique a été tranchée seulement quelques années plus tard, grâce à la découverte fortuite de 2010, à Ganzhou. Le squelette de *Qianzhousaurus* mis au jour avait en effet le même long museau, la même constitution délicate et la même petite taille qu'*Alioramus*, mais il était clair qu'il appartenait à un individu beaucoup plus âgé. Cela nous permit de conclure que les tyrannosaures à long museau

constituaient à la toute fin du Crétacé un groupe asiatique occupant une position intermédiaire dans la chaîne alimentaire par rapport à celle de *Tarbosaurus* et de ses semblables.

Qianzhousaurus n'était pas le seul petit tyrannosaure cohabitant avec les poids lourds de son groupe. Deux mois environ avant la publication de notre description de *Qianzhousaurus*, mes collègues Anthony Fiorillo et Ronald Tykoski, du muséum Perot à Dallas, ont découvert près du cercle polaire un tyrannosaure de la fin du Crétacé encore plus étrange : *Nanuqsaurus*. Il ne reste de lui que quelques ossements similaires à ceux de *T. rex*, mais deux fois plus petits. Les os comportant des sutures épaissies qui ne s'observent que chez des adultes, Anthony Fiorillo et Ronald Tykoski ont supposé que la pauvreté en ressources du milieu polaire a entraîné une tendance au nanisme, tout comme de nombreux animaux insulaires sont plus petits que leurs congénères continentaux. L'idée est donc que les *T. rex* monstrueux du sud avaient des cousins de taille réduite dans le Grand Nord.

Les nouveaux fossiles de tyrannosaures nous ont beaucoup appris sur l'évolution de leur groupe. Plusieurs questions essentielles demeurent cependant. Quelle est l'origine des tyrannosaures ? Est-elle antérieure au Jurassique moyen ? Date-t-elle du Jurassique inférieur, période pour laquelle nous avons très peu de fossiles ? Des tyrannosaures ont-ils vécu sur les continents de l'hémisphère Sud entre le Jurassique moyen et le Crétacé moyen ?

La plupart des nouveaux fossiles tyrannosauriens ont été retrouvés dans l'hémisphère Nord. Or nous savons qu'au Jurassique et Crétacé moyens de nombreux groupes de dinosaures avaient une répartition planétaire... Des inconnues subsistent aussi quant à la biologie des tyrannosaures : de quelles sortes de plumes *T. rex* était-il recouvert et à quoi servaient-elles ? À quoi servait le long museau de *Qianzhousaurus* et *Alioramus* ?

Bien que très incomplète, l'histoire des tyrannosaures montre une fois de plus que l'évolution est imprévisible. Personne n'aurait pensé que, en 170 millions d'années, on passerait d'animaux chétifs à de féroces géants dominant les chaînes alimentaires de plusieurs continents, ni que, il y a 66 millions d'années, l'impact d'une météorite mettrait brutalement un terme à leur règne. ■

T. rex, charognard ou chasseur ?

***Tyrannosaurus rex* était chasseur : on a retrouvé une de ses dents fichée dans la vertèbre d'un autre dinosaure. Ses mâchoires pouvaient exercer des forces de 20 tonnes. Mais il ne courait pas vite, et, comme la taille de ses bulbes olfactifs suggère qu'il avait un odorat développé pouvant lui permettre de repérer une carcasse à des kilomètres, certains paléontologues proposent que *T. rex* était un charognard. Alors, charognard ou chasseur ? Les deux, sans doute !**

■ BIBLIOGRAPHIE

J. Lü *et al.*, A new clade of Asian late Cretaceous long-snouted Tyrannosaurids, *Nature Communications*, vol. 5, article 37898, 2014.

A. R. Fiorillo et R. S. Tykoski, A diminutive new Tyrannosaur from the top of the world, *PLoS One*, vol. 9(3), article e91287, 2014.

S. Brusatte *et al.*, New research on ancient exemplar organisms, *Science*, vol. 329, pp. 1481-1485, 2010.

M. Schweitzer, Dinosaures : on a retrouvé leur sang, *Pour la Science* n°402, avril 2011.

G. M. Erickson, La vie de *Tyrannosaurus rex*, *Dossier Pour la Science*, n° 48, 2005.

L'horizon des trous noirs brûle-t-il ?

Pour concilier la relativité générale et la physique quantique des trous noirs, certains physiciens ont conclu que l'horizon des événements entourant un tel astre est un « mur de feu » rempli de particules de haute énergie.

Joseph Polchinski

L'ESSENTIEL

- L'évaporation des trous noirs implique que l'information qui y entre est perdue, ce que la physique quantique interdit.
- Les solutions à cette difficulté, inspirées de la théorie des cordes, posent d'autres problèmes.
- L'auteur et ses collègues proposent un scénario radical, où le trou noir serait entouré de particules de haute énergie, un « mur de feu ».
- Résoudre le paradoxe de l'horizon ouvrirait la voie à une unification de la physique quantique et de la relativité générale.

Kenn Brown, Mandelbrot Studios

Tomber dans un trou noir n'est certainement pas une partie de plaisir. Dès que les physiciens ont compris que les trous noirs existaient, ils ont su que s'en approcher trop exposait à une disparition certaine. En revanche, dans le cas d'un grand trou noir, ils pensaient qu'un astronaute ne ressentirait rien de spécial lorsqu'il franchit le point de non-retour, nommé l'horizon des événements. D'après la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein, cette région ne revêt aucun caractère particulier. Tout voyageur qui traverserait l'horizon aurait juste la sensation de tomber indéfiniment dans un puits d'une indicible noirceur, sans se rendre compte qu'il n'a plus aucune chance d'en sortir.

Récemment, mes collègues et moi avons brossé un tableau bien différent de l'horizon des événements. À la lumière des derniers développements en matière de physique quantique à proximité d'un trou noir, il semble désormais que notre astronaute aurait une tout autre expérience que celle prévue par la théorie d'Einstein. Au lieu d'une traversée de l'horizon des événements sans phénomène particulier,

l'astronaute rencontrerait un mur de particules de haute énergie, ou « mur de feu » (le terme utilisé en anglais est *firewall*, qui correspond aussi à « pare-feu »), qui lui serait instantanément fatal. Ce mur pourrait même marquer la fin de l'espace.

Il y a trois ans, notre groupe de l'université de Californie à Santa Barbara – Donald Marolf, Ahmed Almheiri, James Sully et moi-même (aujourd'hui connus sous l'acronyme AMPS) – est parvenu à cette conclusion après avoir étudié certaines idées de la théorie des cordes appliquées à la physique des trous noirs, en particulier en considérant un débat ouvert dès les années 1970 par Stephen Hawking. Ce physicien britannique avait identifié un conflit profond entre les prévisions de la théorie quantique et celles de la relativité générale dans ces environnements extrêmes. Selon son raisonnement, il existe une faille soit dans la physique quantique, soit dans la représentation de l'espace-temps donnée par la relativité générale d'Einstein. Depuis, le débat oscille entre l'une et l'autre hypothèse.

Si notre proposition de mur de feu a été accueillie avec un certain scepticisme,

■ L'AUTEUR



Joseph POLCHINSKI est professeur de physique à l'université de Californie à Santa Barbara, et membre permanent de l'institut Kavli de physique théorique.

comme ce fut aussi le cas pour le résultat de Stephen Hawking, aucune alternative satisfaisante n'a encore émergé. En supposant que la physique quantique est correcte, le mur de feu en est une conséquence directe, bien que son existence soulève d'autres difficultés théoriques. Il semble que les physiciens doivent abandonner l'une de leurs théories fétiches, mais nous ne savons pas encore laquelle. Nous espérons cependant qu'une compréhension plus profonde de la physique quantique et de la relativité naîtra de cette confusion et, avec de la chance, qu'un moyen de résoudre les contradictions apparentes entre ces deux théories reines de la physique émergera.

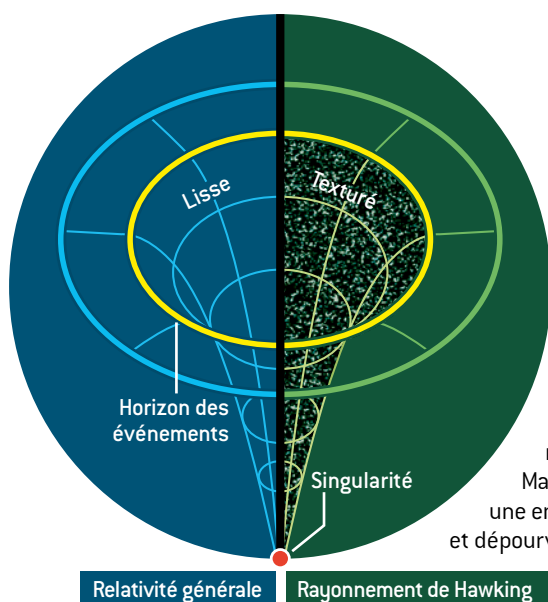
Pour bien comprendre le problème, il faut partir de la notion de trou noir. Cet objet est une prévision de la relativité générale, la théorie de la gravitation. Dans ce cadre, la matière, ou plus généralement l'énergie, déforme l'espace-temps. Pour le

cas le plus extrême, celui du trou noir, si la masse présente est suffisamment importante, la force gravitationnelle entraîne son effondrement en un point, nommé singularité du trou noir. À cet endroit, certaines quantités décrivant le champ gravitationnel deviennent infinies.

Autour de cette singularité, on définit l'horizon des événements comme la limite où le champ gravitationnel est si fort que même une particule se déplaçant à la vitesse de la lumière ne peut en sortir. Un voyageur spatial qui franchirait cette frontière serait alors dans l'impossibilité d'échapper à l'attraction gravitationnelle du trou noir. Cependant, pour un trou noir très massif, l'augmentation du champ gravitationnel est si progressive au niveau de l'horizon que l'astronote ne se douterait de rien en le traversant. En vertu du principe d'équivalence de la relativité générale, l'horizon des événements est une région sans caractère

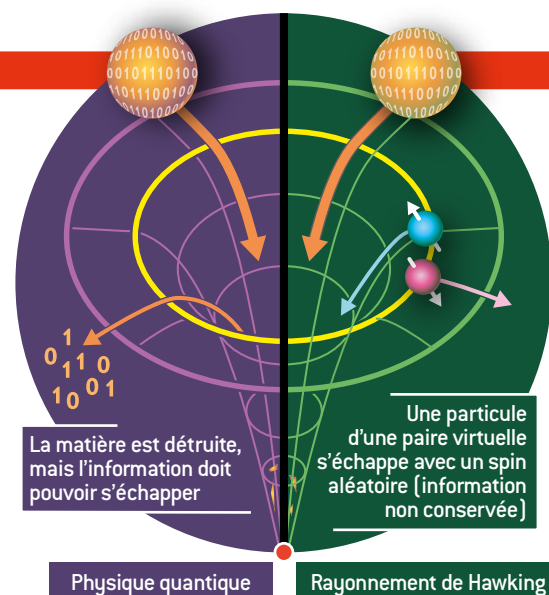
LES ÉNIGMES DE L'HORIZON DES TROUS NOIRS

EN 1974, STEPHEN HAWKING a montré de façon théorique qu'un trou noir émet un faible rayonnement. D'après la physique quantique, partout dans l'Univers et en permanence, des paires particule-antiparticule surgissent du vide et s'annihilent aussitôt ou presque. Stephen Hawking a remarqué que, si une telle « paire virtuelle » émerge du vide près de l'horizon d'un trou noir, l'une des deux particules tombe dans l'astre tandis que l'autre s'échappe, constituant le « rayonnement de Hawking ». Ce phénomène conduit à des difficultés portant sur les liens entre la relativité générale et la physique quantique.



Le problème de l'entropie

Le spectre du rayonnement de Hawking suggère que l'on peut attribuer une température à tout trou noir. En principe, la température d'un objet est liée aux mouvements de ses atomes. L'existence d'une température pour un trou noir implique que ce dernier a une sous-structure, des sortes d'éléments constitutifs internes. Ceux-ci peuvent s'organiser selon diverses configurations équivalentes, ce qui confère au trou noir une « entropie », une mesure du désordre reflété par le nombre de combinaisons possibles. Mais la théorie de la relativité générale interdit aux trous noirs d'avoir une entropie : d'après cette théorie, un trou noir est entièrement lisse et dépourvu de structure interne.



particulier. En revanche, plus près de la singularité, le champ gravitationnel s'intensifie rapidement au point que des forces de marées finiront par étirer et déchiqueter le corps de l'astronaute.

Pour en revenir à l'aspect anodin de l'horizon des événements, les physiciens aiment souligner que le Système solaire tout entier pourrait tomber en ce moment même dans un trou noir géant sans que nous ne ressentions rien qui sorte de l'ordinaire.

En 1974, Stephen Hawking chamboula la vision classique des trous noirs en considérant certaines prévisions de la physique quantique qu'il appliqua au voisinage de l'horizon des trous noirs. Selon cette théorie, partout dans l'Univers et en permanence, des paires constituées d'une particule et de son homologue d'antimatière se forment spontanément pour disparaître aussitôt. Si de telles fluctuations se produisent juste à l'extérieur de l'horizon du trou noir, Stephen

Hawking a montré que la paire pouvait être séparée. L'une des particules tombe alors dans le trou noir, tandis que l'autre s'échappe. Un observateur situé loin du trou noir ne voit que les particules qui s'échappent ; l'astre semble émettre des particules, donc perdre de sa masse. À terme, le trou noir tout entier se viderait de sa substance par cette « évaporation ».

Les trous noirs s'évaporent

Pour les trous noirs observés par les astrophysiciens, l'évaporation n'est pas un problème, car ces astres acquièrent de la masse sous forme de gaz et de poussière beaucoup plus rapidement qu'ils n'en perdent par le rayonnement de Hawking (voir la figure page 89). Mais à des fins théoriques, on peut étudier ce qui se passerait si un trou noir était complètement isolé et si nous avions

assez de temps pour assister au processus d'évaporation. En se livrant à une telle expérience de pensée, Stephen Hawking a découvert deux contradictions entre la relativité générale et la physique quantique.

Le premier conflit concerne la température du trou noir. Le spectre lumineux du rayonnement de Hawking pour un trou noir isolé est identique à celui émis par un objet chauffé (le rayonnement dit de corps noir). Il s'ensuit que l'on peut attribuer une température au trou noir. Comme la température d'un objet résulte de l'agitation de ses composants microscopiques, on en déduit qu'un trou noir aurait une structure microscopique constituée d'éléments discrets (non continus).

En 1972, le physicien Jacob Bekenstein, maintenant à l'université hébraïque de Jérusalem, était déjà arrivé à cette conclusion en se livrant à des expériences de pensée consistant à jeter des objets

Le paradoxe de l'information

Selon les principes de la physique quantique, l'information ne peut pas être détruite. Cependant, cela pourrait être le cas dans un trou noir. Cet objet s'évapore par rayonnement de Hawking, mais les propriétés des particules qui s'échappent n'ont aucun lien avec l'information portée par la matière qui est tombée dans le trou noir. L'information est donc perdue. Stephen Hawking suggérait qu'il faudrait modifier la mécanique quantique afin d'autoriser une telle perte d'information.

DES PISTES EN THÉORIE DES CORDES

Les premières avancées...

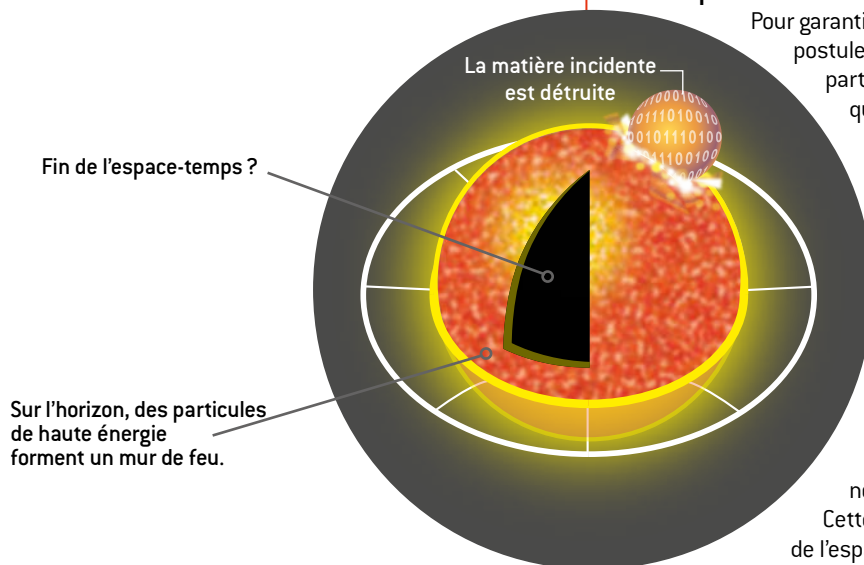
Pour résoudre ces énigmes, les physiciens ont tenté d'unifier la relativité générale et la physique quantique en une théorie cohérente qui parviendrait à décrire les trous noirs. Une piste, la théorie des cordes, postule que les particules sont de minuscules cordes vibrantes. Cette théorie semblait résoudre certains aspects du paradoxe de l'information et du problème de l'entropie.

... présentent des difficultés...

Pour garantir la conservation de l'information, il faut postuler un lien quantique, l'intrication, entre les particules de chaque paire virtuelle, ainsi qu'avec le rayonnement de Hawking. Or la mécanique quantique interdit qu'une particule soit intriquée avec deux systèmes différents, ce que sont pourtant sa partenaire de la paire et le rayonnement de Hawking.

... qui ont conduit aux murs de feu

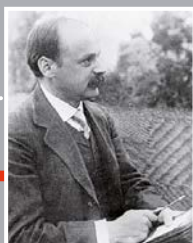
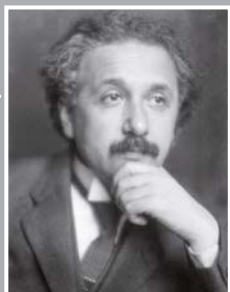
Pour résoudre ce problème, on peut supposer que l'intrication de la paire virtuelle est brisée. Il s'ensuit une libération de particules de haute énergie au niveau de l'horizon du trou noir, ce qui forme un mur de feu. Cette frontière pourrait marquer la fin de l'espace-temps.



Du trou noir ...

1915

Albert Einstein élabore la théorie de la relativité générale.



1916

Karl Schwarzschild trouve la première solution exacte des équations d'Einstein, préfigurant ce que l'on nommera un trou noir.

1971

On identifie pour la première fois un trou noir, dans le système binaire Cygnus X-1.



dans un trou noir. À partir de ces idées, il détermina, avec Stephen Hawking, une formule donnant l'entropie d'un trou noir, liée au nombre d'éléments qu'il contient. L'entropie est une mesure du désordre, qui augmente avec le nombre d'états ou configurations microscopiques que le système peut avoir. Plus le trou noir contient d'éléments, plus il y a de configurations possibles, et plus l'entropie est grande. Selon la formule trouvée par les deux physiciens, l'entropie d'un trou noir est proportionnelle à l'aire de l'horizon des événements.

Cette température du trou noir et l'existence d'éléments discrets sont en contradiction avec la relativité générale, qui stipule que les trous noirs ont une géométrie lisse et sans structure. Dans la théorie d'Einstein, ces astres sont caractérisés uniquement par leur masse, leur moment cinétique (leur rotation) et leur charge électrique: pour reprendre l'image de John Wheeler, physicien à l'université de Princeton, «les trous noirs n'ont pas de cheveux». En considérant les effets de la physique quantique à proximité de l'horizon du trou noir, ce dernier acquiert des «cheveux».

Le rayonnement de Hawking défie aussi les principes de la physique quantique. Selon les calculs de Stephen Hawking, les propriétés des particules qui s'échappent d'un trou noir ne dépendent pas des caractéristiques de la matière qui lui a donné naissance (en général une étoile massive qui s'est effondrée). Cela signifie que toute l'information que contenait la matière avant la formation du trou noir est définitivement perdue. Par

exemple, si nous envoyons dans le trou noir une lettre comportant un message, il n'y a aucun moyen de reconstituer ce dernier à partir des particules qui finissent par émerger du trou noir. Une fois que le message a franchi l'horizon, son information est piégée à l'intérieur du trou noir et n'a aucune incidence sur le rayonnement qui est émis par l'astre. Plus grave, comme le trou noir finit par s'évaporer complètement, l'information disparaît totalement.

Or, en physique quantique, la perte d'information est interdite. Tout système est décrit par un objet mathématique, la fonction d'onde, qui spécifie l'état du système. Cette fonction peut se transformer, mais il est toujours possible de retrouver

La perte d'information est interdite dans le cadre de la physique quantique, mais semble se produire dans les trous noirs.

les conditions initiales, car l'information est conservée. Dans l'expérience de pensée de Stephen Hawking, la perte d'information signifie que nous n'avons aucun moyen de prédire la fonction d'onde du rayonnement de Hawking à partir des propriétés de la matière que le trou noir a engloutie. Stephen Hawking en a conclu que les lois de la physique quantique devaient être modifiées pour autoriser la perte d'information dans les trous noirs.

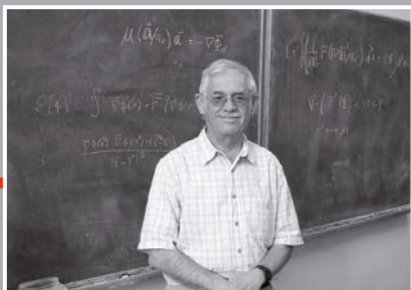
Le problème est bien plus fondamental qu'il n'y paraît. Comparons cette situation avec ce qui se produit si nous brûlons le message. En pratique, nous ne savons pas

le reconstituer et le message est perdu, mais pas du point de vue de la physique quantique. Comme le processus de combustion est décrit par la physique quantique, la fonction d'onde de la fumée dépend du message de départ. En théorie donc, si nous étions capables de collecter toute l'information quantique de la fumée, nous pourrions reconstituer le message. Pour les trous noirs, la fonction d'onde du rayonnement de Hawking n'a aucun lien avec le message entrant, la perte d'information est définitive.

Certains physiciens ont argumenté que, si Stephen Hawking a raison et que l'information peut être détruite, alors cela devrait se produire non seulement dans la situation exotique de l'évaporation du trou noir, mais partout et tout le temps car, en physique quantique, tout ce qui n'est pas interdit arrive. Nous en verrions les signes dans la physique du quotidien, y compris probablement des violations importantes de la loi de conservation de l'énergie. L'argument de Stephen Hawking résiste pourtant à ces objections en soulignant le rôle essentiel de l'horizon des événements, spécifique aux trous noirs et absent dans le cas de la combustion du papier.

Il semble ainsi que nous soyons confrontés à un dilemme pour résoudre ce conflit. Il faut soit modifier la physique quantique pour autoriser une perte d'information, soit modifier la relativité générale pour permettre à l'information de s'échapper de l'intérieur d'un trou noir.

Une autre piste serait que le trou noir ne s'évapore pas complètement, mais



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

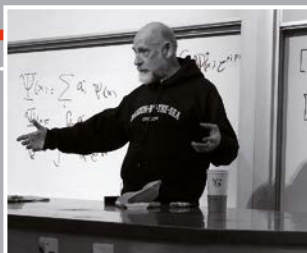
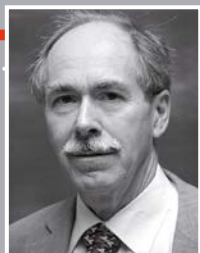


© NASA/JPL-Caltech

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.

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.



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

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. ■

■ 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.



N°455 – septembre 2015
□ réf. M0770455



N°454 – août 2015
□ réf. M0770454



N°453 – juillet 2015
□ réf. M0770453



N°452 – juin 2015
□ réf. M0770452



N°451 – mai 2015
□ réf. M0770451



N°450 – avril 2015
□ réf. M0770450



N°449 – mars 2015
□ réf. M0770449



N°448 – février 2015
□ réf. M0770448



N°447 – janvier 2015
□ réf. M0770447



N°446 – décembre 2014
□ réf. M0770446



N°445 – novembre 2014
□ réf. M0770445



N°444 – octobre 2014
□ réf. M0770444



N°443 – septembre 2014
□ réf. M0770443



N°442 – août 2014
□ réf. M0770442



N°441 – juillet 2014
□ réf. M0770441

POUR LA SCIENCE

Complétez votre collection
dès maintenant!

5,50€ dès le 2^e numéro
acheté!

À découper ou à photocopier et à retourner accompagné de votre règlement à : Groupe Pour la Science • 628 avenue du Grain d'Or • 41350 Vineuil • e-mail : pourlasciencevpc@daudin.fr

☐ Oui, je commande des numéros
de **Pour la Science** au tarif unitaire
de 5,50€ dès le 2^e acheté.

Je reporte ci-dessous les références à 6 chiffres correspondant aux numéros commandés et au format souhaité :

1^{re} réf. _____ 01 × 6,50 € = _____ 6,50 €

2^e réf. _____ × 5,50 € = _____

3^e réf. _____ × 5,50 € = _____

4^e réf. _____ × 5,50 € = _____

5^e réf. _____ × 5,50 € = _____

6^e réf. _____ × 5,50 € = _____

Frais port (4,90€ France - 12€ étranger) + _____

Je commande la reliure **Pour la Science**
(capacité 12 n°s)
au prix de 14 € + _____
TOTAL À RÉGLER = _____

J'indique mes coordonnées :

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

C.P. : _____ Ville : _____

Pays : _____ Tél. : _____
Pour le suivi client (facultatif)

Mon e-mail pour recevoir la newsletter **Pour la Science*** : _____

* à remplir en majuscules

Je choisis mon mode de règlement :

☐ par chèque à l'ordre de **Pour la Science**

☐ par carte bancaire

N° _____

Date d'expiration _____ Code de sécurité _____
(les 3 chiffres au dos de votre CB)

Signature obligatoire

En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-dessus sont indispensables au traitement de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès du groupe Pour la Science. Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'organismes partenaires. En cas de refus de votre part, merci de cocher la case ci-contre ☐.

TOUTES LES ARCHIVES
DEPUIS 1996 SUR
www.pourlascience.fr