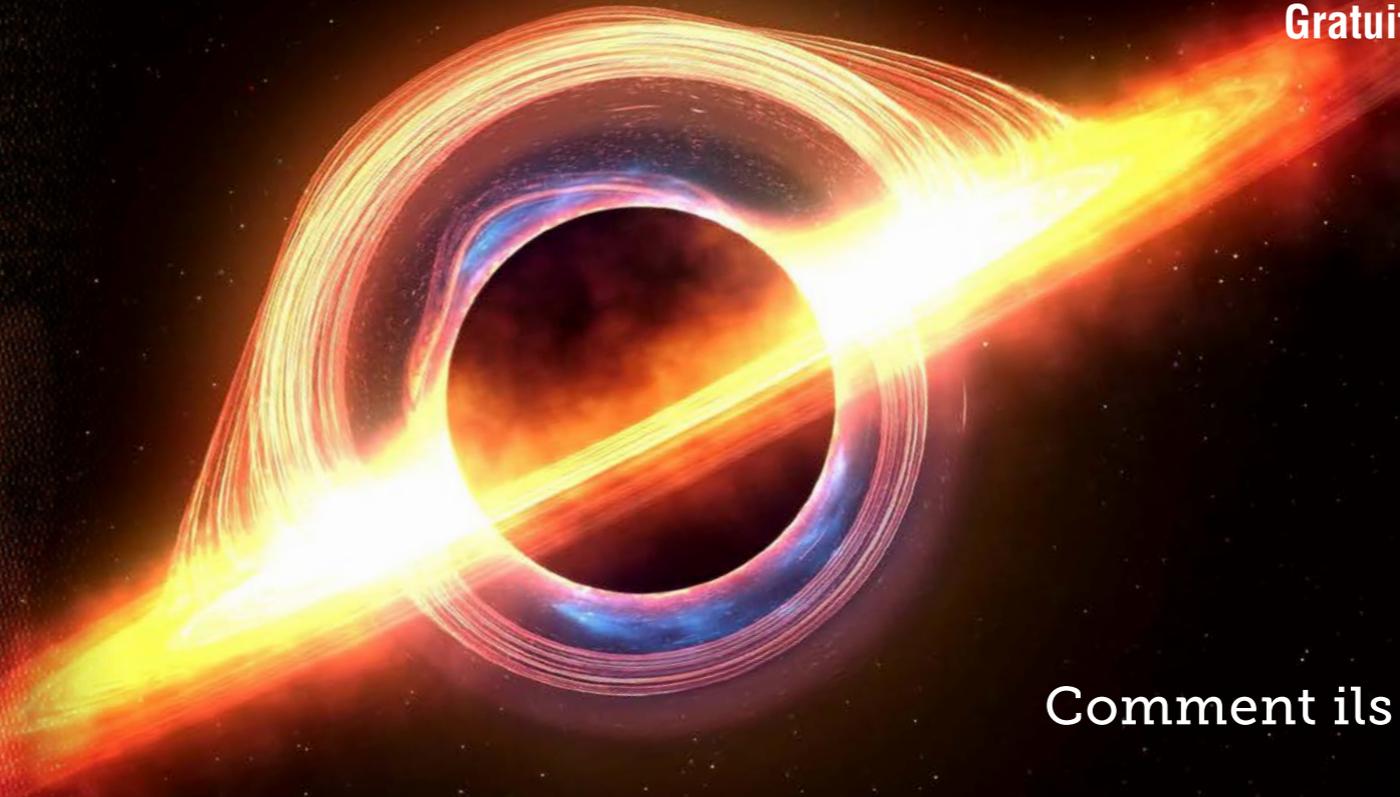


POUR LA
SCIENCE

Mars 2018 – Hors-série numérique

Gratuit - Ne peut être vendu



Trous noirs

Comment ils s'évaporent

Paradoxe

Les trous noirs détruisent-ils l'information ?

Sociologie

Le mythe du génie solitaire

Stephen Hawking

FONDATEUR DE LA PHYSIQUE
DES TROUS NOIRS



Philippe Ribeau
Responsable éditorial web

Stephen HAWKING

Stephen Hawking s'est éteint mercredi 14 mars à l'âge de 76 ans. Le cosmologiste britannique était l'un des rares scientifiques actuels à avoir acquis une notoriété internationale auprès du grand public, avec son essai « Une brève histoire du temps ».

Ce grand vulgarisateur est surtout considéré comme le véritable fondateur de la physique des trous noirs. Ses travaux mariant la physique quantique, la relativité générale et la thermodynamique ont abouti à la mise en évidence des singularités, du rayonnement ou encore de l'entropie des trous noirs. Ils ont ainsi légitimé l'étude de ces astres auparavant considérés comme d'hypothétiques curiosités théoriques, et ouvert la voie à des réflexions profondes sur la nature de l'espace, du temps et de la réalité physique.

Pour lui rendre hommage, nous avons choisi de vous faire partager une sélection d'articles d'archives publiés dans *Pour la Science*. C'est une de nos grande fierté : Stephen Hawking nous a fait l'honneur d'écrire par trois fois dans nos colonnes. D'abord en novembre 1977 (dans le tout premier numéro de notre magazine) pour exposer ses travaux sur la mécanique quantique et les trous noirs : une publication collector ! Une deuxième fois en 1996, pour un débat avec son collègue et ami le mathématicien Roger Penrose. Enfin en 2011 avec son confrère Léonard Mlodinow sur la « théorie ultime du Tout ».

Retrouvez ces articles, ainsi que d'autres développant ses travaux, dans ce hors-série numérique gratuit.

Et n'hésitez pas à nous faire part de vos commentaires sur ce tout nouveau format.

Bonne lecture !

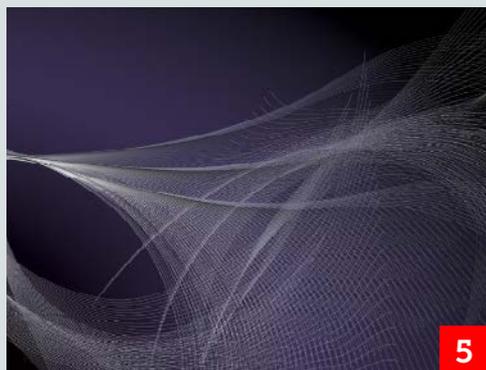
Suivez nous sur



VOTRE OPINION COMPTE !

Aidez-nous à construire l'avenir de ce nouveau hors-série numérique. Dites-nous ce que vous pensez des articles rassemblés dans ce numéro spécial et si vous aimeriez lire d'autres numéros similaires, en répondant à quelques questions.

Donnez votre avis



ÉPISTÉMOLOGIE

L'insaisissable théorie unifiée

Par Stephen Hawking et Leonard Mlodinow

Les physiciens recherchent une théorie décrivant de façon unifiée les quatre interactions fondamentales. Mais ils auront peut-être besoin de plusieurs théories...

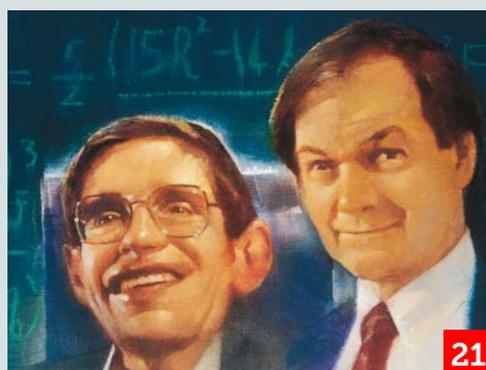


SOCIOLOGIE

Hawking : le mythe du génie solitaire

Par Hélène Mialet

Chercheur brillant mais lourdement paralysé, le théoricien britannique est, contrairement à l'image qu'on se plaît à donner de lui, l'antithèse du savant solitaire armé de la seule puissance de son cerveau.

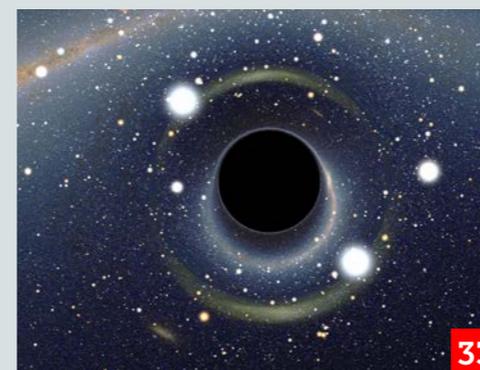


RELATIVITÉ ET PHYSIQUE QUANTIQUE

La nature de l'espace et du temps

Par Stephen Hawking et Roger Penrose

Deux éminents spécialistes de la relativité exposent leurs conceptions de l'Univers, son évolution, et l'impact de la théorie quantique.

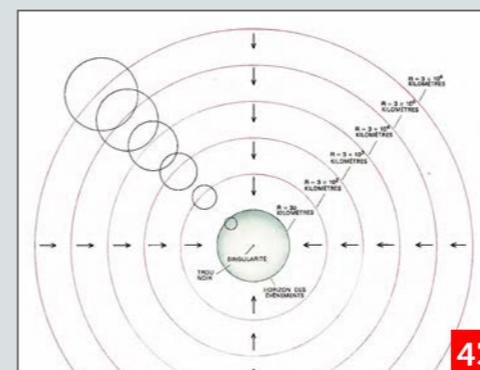


ASTOPHYSIQUE

Les prédictions de Stephen Hawking

Par Renaud Parentani

En 1974, Stephen Hawking a montré que les trous noirs émettent un rayonnement. Ce résultat a eu de nombreux développements, mais il a aussi soulevé des questions toujours sans réponse.



PHYSIQUE THÉORIQUE

La mécanique quantique des trous noirs

Par Stephen Hawking

On définit souvent les « trous noirs » comme des régions d'où rien ne peut s'échapper, pas même la lumière. Il existe cependant des raisons de penser que des particules peuvent en sortir.



PARADOXE

Une nouvelle piste pour le problème de l'information

Par Sean baily

Les trous noirs détruisent-ils l'information de la matière qu'ils engloutissent, en contradiction avec les principes de la physique ? Hawking a proposé une nouvelle piste pour résoudre ce paradoxe.

Les physiciens recherchent une théorie décrivant de façon unifiée les quatre interactions fondamentales. Mais ils auront peut-être besoin de plusieurs théories...

**Stephen Hawking
et Leonard Mlodinow**

Epistémologie

L'insaisissable théorie unifiée

Le conseil municipal de Monza, en Italie, a interdit un jour de mettre les poissons rouges dans des bocaux ronds. C'est pure cruauté, ont justifié les édiles, car cela impose aux pauvres poissons une vision déformée de la réalité. Pour curieuse qu'elle soit, cette anecdote pose une intéressante question philosophique: comment savons-nous que la réalité que nous percevons est vraie? Celle que voit le poisson diffère de la nôtre, mais est-elle pour autant moins réelle?

En physique, cette question n'est pas gratuite. Les physiciens et les cosmologistes se trouvent dans une situation similaire à celle du poisson rouge: depuis des décennies, ils s'efforcent de mettre au point une «théorie ultime du Tout», c'est-à-dire un ensemble complet et cohérent de lois fondamentales capable d'expliquer tous les aspects de la réalité. Or voilà qu'il apparaît que cette quête pourrait conduire non pas à une théorie unique, mais à toute une famille de théories reliées, chacune décrivant sa propre version de la réalité, comme si elle voyait l'Univers depuis son propre bocal...

Cette idée est difficile à accepter, y compris pour nombre de physiciens. La plupart des gens croient en l'existence d'une réalité objective et extérieure, et au fait que nos sens et notre science nous renseignent directement sur le monde matériel. La science classique est fondée sur la conviction qu'il existe un monde extérieur, dont les propriétés sont bien définies et indépendantes de l'esprit de l'observateur. En philosophie, cette doctrine se nomme «réalisme».

Ceux qui se souviennent de Timothy Leary (un psychologue américain partisan de l'usage thérapeutique du lsd) et des années 1960 savent qu'il y a une autre possibilité: la conception de la réalité peut dépendre de l'esprit de celui qui la perçoit. À des différences subtiles près, ce point de vue se décline sous les noms d'antiréalisme, d'instrumentalisme ou

Dans notre perception du monde, il n'existe aucun moyen de supprimer l'observateur

encore d'idéalisme. Dans ces doctrines, le monde que nous connaissons est construit par l'esprit humain à partir de

la matière brute des données sensorielles, et il est mis en forme par le cerveau. Ce point de vue peut sembler difficile à accepter, mais pas à comprendre. S'agissant de notre perception du monde, il n'existe aucun moyen de supprimer l'observateur – c'est-à-dire nous.

LE RÉALISME A L'ÉPREUVE DE LA THÉORIE QUANTIQUE

Les développements de la physique sont tels que le réalisme devient difficile à défendre. En physique classique (la physique newtonienne, qui décrit bien nos expériences quotidiennes), l'interprétation de termes tels qu'«objet» et «position» est pour l'essentiel en harmonie avec notre compréhension «réaliste», de bon sens, de ces concepts. Mais nous sommes des instruments de mesure grossiers. Les physiciens ont découvert que les objets

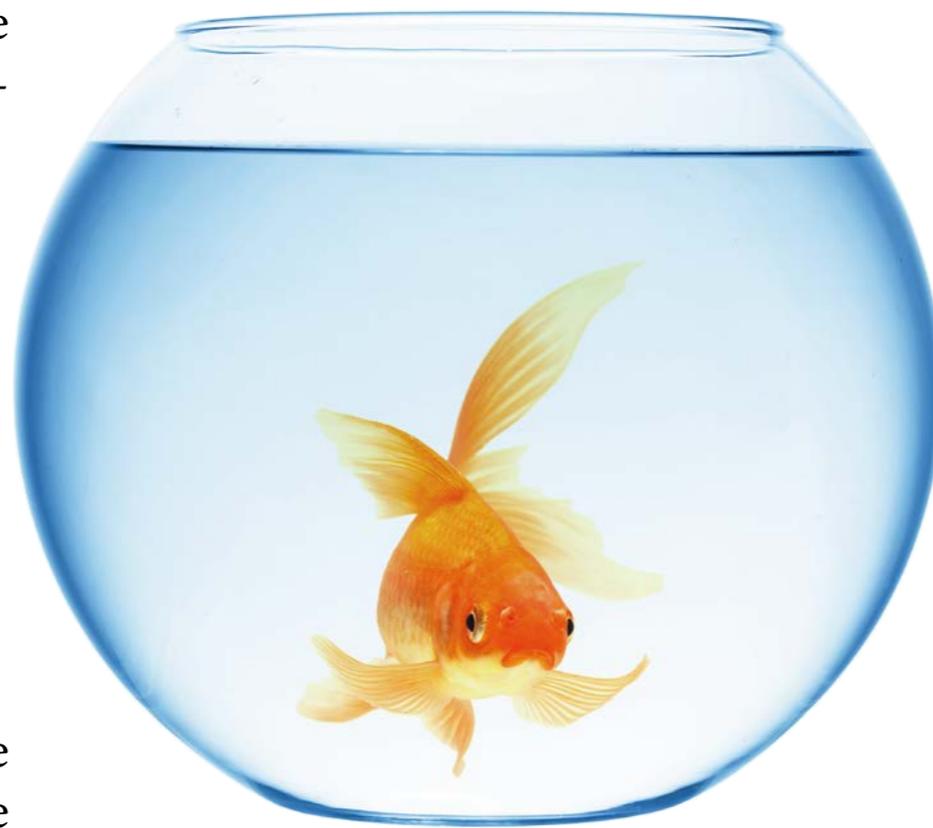
qui nous entourent et la lumière grâce à laquelle nous les voyons sont constitués d'objets (tels les électrons et les photons)

que nous ne percevons pas directement. Ces objets ne sont pas régis par les lois de la physique classique, mais par celles de la théorie quantique.

La réalité de la théorie quantique est en rupture radicale avec celle de la physique classique. En théorie quantique, les particules n'ont ni position définie ni vitesse définie avant qu'un observateur ne mesure ces quantités. Dans certains cas, des objets individuels n'ont même pas d'existence indépendante, mais existent seulement en tant que partie d'un ensemble. La physique quantique a aussi des implications importantes sur notre conception du passé. Alors que la physique classique voit le passé comme une série définie d'événements, en physique quantique le passé, comme le futur, n'existent qu'en tant qu'éventail de possibilités. Même l'Univers dans son ensemble n'a pas de passé unique. La physique quantique implique donc une réalité différente de celle de la physique classique, même si cette dernière correspond à notre intuition et nous est fort utile pour construire des immeubles ou des ponts.

Ces exemples nous amènent à une conclusion importante: il n'y a pas de

Comme un poisson rouge dans son bocal, nous sommes enfermés dans un point de vue sur l'Univers. Nous pouvons modéliser ce qui se passe hors du bocal, mais sans nous affranchir de notre point de vue. Dès lors, il est peut-être inévitable que la quête d'une théorie du Tout produise plusieurs solutions, impossibles à unifier sans la possibilité d'un regard... extérieur à l'Univers ?



concept de réalité indépendant de toute représentation ou théorie. C'est pourquoi nous préconisons plutôt un «réalisme dépendant du modèle». Dans cette vision, une théorie physique ou une représentation du monde n'est qu'un modèle et un ensemble de règles qui relient les éléments du modèle aux observations. Il est alors vain de se demander si un modèle est réel; il importe seulement qu'il soit en accord avec les observations. Si deux modèles sont compatibles avec les observations, aucun des deux ne peut être considéré plus réel que l'autre.

PLUSIEURS RÉALITÉS SELON LE POINT DE VUE ?

L'idée de réalités alternatives est l'un des piliers de la culture populaire moderne. Par exemple, dans le film Matrix, les hommes vivent sans le savoir dans une réalité virtuelle créée par des ordinateurs intelligents; le but de ces machines est de maintenir les humains dans une léthargie satisfaite et paisible, afin de pouvoir pomper leur «énergie bioélectrique» (allez savoir ce que c'est...). Le film pose une bonne question: comment pouvons-nous être sûrs que nous ne sommes pas des êtres

peuplant un monde factice ?

Si nous vivions dans un monde synthétique imaginaire, les événements s'y déroulant n'auraient pas nécessairement de logique ou de cohérence, ou n'obéiraient pas forcément à des lois. Les maîtres nous contrôlant pourraient trouver intéressant ou amusant de tester nos réactions, par exemple en nous faisant brusquement décider de tous haïr le chocolat, ou que la guerre est inenvisageable, mais rien de cela n'est arrivé. Si ces maîtres supposés imposaient des lois cohérentes, nous n'aurions aucun moyen de savoir qu'il existe une autre réalité derrière la réalité simulée. Il est facile d'étiqueter le monde des maîtres comme « réel », et le monde engendré par ordinateur comme « faux ». Mais, si (comme nous), les êtres du monde virtuel ne pouvaient voir dans leur univers depuis l'extérieur, quelles raisons auraient-ils de mettre en doute leur propre vision de la réalité ?

Les poissons rouges sont dans une situation identique. Depuis leur bocal courbe, ils ne voient pas la même chose que nous qui regardons du dehors, mais ils pourraient néanmoins formuler des lois gouvernant le mouvement des objets extérieurs au bocal. Par exemple,

puisque la lumière est défléchiée en passant de l'air à l'eau, un objet qui est pour nous sur une trajectoire rectiligne serait perçu par le poisson rouge comme décrivant une trajectoire courbe. Depuis leur référentiel déformé, les poissons savants pourraient formuler des lois toujours vérifiées et autorisant des prédictions sur le mouvement des objets extérieurs au bocal. Leurs lois seraient plus compliquées que dans notre référentiel, mais la simplicité est une question de goût ! Si les poissons rouges formulaient une telle théorie, nous devrions admettre que leur vision est une représentation valable de la réalité.

COPERNIC NE RÉFUTE PAS PTOLÉMÉE

Un exemple concret et célèbre de représentations différentes de la réalité est le contraste entre le modèle du cosmos de Ptolémée (centré sur la Terre) et celui de Copernic (centré sur le Soleil). On a beau dire que Copernic a donné tort à Ptolémée, cela n'est pas vrai. Comme dans le cas de notre vision opposée à celle du poisson rouge, on peut utiliser l'une ou l'autre représentation comme modèle de l'Univers, parce que nous pouvons

POUR LA
SCIENCE

Le magazine
de référence
en sciences

**OFFRE
SPÉCIALE**



jusqu'à
32 €
de réduction

JE M'ABONNE !

expliquer nos observations de la voûte céleste indifféremment en supposant que la Terre ou que le Soleil est au repos. En dépit de son rôle dans les débats philosophiques sur la nature de notre Univers, le véritable avantage du système copernicien est que les équations du mouvement sont beaucoup plus simples dans le référentiel où c'est le Soleil qui est au repos.

Le réalisme dépendant du modèle s'applique non seulement aux modèles scientifiques, mais aussi aux modèles mentaux conscients et subconscients que nous créons tous pour interpréter et comprendre le monde de tous les jours. Par exemple, le cerveau humain traite les données brutes du nerf optique, com-

Miracle, mystère ou maîtresse, que signifie le M de la « théorie M » ?

binant les données des deux yeux, augmentant la résolution et comblant les lacunes telles que celle du point aveugle de la rétine. De plus, il crée l'impression d'un espace tridimensionnel à partir des données bidimensionnelles de la rétine. Quand vous voyez une chaise, vous avez

simplement utilisé la lumière diffusée par la chaise pour construire une image mentale, c'est-à-dire un « modèle » de la chaise. Le cerveau est tellement doué pour construire des modèles que si l'on équipe les gens de lunettes qui renversent l'image, leur cerveau change le modèle de telle sorte qu'ils voient à nouveau les choses dans le bon sens... et, avec un peu de chance, avant qu'ils aient le temps d'essayer de s'asseoir !

CINQ THÉORIES ULTIMES ?

Dans la quête pour découvrir les principes ultimes de la physique, aucune approche n'a suscité autant d'espoirs que la théorie des cordes. Cette théorie a été

proposée dans les années 1970 comme tentative d'unification des quatre interactions fondamentales de la nature en un cadre cohérent; elle visait particulièrement à faire entrer la gravitation dans le cadre de la théorie quantique. Toutefois, dès le début des années 1990, les

physiciens se sont aperçus que la théorie des cordes souffrait d'un malencontreux défaut: en fait, il y en a cinq différentes! Pour ceux qui poussaient « la » théorie des cordes en tant que « théorie du Tout », c'était pour le moins embarrassant.

Au milieu des années 1990, les chercheurs ont commencé à découvrir que ces différentes théories (à laquelle s'ajoutait désormais la supergravité) décrivent en fait le même phénomène, ravivant leur espoir d'en faire finalement une théorie unifiée. Ces théories sont effectivement reliées par ce que les physiciens nomment des dualités, qui sont une sorte de dictionnaire mathématique pour traduire les concepts dans un sens ou dans l'autre. Malheureusement, chaque théorie n'est une bonne description des phénomènes que dans un ensemble donné de conditions (par exemple, uniquement pour les basses énergies). Aucune ne peut décrire à elle seule tous les aspects de l'Univers.

Les théoriciens des cordes sont maintenant convaincus que les cinq théories des cordes différentes sont juste différentes approximations d'une théorie plus fondamentale qui serait la « théorie M » (personne ne semble savoir à quoi correspond ce M. Il pourrait désigner le

terme « maîtresse », « miracle » ou « mystère », ou les trois). On essaye encore de déchiffrer la nature de la théorie M, mais il semble que l'attente habituelle d'une théorie unique de la nature ne soit pas tenable, et que pour décrire l'Univers, il nous faudra appliquer différentes théories dans différentes situations.

UN RÉSEAU DE THÉORIES

Ainsi, la théorie M n'est pas une théorie au sens classique du terme, mais un réseau de théories. Elle est comparable à une carte géographique. Pour représenter fidèlement l'ensemble de la Terre sur une surface plane, on doit recourir à un ensemble de cartes, qui couvrent chacune une région limitée. Les cartes se recouvrent à certains endroits, et là où il y a chevauchement, elles montrent le même paysage. De même, les différentes théories de la famille de la théorie M peuvent sembler très différentes, mais on peut les considérer comme des versions de la même théorie sous-jacente. Elles prédisent toutes les mêmes phénomènes là où elles se chevauchent, mais aucune ne fonctionne bien dans toutes les situations.

À chaque fois que nous développons un modèle de l'Univers qui fonctionne

bien, nous avons tendance à attribuer à ce modèle la qualité de réalité ou de vérité absolue. Mais la théorie M, comme dans l'exemple du poisson rouge, montre qu'une même situation physique peut être modélisée de différentes façons, utilisant chacune des éléments fondamentaux et des concepts différents.

Il se pourrait que pour décrire l'Univers, nous ayons à appliquer différentes théories dans différentes situations. Chaque théorie peut avoir sa propre version de la réalité, mais d'après le réalisme dépendant du modèle, cette diversité est acceptable, et on ne peut dire d'aucune version qu'elle est plus réelle qu'une autre. Ce n'est pas ce que les physiciens attendaient a priori d'une théorie de la nature, et cela ne correspond pas non plus à l'idée que l'on se fait d'ordinaire de la réalité. Mais l'Univers est peut-être ainsi.

**Cet article a été publié
dans *Pour la Science* n° 400, février 2011**



LES AUTEURS



Stephen HAWKING, professeur émérite de mathématiques à l'Université de Cambridge, en Grande-Bretagne, est l'auteur de travaux essentiels à la compréhension moderne des trous noirs et des débuts de l'Univers.



Leonard MLODINOW est physicien théoricien à l'Institut de technologie de Californie.

BIBLIOGRAPHIE

S. Hawking et L. Mlodinow, *The Grand Design*, Bantam Books, 2010.

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

M. J. Duff, *Les nouvelles théories des cordes*, *Pour la Science*, n° 246, avril 1998.

Chercheur brillant mais lourdement paralysé, le théoricien britannique est, contrairement à l'image qu'on se plaît à donner de lui, l'antithèse du savant solitaire armé de la seule puissance de son cerveau.

Hélène Mialet

Sociologie

Stephen Hawking, le mythe du génie solitaire

Stephen Hawking est l'un des rares scientifiques actuels ayant acquis une renommée internationale au sein du grand public. Célèbre pour ses travaux sur les singularités dans l'espace-temps et les trous noirs, cet astrophysicien théoricien britannique, aujourd'hui âgé de 73 ans, a aussi marqué les esprits par sa condition physique. Lourdemment paralysé par la maladie de Charcot (sclérose latérale amyotrophique) qui l'a atteint dès les années 1960, Hawking ne peut ni bouger ni parler; il communique grâce à un dispositif lui permettant de sélectionner des mots sur un écran par une légère contraction de la joue et un rayon infrarouge attaché à ses lunettes, mots prononcés ensuite par un synthétiseur vocal. Et pourtant, il poursuit son activité scientifique.

Ces deux aspects de sa personne, son talent scientifique et son lourd handicap physique, ont en partie contribué à faire de Hawking une icône. Une icône encore renforcée par le film *Une merveilleuse histoire du temps*, de James Marsh, sorti en 2014 sur les écrans.

Le 8 janvier 2013, le jour de l'anniversaire de Hawking, j'ai publié un article

dans le magazine en ligne *Wired* afin de parler de cet astrophysicien d'une façon nouvelle, en soulignant le rôle crucial joué par son entourage humain et matériel. L'article plut dans un premier temps, mais cela ne dura pas longtemps. Le tabloïd anglais *Daily Mail* s'en empara, l'interpréta de travers et me transforma en un monstre attaquant un héros national, qui plus est un homme profondément handicapé. L'article du *Daily Mail* devint viral. Je fus extrêmement choquée par la réaction que suscita mon texte, par la malhonnêteté des journalistes, mais aussi par ce qu'Internet, de par son anonymat, permet: j'ai reçu des courriels d'une violence et d'une cruauté inouïes.

La science est souvent représentée comme le produit d'un pur et bel esprit

J'avais touché, semble-t-il, une corde sensible. J'avais touché à un mythe de notre modernité, si bien incarné par Hawking: l'idée qu'un homme seul, aujourd'hui incapable de bouger et de parler, puisse atteindre les lois ultimes de l'Univers grâce à la seule force de son entendement. La science est souvent

représentée comme étant le produit d'un puissant cerveau ou d'un pur et bel esprit; or en montrant que, contrairement à l'idée reçue, Hawking n'est pas un pur cerveau, mais qu'il dépend d'un réseau complexe composé de machines et d'humains lui permettant de penser, j'avais non seulement déstabilisé l'image du héros scientifique, mais également l'image de la façon dont la science fonctionne.

Je fais partie de ce courant de sociologues, d'anthropologues et d'historiens des sciences qui se focalisent non pas sur la science établie, mais sur la science en train de se faire, en suivant les nombreuses controverses qui secouent au-

jourd'hui notre planète ou en ouvrant la porte des laboratoires pour comprendre ce qui s'y produit et comment.

Ce courant de la sociologie des sciences né dans les années 1960-1970 est nommé *science and technology studies*; on l'a souvent interprété comme étant une attaque contre la science, alors

STEPHEN HAWKING EN QUELQUES DATES

1942 Naissance le 8 janvier à Oxford, en Angleterre.

1959-1962 Études à l'Université d'Oxford, puis début de la thèse de doctorat à l'Université de Cambridge.

1963 Premiers signes de sclérose latérale amyotrophique.

1965 Obtention du doctorat, sur l'étude des singularités.

1970 Avec Roger Penrose, il montre sous certaines conditions que l'Univers a débuté par une singularité.

1974 Travaux montrant que les trous noirs « s'évaporent » (rayonnement de Hawking).

1979-2009 Chaire de professeur lucasien à l'Université de Cambridge.

1981 Selon lui, l'information est définitivement perdue dans un trou noir.

1988 *A Brief History of Time (Une brève histoire du temps)*, succès de librairie.

2004 Nouvelles idées, selon lesquelles l'information n'est pas détruite dans un trou noir.

que ce n'est pas le cas, du moins dans le cadre de la tradition de pensée à laquelle j'appartiens. L'idée est plutôt de redonner chair et consistance au monde éthéré de la science, tel qu'il a souvent été représenté, et de montrer les complexes ramifications sociales et matérielles qui lui permettent d'exister. La science en train de se faire est fascinante, elle n'est en rien froide et détachée du monde social, elle est profondément entremêlée dans de nombreuses pratiques et participe à notre fabrique sociale.

C'est dans ce contexte que je me suis demandé pourquoi le mythe du génie solitaire capable de produire de la théorie en s'appuyant sur les seules forces de sa raison est toujours aussi puissant. La sociologie des sciences nous a appris que la science est le produit du langage, formel ou informel, oral ou écrit; que se passe-t-il dans le cas d'un homme incapable de parler? Elle nous a appris que la science est le produit des gestes, de la manipulation des instruments, du savoir tacite, des habitus (manières d'être) des individus; qu'en est-il dans le cas d'un homme qui a perdu l'usage de ses mains? Elle nous a appris que la science est le produit d'un collectif; qu'en est-il

dans le cas de Hawking, qui semble incarner le génie solitaire?

Pour répondre à ces questions, Hawking et son monde sont devenus ma tribu pendant près de dix ans. J'ai observé et interrogé Hawking lui-même ainsi que ses assistants, ses infirmières, ses étudiants, d'autres physiciens avec qui il travaille, mais aussi les ingénieurs qui ont construit les logiciels qu'il utilise pour communiquer, les journalistes qui ont écrit à son propos, les artistes qui l'ont représenté.

DIX ANS AUPRÈS DE HAWKING

Mes questions étaient les suivantes. Comment est-il possible à Hawking de voyager et de donner des conférences de par le monde entier lorsqu'il lui est impossible de bouger? Comment lui est-il possible d'écrire des articles scientifiques alors qu'il ne peut pas courir à la bibliothèque chercher un livre, discuter longuement dans les couloirs de son bureau ou de la cafétéria ou feuilleter rapidement une revue? Comment lui est-il possible de résoudre des équations alors qu'il ne peut utiliser un crayon et du papier, faire des ratures ou prendre une craie et gribouiller ses idées au

tableau? Comment lui est-il possible de donner un entretien lorsque répondre à la moindre question prend des heures? Comment lui est-il possible de séduire une assemblée quand il ne peut pas jouer de sa voix et de ses gestes pour la convaincre?

La maladie, qui le prive de l'usage de ses mains, souligne le rôle fondamental du corps dans le travail mathématique

Est-ce que l'action d'un homme aux multiples facettes (théoricien, conférencier, auteur, acteur, etc.) peut se réduire au fonctionnement de son cerveau? C'est ainsi que la presse le représente et c'est ainsi que Hawking parle de lui: il aime répéter qu'un astrophysicien n'a besoin de rien d'autre que son esprit pour produire des théories. C'est aussi la façon dont le nouveau film de J. Marsh le représente. J'ai donc essayé de comprendre ce que Hawking faisait, comment il communiquait et comment on communiquait avec lui, quels genres d'informations passaient par son ordinateur, qu'est-ce qui était négocié dans le

face à face. J'ai essayé de décrire ce qu'il faisait et quels genres de compétence on lui attribuait.

«Hawking, c'est sa tête». Voilà ce qu'on apprend quand on parcourt les couloirs du Département de mathématiques appliquées et de physique théo-

rique à l'Université de Cambridge, et que l'on interroge ceux qui travaillent avec lui – ses collègues et ses étudiants. «Puisqu'il ne peut pas faire des calculs, il doit penser. C'est logique!», me dit l'un d'eux. En effet, au dire de tous, ce qui le caractérise, c'est son intuition, c'est-à-dire sa capacité à repérer les problèmes intéressants et à entrevoir la solution. Il a, semble-t-il, la faculté d'aller droit au but sans faire de calculs, de prendre des raccourcis.

Si les compétences intellectuelles attribuées au scientifique semblent parfaitement adaptées au domaine de la physique qu'il pratique, le physicien

théoricien américain Kip Thorne, comme tant d'autres, voit également un lien direct entre la progression de la maladie de Hawking et sa façon de penser. Inévitablement, en le privant de l'usage de ses mains, elle a limité l'exercice de manipulation gestuelle qu'impose tout travail calculatoire, mettant en relief, par son absence, le rôle fondamental d'un corps mobile dans un travail mathématique de type analytique: «Parce que c'est impossible de faire de longs et complexes calculs sans écrire des équations. De façon étonnante, il se débrouille assez bien avec les équations, mais il ne peut pas le faire aussi bien que la plupart des autres physiciens qui se trouvent à la pointe dans le même domaine.»

UN HANDICAP TRANSFORMÉ EN AVANTAGE?

De fait, Hawking aurait, dit-on et dit-il, transformé son handicap en avantage et développé une façon de court-circuiter ces limites, en redéfinissant les questions de façon à ce qu'il puisse visualiser, soit la solution (c'est-à-dire voir à quoi cette dernière ressemblerait physiquement), soit le cadre dans lequel le problème se pose afin de le

résoudre en manipulant mentalement des images (des formes, des structures géométriques, des modèles élaborés) plutôt que des équations. Il serait ainsi devenu particulièrement bon dans les problèmes qu'il peut retraduire géométriquement, et moins bon dans ceux qui résistent à ce genre de transformation.

Hawking semble confirmer cette intuition et justifier sa façon de penser – et de faire de la physique – non pas en affirmant, comme il l'a fait auparavant, que le corps n'aurait pas à jouer un rôle nécessaire dans le cadre d'un travail théorique, mais en évacuant ce sur quoi semblait reposer la spécificité de la méthode et de la rationalité scientifiques : le langage mathématique. Nul n'a besoin d'équations pour faire de la physique, écrit-il, les idées fondamentales peuvent être expliquées en mots et en images.

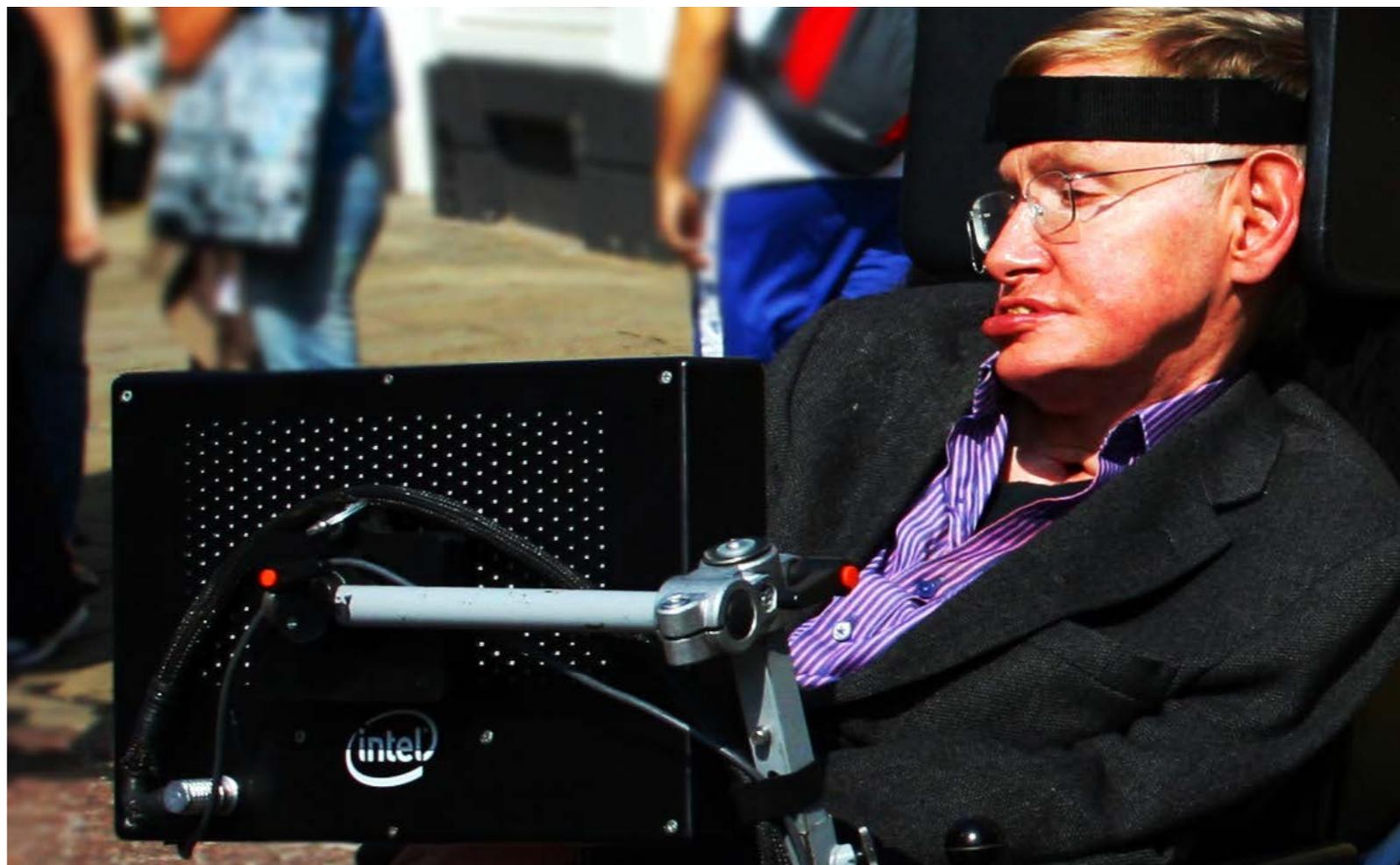
Pourtant, ce qui semble être le produit d'une visualisation purement introspective et mentale – manipuler des images dans sa tête – repose en partie, pour Hawking, sur la capacité ou l'acte physique de voir avec ses yeux des diagrammes : des représentations en deux dimensions, c'est-à-dire des dispositifs matériels, concrets et « visualisables ».

Comme le note Christophe Galfard, l'un des (ex) étudiants de Hawking : « S'il n'y avait pas eu les découvertes de diagrammes, que ce soit par Roger Penrose ou Richard Feynman, ça aurait rendu la vie de Stephen beaucoup plus difficile. »

Les diagrammes offriraient donc, pour lui, des possibilités, voire une ouverture, qu'une formule mathématique

obstruerait, à l'inverse. Mais, à nouveau, comment Hawking procède-t-il ? À la différence de ses collègues, il ne peut écrire les équations à la main, ni dessiner les diagrammes lui-même. Le rôle de ses étudiants est donc fondamental.

Hawking est en général entouré de quatre étudiants qu'il voit régulièrement. Ils sont respectivement en

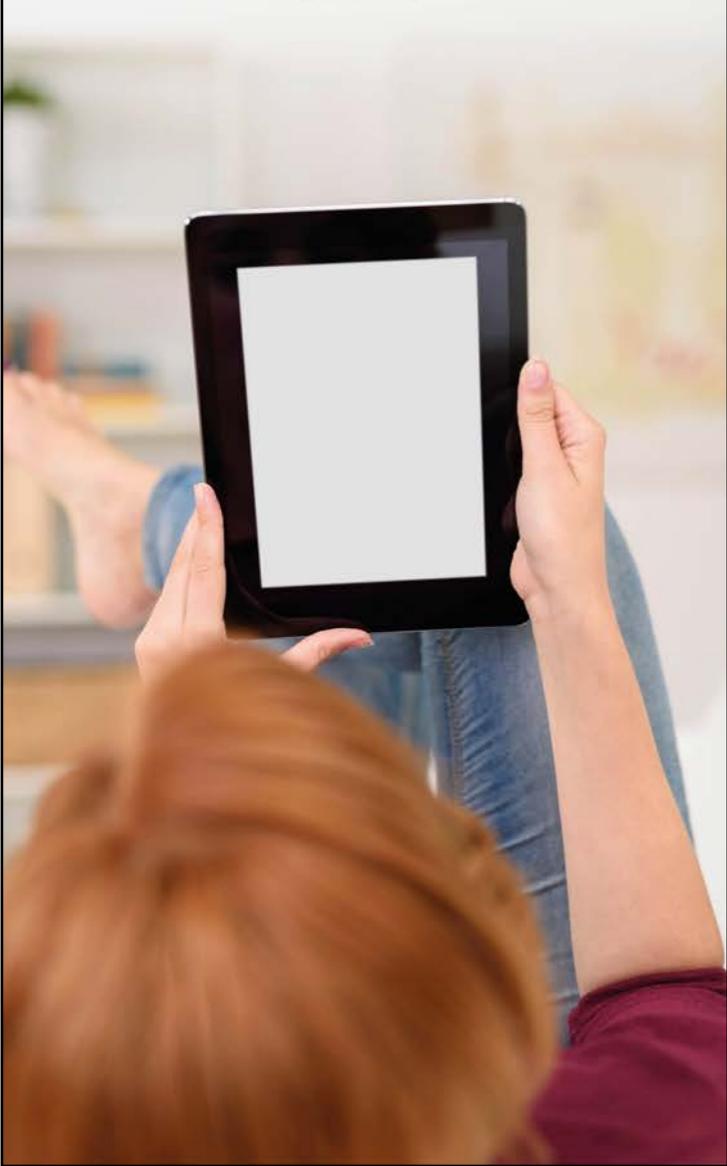


Stephen Hawking est assisté de machines et de personnes qui lui permettent non seulement de communiquer, mais aussi de réfléchir et raisonner sur les problèmes posés dans son domaine scientifique. Son environnement technique et humain joue ainsi un rôle tant matériel qu'intellectuel.

Rejoignez-nous
sur Facebook

POUR LA
SCIENCE

facebook.com/pourlasciencemag



première, deuxième, troisième et quatrième année de thèse de doctorat. La durée d'une thèse est de quatre ans. À chaque fois qu'un étudiant quitte le cercle, un autre le remplace. Loin d'être les simples mains, jambes, bras de Hawking (en quelque sorte le simple corps exécutif de son esprit), ces jeunes étudiants brillent par leur excellence. Ils sont recrutés à l'Université de Cambridge par un examen réputé (*Certificate of Advanced Study in Mathematics (Part III)*), qui attire chaque année des centaines d'étudiants du monde entier. Cent étudiants sont retenus. À la fin des neuf mois préparatoires, les quatre meilleurs sortants auront le privilège d'être auditionnés par Hawking, qui en choisira un seul.

Hawking assigne à ses étudiants, en fonction de leurs compétences et de leurs intérêts mutuels (grâce à l'examen, il connaît leurs points forts et leurs faiblesses), des sujets différents, de telle sorte qu'il y ait un minimum de recouvrement entre eux. Cela explique peut-être sa capacité à multiplier ses champs d'intervention, à « avoir une vue d'ensemble », comme disent de lui ses étudiants. En général, l'étudiant recruté

poursuit le sujet de recherche de celui qui le précède. Lorsque je les ai rencontrés pour la première fois, le premier étudiait les trous noirs virtuels (trous noirs éphémères formés par les fluctuations quantiques de l'espace-temps) et leur influence sur la prédictibilité, le second la cosmologie quantique et la propagation des trous noirs, le troisième la formulation mathématique de la relativité générale, et le quatrième la stabilité de l'état du vide dans la théorie des supercordes.

LES YEUX POUR PENSER ET POUR COMMUNIQUER

Aussi, à celui qui dit qu'il serait « facile pour lui d'être un astrophysicien, parce que tout est dans la tête, aucune habileté physique n'est requise », on peut objecter que pour penser, il faut bien utiliser ses mains, et si on ne le peut pas, celles des autres, mais surtout ses yeux pour regarder ces derniers travailler, écrire, calculer et dessiner.

Depuis 1986, date à laquelle il a subi une trachéotomie, Hawking a perdu sa voix et communique grâce à un ordinateur, les mots proposés par celui-ci étant sélectionnés *via* un mouvement de l'œil, tandis qu'un synthétiseur peut énoncer

vocalement ce qu'il a écrit. Le processus étant assez lent, ses étudiants communiquent souvent avec lui en lui posant des questions auxquelles il répond par oui ou par non en haussant (ou non) un sourcil.

Aussi, de la même façon que le physicien a développé une façon de sélectionner les informations que lui soumet

Les diagrammes de Penrose-Carter lui permettent de visualiser les espaces de façon intuitive

son environnement (humains ou machines) en haussant ou non un sourcil, il pourra, simultanément, mobiliser et sélectionner un certain nombre d'informations à partir de diagrammes dessinés sous ses yeux. Ses yeux vont ainsi devenir le point d'articulation et d'activation de ce réseau de compétences composé d'individus, de machines et d'outils théoriques.

Le plus souvent, il demandera à voir les diagrammes de Penrose-Carter – une application directe des méthodes d'étude globale en théorie de la relativité

générale, inventées par le mathématicien britannique Roger Penrose dans les années 1960. En général, Hawking utilise cette technique lorsqu'on lui parle d'un certain univers, d'un certain espace, par exemple un espace-temps où deux trous noirs accélèrent l'un par rapport à l'autre, ou d'une certaine solution des équations d'Einstein (qui

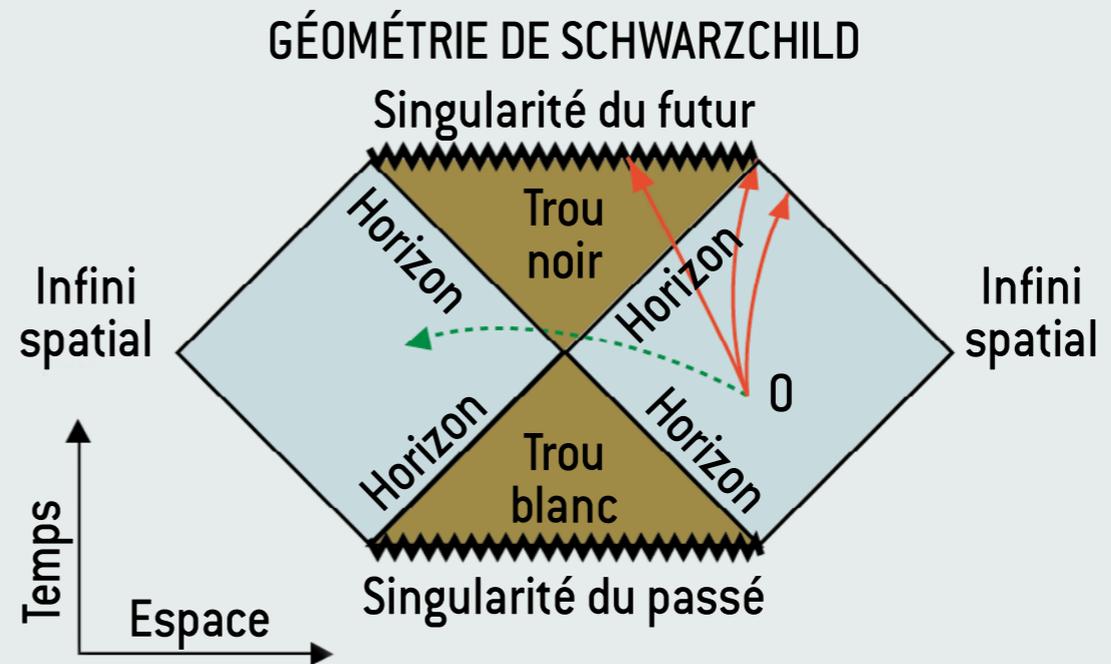
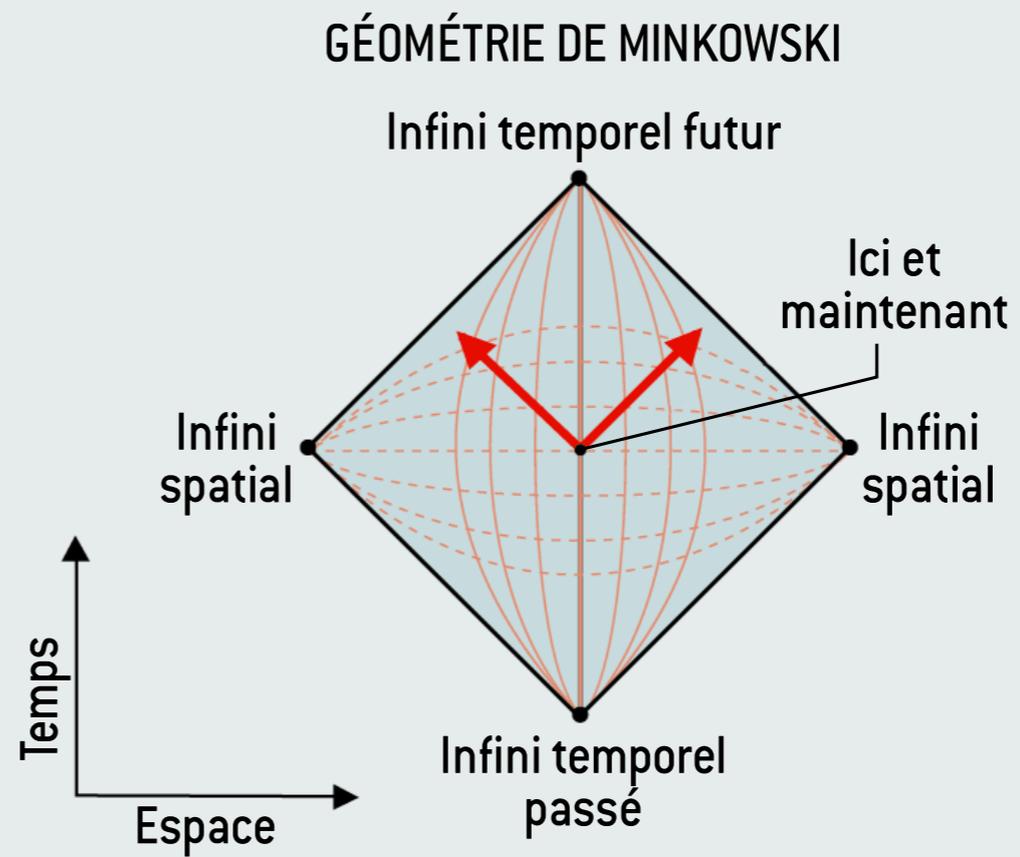
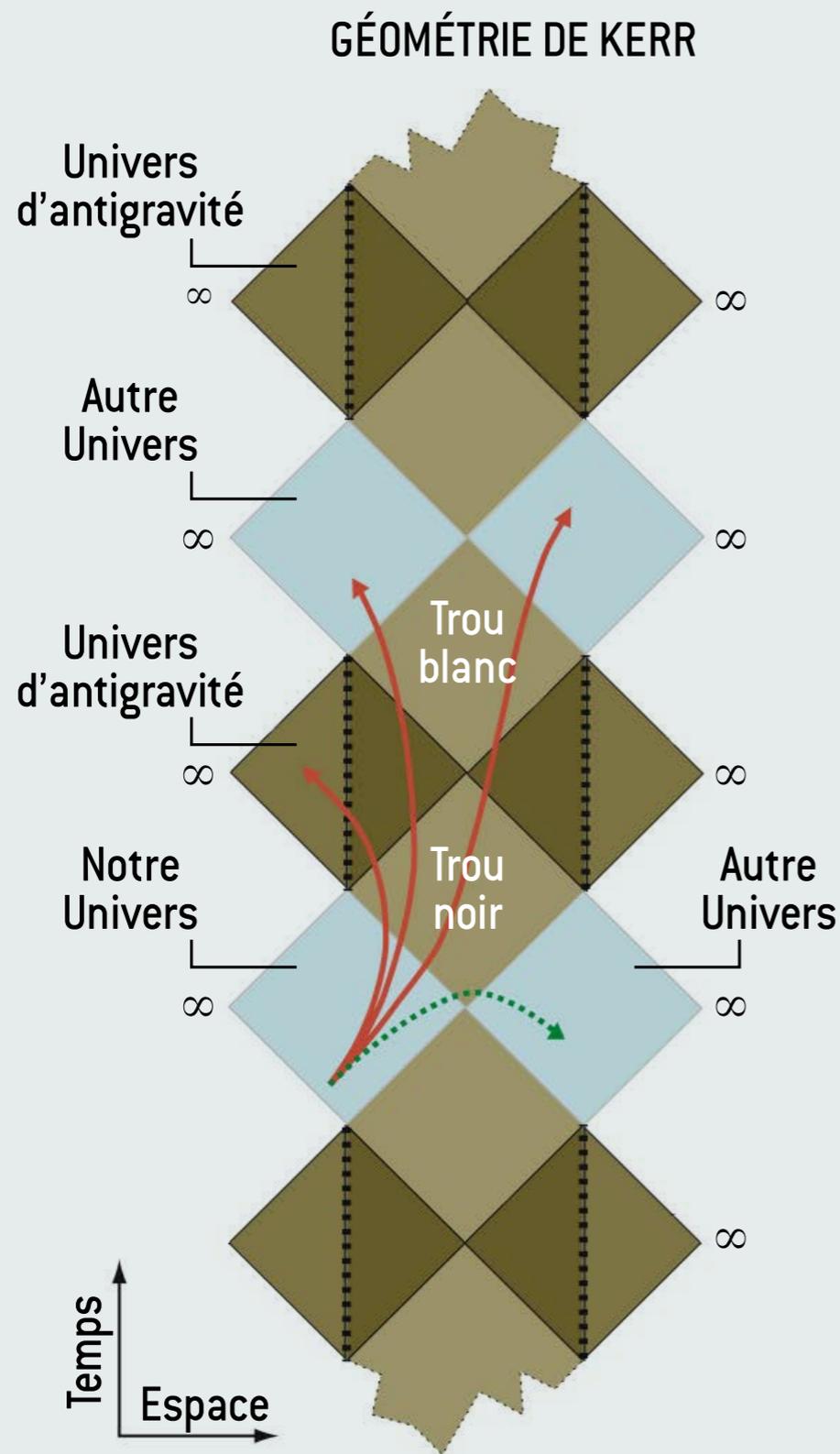
relie la géométrie de l'espace-temps à son contenu en matière et énergie). Un diagramme de Penrose-Carter est un outil graphique qui permet de visualiser « l'univers en entier » dans une image de taille finie, traduisant elle-même une équation parfois compliquée. Grâce au diagramme, le savant peut dominer du regard ce qui, autrement, le dépasserait complètement et de fait serait invisible.

Ainsi, l'ingéniosité du diagramme de Penrose-Carter permet d'appréhender « en un clin d'œil » les liens de causalité d'un univers entier. Comme le

mentionne le cosmologiste américain Alan Guth, « il déforme l'espace de façon à ce que la lumière se propage en ligne droite, ce qui est très utile pour comprendre comment différents points sont connectés les uns avec les autres, rien ne pouvant se propager plus vite que la lumière. » Grâce à ce dispositif, il est possible de faire des courts-circuits : « C'est très pratique, il n'y a pas de besoin de faire 40 000 calculs, confirme l'étudiant de Hawking, ça se voit. » Un diagramme de Penrose-Carter est donc un outil heuristique permettant de visualiser un espace « qui devient intuitif sous certains aspects ».

LE RÔLE CLEF DES ÉTUDIANTS

En d'autres termes, le point de vue global, les connexions, les courts-circuits, la capacité intuitive que l'on attribue au pouvoir de l'esprit de Hawking sont en partie le produit de ces outils. En ce sens, le handicap de ce chercheur rend visible un style de pensée visuelle ou « diagrammatique ». Mais, à nouveau, comme nous l'avons vu, s'il ne peut pas utiliser ses mains pour écrire et manipuler des équations, il lui est



Trois exemples de diagrammes de Penrose-Carter, qui permettent de résumer sur un schéma les liens de causalité au sein d'un espace-temps, en fonction de la géométrie qui le caractérise. Pour travailler, Stephen Hawking a besoin de ces diagrammes, que ses étudiants sont chargés de dessiner.

également impossible de dessiner ces diagrammes. Ses étudiants sont donc chargés de le faire pour lui. Et de fait, pour pouvoir travailler avec lui, de la même façon qu'ils auront développé une façon de communiquer avec lui en lisant le langage de son corps, ils devront apprendre à parler et à écrire dans la même langue... diagrammatique.

Or la tâche est loin d'être simple. Savoir lire un diagramme de Penrose-Carter n'exige pas de compétences surhumaines; tout étudiant avancé apprend à maîtriser cet outil devenu standard dans le domaine de la relati-

Calcul, dessin, réinterprétation : Hawking doit déléguer plus que tout autre

tivité générale; il doit donc savoir pourquoi on le fait et comment on l'obtient en équation, mais on ne lui demande pas forcément d'être en mesure de le dessiner. La difficulté est d'autant plus grande qu'il faut d'abord connaître la géométrie d'un espace-temps avant de pouvoir la transformer en un diagramme. En d'autres termes, le diagramme est une certaine traduction

de cette géométrie, elle-même solution des équations d'Einstein.

En bref, pour pouvoir visualiser, il faut qu'il y ait d'abord eu calcul. Des calculs effectués par des étudiants habiles, triés sur le volet et formés à certaines méthodes. Travaillant sans relâche, ils «découvrent» des espaces et adaptent ces diagrammes. Enfin, à chaque fois qu'on lui montre un nouveau diagramme, Hawking peut le mémoriser: «Et quand il l'a vu une fois, il l'a dans la tête», dit l'un de ses étudiants. C'est ainsi que certains expliquent sa productivité.

Hawking a certainement poussé plus loin que d'autres ce travail de mémorisation des diagrammes, faute de pouvoir alléger ses tâches cognitives en dessinant lui-même ces schémas. Cependant, pour jouer leur rôle dans le raisonnement scientifique, ces diagrammes ne peuvent rester gravés uniquement dans sa mémoire. Ils doivent être mobilisés, redessinés, rendus

visibles sous les yeux du scientifique à chaque fois qu'un problème se pose, soit parce qu'il le demande explicitement, soit parce que ses étudiants anticipent sa demande. Nous sommes loin ici de l'image du génie solitaire.

UNE MULTIPLICITÉ DE CORPS ÉTENDUS

Aussi, contrairement à ce que l'on dit de Hawking (et à ce qu'il dit de lui-même), à savoir que tout serait «dans la tête», il doit déléguer plus que tout autre et, qui plus est, de personne à personne. Ce sont ses étudiants qui calculent et dessinent. Ce sont eux également qui font le travail de la preuve, qui étendent, traduisent, réinterprètent et recontextualisent ses idées. Tous les aspects fondamentaux de la «science pure» – pensée, preuve, calcul, contexte de découverte et de justification, réception du travail scientifique – sont *incorporés* et distribués dans le laboratoire.

Ainsi, bien que Hawking incarne la représentation du génie et, par extension, la conception traditionnelle de la science – un monde fait de théories produites ou trouvées rationnellement, un monde de chercheurs neutres et

L'AUTEURE



Hélène Mialet est philosophe, sociologue et anthropologue des sciences. Elle enseigne à l'Université de Californie à Davis et à Berkeley, aux États-Unis. Ses travaux portent sur l'invention scientifique, la subjectivité, la cognition distribuée, la relation hommes-machines.

BIBLIOGRAPHIE

H. Mialet, **À la recherche de Stephen Hawking**, Odile Jacob, 2014 (en anglais : *Hawking Incorporated*, University of Chicago Press, 2012).

H. Mialet, blog sur Scientific American, 31/12/2014 : <http://bit.ly/140fVnJ>

H. Mialet, **On Stephen Hawking, Vader and being more machine than human**, Wired, janvier 2013 (www.wired.com/2013/01/hawking-machine-man-robots/).

H. Mialet, **The extended body of Hawking**, *Interdisciplinary Science Review*, vol. 37(4), pp. 354-371, 2012.

H. Mialet, **La statue de Stephen Hawking, ou comment se représenter la science de son vivant**, dans S. Houdart et O. Thiery (éds.), *Humains, non-humains*, La Découverte, 2011.

objectifs vivant dans un monde de pensée pure –, il est en réalité matérialisé et distribué dans une série de collectifs liés entre eux et se recouvrant partiellement. Tout est long, tout est difficile et tout est rendu possible par cet ensemble de prothèses humaines, mécaniques et intellectuelles qui lui permettent d'être, d'agir et de penser.

Si Hawking a bien un corps, il a également ce que j'ai appelé une multiplicité de corps étendus, dont il est à la fois un élément et un produit. Cela signifie-t-il que ce scientifique soit le seul à dépendre de ce genre de collectif? Non, évidemment. Parce que son handicap l'oblige à déléguer plus que tout autre, Hawking rend visible ce que trop souvent l'on ne voit pas : le fait que les scientifiques ne peuvent pas penser sans être attachés à des instruments, des machines, des outils théoriques, des techniques, des étudiants et des institutions.

Cela nous permet également de repenser différemment la question du « génie ». Est-ce que tout est dans sa tête, comme la presse aime souvent à le représenter? Non, c'est plutôt l'inverse ; tout se situe à l'extérieur de son cerveau et se fait et refait par les outils et par les

personnes qui sont autour de lui. Hawking est-il donc une pure construction sociale? Évidemment non, il est entièrement nourri par un réseau, qu'il alimente en retour. Il est un produit de toutes ces associations, mais il est aussi bien plus... C'est un homme qui, plus qu'un autre, est collectivisé. Il est de ce fait plus singulier et, du même coup, plus visible. Il est, ce que j'ai appelé, un sujet distribué-centré.

**Cet article a été publié dans
Pour la Science n° 448, février 2015**



Deux éminents spécialistes de la relativité exposent leurs conceptions de l'Univers, son évolution, et l'impact de la théorie quantique.

**Stephen Hawking
et Roger Penrose**



Relativité générale

La nature de l'espace et du temps

Roger Penrose (à droite) a fait partie du jury de thèse de Stephen Hawking. Ils ont travaillé ensemble sur l'effondrement gravitationnel des étoiles, les singularités et les trous noirs. Penrose est également connu pour les pavages géométriques qui portent son nom.

En 1994, Stephen Hawking et Roger Penrose donnèrent une série de cours publics sur la relativité générale à l'Institut Isaac Newton de l'Université de Cambridge.

Ces conférences ont été publiées cette année par Princeton University Press, sous le titre *The Nature of Space and Time*, et les extraits choisis dans cet article permettent de comparer, voire d'opposer, les opinions des deux scientifiques. Bien qu'ils partagent un héritage commun en physique – Penrose siégeait dans le jury de thèse de Hawking, à Cambridge –, les orateurs ont une vision différente de la mécanique quantique et de ses conséquences sur l'évolution de l'Univers. Ils s'opposent, en particulier, sur ce qu'il advient de l'information emmagasinée par un trou noir et sur la raison de la différence entre le début et la fin de l'Univers.

Stephen Hawking a découvert, dans les années 1970, que, par des effets tunnels quantiques, les trous noirs émettent des particules. Le trou noir s'évapore au cours du processus, de sorte qu'il ne subsistera peut-être plus rien de la masse originelle. Toutefois, pendant leur formation, les

trous noirs engloutissent énormément de données : les types, propriétés et configurations des particules englouties. Selon la théorie quantique, l'information doit être conservée, mais ce qu'il en advient demeure l'objet d'un vif débat. Stephen Hawking et Roger Penrose pensent tous deux que, lorsqu'un trou noir rayonne, il perd l'information qu'il contenait. Toutefois Stephen Hawking prétend que cette perte est irrémédiable, tandis que Roger Penrose affirme que la perte est compensée par des mesures spontanées des états quantiques qui réintroduisent de l'information dans le système.

Penrose et Hawking s'opposent sur ce qu'il advient de l'information emmagasinée par un trou noir

S'ils sont tous deux d'accord sur la nécessité d'une théorie quantique de la gravité pour décrire la nature, ils divergent sur certains aspects de cette théorie. R. Penrose pense que, même si les forces fondamentales de la physique des particules sont symétriques dans le temps – inchangées après renversement

du sens du temps –, la gravité quantique violera cette symétrie. Cette asymétrie temporelle expliquera alors pourquoi l'Univers était quasi uniforme au début, ainsi qu'en témoigne le rayonnement fossile vestige du Big Bang, tandis qu'à sa fin l'Univers sera fortement hétérogène.

R. Penrose tente d'incorporer cette asymétrie temporelle dans son hypothèse de la courbure de Weyl. Albert Einstein découvrit que la présence de matière déforme l'espace-temps, mais que celui-ci peut aussi posséder une courbure intrinsèque dénommée courbure de Weyl. Les ondes gravitation-

nelles et les trous noirs, par exemple, permettent à l'espace-temps de se courber, même dans des régions vides. Au début de l'Univers, la courbure de Weyl valait probablement zéro, mais selon R. Penrose, dans un Univers moribond, les très nombreux trous noirs entraîneront une courbure de Weyl importante.

Cette propriété distinguera la fin de l'Univers de son commencement.

S. Hawking convient que l'explosion primordiale (Big Bang) et l'implosion finale (Big Crunch) seront différentes, mais il ne souscrit pas à une asymétrie temporelle des lois de la nature. Pour lui, la raison sous-jacente de cette différence réside dans la manière dont l'évolution de l'Univers est programmée. Il postule une sorte de démocratie, déclarant qu'aucun point de l'Univers ne peut être particulier; pour cette raison, l'Univers ne peut avoir de frontière. S. Hawking affirme que cette absence de frontière

explique l'uniformité du rayonnement cosmologique.

Les physiciens divergent, enfin, dans leur interprétation de la mécanique quantique. S. Hawking croit que toute théorie doit simplement fournir des prédictions qui s'accordent aux données expérimentales. R. Penrose pense qu'une simple comparaison des prédictions et des expériences ne suffit pas à expliquer la réalité. Il fait remarquer que la théorie quantique requiert une « superposition » des fonctions d'onde, un concept qui peut conduire à des absurdités. Les physiciens reprennent donc les fils des célèbres débats entre

Einstein et Niels Bohr sur les implications bizarres de la théorie quantique. Stephen Hawking, à propos des trous noirs quantiques

STEPHEN HAWKING, À PROPOS DES TROUS NOIRS QUANTIQUES

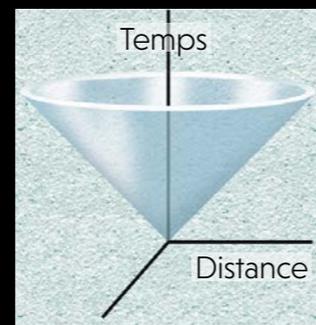
La théorie quantique des trous noirs [...] semble introduire un nouveau degré d'imprévisibilité en physique, au-dessus et par-delà l'incertitude habituellement associée à la mécanique quantique. Les trous noirs semblent avoir une entropie intrinsèque et perdre de l'information en provenance de notre région de l'Uni-

PRESSION DE DÉGÉNÉRESCENCE

Deux électrons ou deux neutrons ne peuvent occuper le même état quantique. Donc, quand un ensemble de ces particules est comprimé dans un petit volume, celles qui occupent les états quantiques les plus élevés acquièrent beaucoup d'énergie. Le système résiste alors à toute compression supplémentaire, exerçant une poussée vers l'extérieur, dénommée pression de dégénérescence.

CÔNES DE LUMIÈRE

Pour figurer l'espace-temps, les physiciens portent habituellement le temps sur un axe vertical et l'espace sur des axes horizontaux. Dans ce schéma, les rayons lumineux émanant de n'importe quel point de l'espace se déploient le long de la surface d'un cône vertical. Comme aucun signal ne peut couvrir plus de distance, en un temps donné, que la lumière, tout signal émanant de ce point est confiné à l'intérieur du volume du cône de lumière.



SURFACE NULLE

Une surface dans l'espace le long de laquelle voyage la lumière porte le nom de surface nulle. La surface nulle entourant un trou noir, appelée horizon des événements, est une coquille sphérique. Rien de ce qui tombe à l'intérieur de l'horizon des événements ne peut en sortir.

vers. Ces affirmations, il faut en convenir, sont controversées: nombre de ceux qui travaillent dans le domaine de la gravité quantique, ce qui inclut presque tous ceux qui y sont arrivés par le biais de la physique des particules, rejettent d'instinct l'idée que l'information sur l'état quantique d'un système physique puisse être perdue. Cela dit, leurs efforts pour montrer comment l'information peut sortir d'un trou noir n'ont guère été concluants. Je crois qu'au bout du compte ils seront obligés d'accepter ma suggestion selon laquelle de l'information est perdue, de même qu'ils sont convenus que les trous noirs rayonnent, à l'encontre de leurs opi-

nions préétablies. [...]

Comme la gravité est attractive, elle tend à rassembler la matière de l'Univers pour former des objets tels que les étoiles et les galaxies. Ceux-ci peuvent, pendant un certain temps, résister à la poursuite de la contraction, par leur pression thermique dans le cas des étoiles, ou par leur rotation et leurs mouvements internes dans le cas des galaxies. Finalement, la chaleur ou le moment angulaire ayant été évacués, l'objet stellaire se met à rétrécir. Si la masse est inférieure à environ une fois et demi celle du Soleil, la contraction peut être stoppée par la pression de dégénérescence des électrons ou des

neutrons. L'objet se stabilise, donnant respectivement une naine blanche et une étoile à neutrons. Si la masse est supérieure à cette valeur limite, la contraction se poursuit. Quand l'objet, à force de rétrécir, atteint une certaine taille critique, le champ de gravitation à sa surface est si intense que les cônes de lumière sont inclinés vers l'intérieur. [...] On voit que même les rayons lumineux émergents sont courbés les uns vers les autres et finissent par converger au lieu de diverger. Cela signifie qu'il existe une surface fermée piégée. [...]

Il existe ainsi une région de l'espace-temps d'où il est impossible de s'échapper

MOMENTS MULTIPOLAIRES

La dynamique d'un objet peut se résumer à la détermination de ses moments multipolaires. Chaque moment est calculé en divisant un objet en petits éléments, en multipliant la masse de chaque élément par une puissance de sa distance au centre et en sommant ces termes pour tous les éléments. Une sphère, par exemple, n'a qu'un moment monopolaire, alors qu'une haltère a un moment dipolaire, qui lui permet d'acquérir facilement un moment angulaire.

PULSARS

Certaines étoiles en fin de vie s'effondrent en étoiles à neutrons, objets massifs entièrement composés de neutrons entassés. Les étoiles à neutrons en rotation rapide deviennent des pulsars, ainsi appelés parce qu'ils émettent des impulsions de rayonnement électromagnétique à des intervalles extrêmement réguliers, de quelques millisecondes. Un pulsar tourne parfois autour d'une autre étoile à neutrons, formant un système double.



ESPACE DES PHASES

Un diagramme de l'espace des phases est un volume mathématique multidimensionnel. Dans cet espace, on représente, selon les axes de coordonnées, les positions et les quantités de mouvement de chaque particule. On peut alors représenter le mouvement d'un paquet de particules par un élément de volume mobile dans l'espace des phases.

vers l'infini. À cette région, on donne le nom de trou noir. Sa bordure, dénommée horizon des événements, est une surface nulle du genre lumière formée par les rayons lumineux qui ne parviennent tout juste pas à s'échapper. [...]

Une grande partie de l'information est perdue lorsqu'un corps s'effondre pour former un trou noir. Le corps qui s'effondre est décrit par un très grand nombre de paramètres, à savoir les différents types de matière et les moments multipolaires de la distribution de masse. Pourtant le trou noir qui se forme à partir de ce corps est complètement indépendant du type de matière et perd rapidement tous ses moments multipolaires, à l'exception des deux premiers: le moment monopolaire qui n'est autre que la masse, et le moment dipolaire, c'est-à-dire le moment angulaire.

Cette perte d'information n'avait guère d'importance en théorie classique. On pouvait toujours penser que toute l'information relative au corps qui s'effondre était encore présente à l'intérieur du trou noir. Certes, il aurait été très difficile à un observateur extérieur au trou noir de décrire à quoi ressemble le corps qui s'effondre, mais, en théorie classique,

c'était encore possible en principe. L'observateur était censé ne jamais perdre de vue le corps en train de s'effondrer. Celui-ci semblait ralentir et devenir de plus en plus pâle à mesure qu'il approchait de l'horizon des événements. L'observateur pouvait encore voir de quoi était fait le corps et comment était répartie la masse.

La théorie quantique a changé tout cela. Tout d'abord, le corps qui s'effondre n'émet qu'un nombre limité de photons avant de traverser l'horizon des événements. Ces photons ne suffisent pas à transporter toute l'information relative au corps qui s'effondre. Autrement dit, en théorie quantique, il est impossible à un observateur extérieur de mesurer l'état du corps qui s'effondre. On pourrait croire que cela n'a guère d'importance, car l'information pourrait très bien se trouver encore à l'intérieur du trou noir, même s'il n'est pas possible de la mesurer à partir de l'extérieur. C'est là qu'intervient un second effet de la théorie quantique des trous noirs. [...]

La théorie quantique oblige les trous noirs à rayonner et à perdre de leur masse. Il semble que les trous noirs finissent par disparaître complètement, emportant avec eux l'information contenue en leur

sein. J'avancerai des arguments indiquant que cette information est réellement perdue et ne réapparaît pas sous une autre forme. Je montrerai que cette perte d'information devrait introduire en physique un nouveau niveau d'incertitude au-dessus et par-delà l'incertitude habituellement associée à la théorie quantique. Malheureusement, à la différence du principe d'incertitude de Heisenberg, la confirmation expérimentale de ce niveau supplémentaire est assez difficile à obtenir dans le cas des trous noirs.

ROGER PENROSE, SUR LA THÉORIE QUANTIQUE ET L'ESPACE-TEMPS

Les grandes théories physiques du xx^e siècle ont été la théorie quantique, la relativité restreinte, la relativité générale et la théorie quantique des champs. Ces théories ne sont pas indépendantes: la relativité générale s'est édifiée sur la base de la relativité restreinte, et la théorie quantique des champs a été construite à partir de la relativité restreinte et de la théorie quantique.

On a pu dire que la théorie quantique des champs est la plus précise de toutes les théories jamais élaborées, sa

précision étant d'environ 10-11. Je voudrais pourtant faire remarquer que la relativité générale a maintenant été vérifiée à 10-14 près (et que cette précision n'est apparemment limitée que par celle des horloges terrestres). Je pense en affirmant cela au pulsar binaire PSR 1913 + 16 de Russell Hulse et Joseph Taylor, constitué de deux étoiles à neutrons en orbite l'une autour de l'autre, l'une d'entre elles étant un pulsar. La relativité générale prédit que cette orbite doit progressivement se rétrécir (et la période diminuer) parce que de l'énergie est perdue lors de l'émission d'ondes gravitationnelles. C'est effectivement ce qui a été observé, et la

description complète du mouvement [...] est en accord avec la relativité générale (dans laquelle j'inclurai dorénavant la théorie newtonienne); et ce, avec la précision remarquable déjà signalée, sur une période de vingt ans. C'est à juste titre que l'on a décerné le prix Nobel aux deux « découvreurs » de ce système. Les physiciens quantiques ont toujours prétendu que, en raison de la précision atteinte par leur théorie, c'est à la relativité générale de changer et de s'adapter à leur moule; je pense qu'aujourd'hui c'est la théorie quantique des champs qui doit se maintenir au niveau.

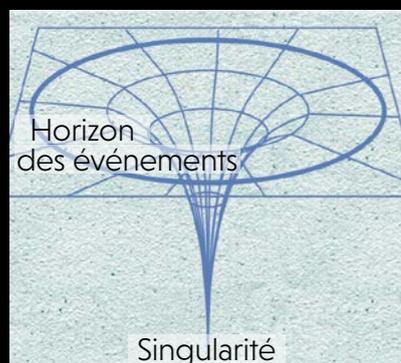
Bien qu'ayant remporté des succès

remarquables, les quatre théories citées ne sont pas sans poser des problèmes. [...] La relativité générale prédit l'existence de singularités d'espace-temps. En théorie quantique, il y a le « problème de la mesure », que je décrirai plus tard. On peut admettre que la solution de ces divers problèmes se trouve dans le fait que ces théories sont incomplètes en elles-mêmes. Par exemple, beaucoup de physiciens pensent par anticipation que la théorie quantique des champs pourrait « estomper » les singularités de la relativité générale. [...]

Examinons maintenant l'information qui est perdue dans les trous noirs,

SINGULARITÉS

Selon la relativité générale, dans des conditions extrêmes, certaines régions de l'espace-temps acquièrent des courbures infiniment grandes, devenant ainsi des singularités, où les lois normales de la physique ne s'appliquent plus. Les trous noirs, par exemple, devraient contenir des singularités dissimulées à l'intérieur de l'horizon des événements.



INVARIANCE CPT (CHARGE-PARITÉ-TEMPS)

Ce principe puissant requiert que les théories décrivant les particules doivent rester vraies, même lorsque la charge, la parité et le temps sont simultanément inversés. En d'autres termes, le comportement d'un électron de charge négative et de spin donné se déplaçant vers le futur est identique à celui d'un positron de charge positive et de spin inverse se mouvant vers le passé.

PROPOSITION «SANS FRONTIÈRE »

S. Hawking suggère que l'évolution de l'Univers est expliquée par la proposition «sans frontière», qu'il formula en 1983, avec James Hartle, de l'Université de Californie. L'idée que l'Univers ne possède pas de frontière impose des contraintes sur la résolution des équations de la cosmologie. S. Hawking croit que ces conditions conduiront à une fin de l'Univers différente de son état initial, déterminant ainsi la direction de la flèche du temps.

dont je soutiens qu'elle est reliée au dernier problème évoqué. Je suis d'accord avec presque tout ce que Stephen Hawking a dit sur le sujet. Toutefois, alors que Hawking voit dans l'information perdue du fait des trous noirs une incertitude supplémentaire introduite dans la physique au-dessus et par-delà l'incertitude de la théorie quantique, je la considère pour ma part comme une incertitude «complémentaire». [...] Il se peut qu'une petite partie de l'information s'échappe au moment où le trou noir s'évapore, [...] mais ce petit apport d'information sera bien inférieur à la perte d'information subie pendant l'effondrement (dans ce que je considère comme une représentation raisonnable de la disparition finale du trou).

Si nous enfermons ce système dans une grande boîte, c'est une expérience de pensée, nous pouvons considérer l'évolution dans l'espace des phases de la matière située à l'intérieur de la boîte. Dans la région de l'espace des phases correspondant aux situations où un trou noir est présent, les trajectoires de l'évolution physique convergent et les volumes le long de ces trajectoires rétrécissent. Cela à cause de l'information perdue dans la

singularité à l'intérieur du trou noir. Ce rétrécissement contredit directement le théorème de la mécanique classique, qui porte le nom de théorème de Liouville, selon lequel les volumes dans l'espace des phases restent constants. [...] Un espace-temps contenant un trou noir ne respecte donc pas cette loi de conservation. Toutefois, dans mon modèle, cette

« Je sais que Stephen Hawking n'aime pas qu'on maltraite les chats, même dans des expériences de pensées »

perte de volume de l'espace des phases est compensée par un processus de mesure quantique «spontanée» au cours duquel de l'information est gagnée et au cours duquel les volumes de l'espace des phases augmentent. C'est en ce sens que je considère l'incertitude due à la perte d'information dans les trous noirs comme «complémentaire» de l'incertitude de la théorie quantique: l'une est l'envers de la médaille de l'autre. [...]

Examinons l'expérience de pensée du chat de Schrödinger. Cette expérience décrit le sort tragique d'un chat enfermé

dans une boîte où se trouve un isotope radioactif qui, s'il se désintègre, est détecté; la détection déclenche automatiquement la mise à feu d'un pistolet, qui tue le chat. Si l'isotope ne se désintègre pas, le chat reste vivant et bien-portant. (Je sais que Stephen Hawking a horreur qu'on maltraite les chats, même dans des expériences de pensée.) La fonction

d'onde du système est une superposition de ces deux possibilités. [...] Comment expliquer que notre perception ne nous permette pas de percevoir des superpositions macroscopiques, des états tels que ceux écrits ici, et ne nous fasse percevoir que l'alternative macroscopique «le chat est mort»/«le chat est vivant»? [...]

Je suggère que quelque chose ne marche pas dans les superpositions de géométries d'espace-temps alternatives, des superpositions qui doivent se produire dès lors que la relativité générale entre en jeu. Il se pourrait que la super-

position de deux géométries différentes soit instable, et se décompose en l'un des deux termes de l'alternative. Ces deux géométries pourraient être, par exemple, les espaces-temps d'un chat vivant ou d'un chat mort. À cette décomposition en l'un ou l'autre des deux termes de l'alternative, je donne le nom de réduction objective. Comment relier la longueur de Planck, 10⁻³³ centimètre, à tout cela ? Il se pourrait que le critère qu'utilise la Nature pour déterminer quand deux géométries sont significativement différentes soit l'échelle de Planck, ce qui donne l'échelle de temps sur laquelle se produit la réduction sur l'un des deux

termes de l'alternative.

LA COSMOLOGIE QUANTIQUE SELON STEPHEN HAWKING

Je terminerai cette conférence en évoquant un sujet sur lequel R. Penrose et moi divergeons : la flèche du temps. Dans notre région de l'Univers, la direction du temps vers l'avant est nettement distincte de celle vers l'arrière. Il suffit de regarder un film passé à l'envers pour voir la différence. Les tasses, au lieu de tomber de la table et de se casser, se réparent toutes seules et sautent sur la table. Si seulement il en était ainsi dans la vie.

Les lois locales auxquelles obéissent les champs physiques sont symétriques par rapport au temps, ou plus précisément invariants par cpt (charge, parité, temps). La différence observée entre le passé et le futur doit donc provenir des conditions aux limites de l'Univers. Supposons que l'Univers soit spatialement clos, qu'il se dilate jusqu'à atteindre sa taille maximale, puis s'effondre. Penrose a insisté sur le fait que, dans ce cas, l'Univers se comporte de façon très différente aux deux bouts de son histoire. Il serait uniforme et homogène au commencement de l'Univers. En revanche, au moment de son effondrement, il serait irrégulier.

TENSEUR DE WEYL

La courbure de l'espace-temps possède deux composantes. L'une découle de la présence de matière dans l'espace-temps, l'autre, mise en avant par le mathématicien allemand Hermann Weyl, apparaît même en l'absence de matière. La quantité mathématique décrivant cette courbure s'appelle le tenseur de Weyl.



HYPOTHÈSE DE LA COURBURE DE WEYL

L'Univers, juste après le Big Bang, possède une petite courbure de Weyl, alors que, près de la fin du temps, la courbure de Weyl devient grande. R. Penrose suggère que cette courbure détermine ainsi la direction dans laquelle pointe la flèche du temps.



gulier et fortement hétérogène. Dans la mesure où il y a beaucoup plus de configurations désordonnées que de configurations ordonnées, cela signifie que les conditions initiales ont été choisies avec une précision incroyable.

Il apparaît donc que les conditions aux limites doivent être différentes aux deux extrémités du temps. Penrose a sug-

Les conditions aux limites doivent être différentes aux deux extrémités du temps

géré que le tenseur de Weyl doit s'annuler à l'une des extrémités du temps et pas à l'autre. Le tenseur de Weyl est cette partie de la courbure de l'espace-temps qui n'est pas déterminée localement par la matière via les équations d'Einstein. Elle doit être petite dans les premiers stades d'évolution régulière et doit être ordonnée, et grande pour un univers en effondrement. La suggestion de Penrose permet donc de distinguer les deux extrémités du temps; elle est, de ce fait, susceptible d'expliquer la flèche du temps.

La proposition de R. Penrose m'apparaît irrecevable. Tout d'abord, elle n'est pas invariante par cpt. R. Penrose s'en

réjouit, mais à mon sens il faut s'accrocher aux symétries tant que nous n'avons pas de raisons impérieuses de les abandonner. Je soutiendrai dans un instant qu'il n'est pas nécessaire d'abandonner l'invariance cpt. Ensuite, si le tenseur de Weyl avait été exactement nul au début de l'Univers, ce dernier aurait été homogène et isotrope et le serait resté ad

vitam æternam. L'hypothèse de Penrose sur le tenseur de Weyl est impuissante à expliquer les fluctuations du fond de rayonnement cosmique, pas plus que les perturbations qui ont donné naissance aux galaxies et aux corps célestes, dont nous-mêmes.

Néanmoins, je pense que Penrose a mis le doigt sur une importante différence entre les deux extrémités du temps. Pour autant, le fait que le tenseur de Weyl ait été petit à l'une des extrémités ne doit pas être posé et imposé sous forme de condition ad hoc, mais être déduit d'un principe plus fondamental, la proposition « sans frontière », selon laquelle il ne

doit pas y avoir de bord. [...]

Comment les deux extrémités du temps peuvent-elles être différentes? Pourquoi les perturbations sont-elles faibles à une extrémité et pas à l'autre? La réponse est la suivante: il existe deux solutions complexes possibles des équations du champ. [...] Il est clair qu'une des solutions correspond à une extrémité du temps et l'autre à l'autre extrémité. [...] À l'une des extrémités, l'Univers était très régulier et le tenseur de Weyl était très petit. Mais il ne pouvait valoir exactement zéro, car cela aurait constitué une violation du principe d'incertitude. En revanche, il y avait de petites fluctuations qui par la suite se sont développées en galaxies et en corps tels que nous-mêmes. De façon toute différente, l'Univers devrait être très irrégulier et chaotique à l'autre extrémité du temps, avec un tenseur de Weyl grand. On pourrait ainsi expliquer la flèche du temps telle qu'elle est observée et pourquoi les tasses tombent de la table et se cassent, pourquoi elles ne se réparent pas toutes seules et ne sautent pas du sol sur la table.

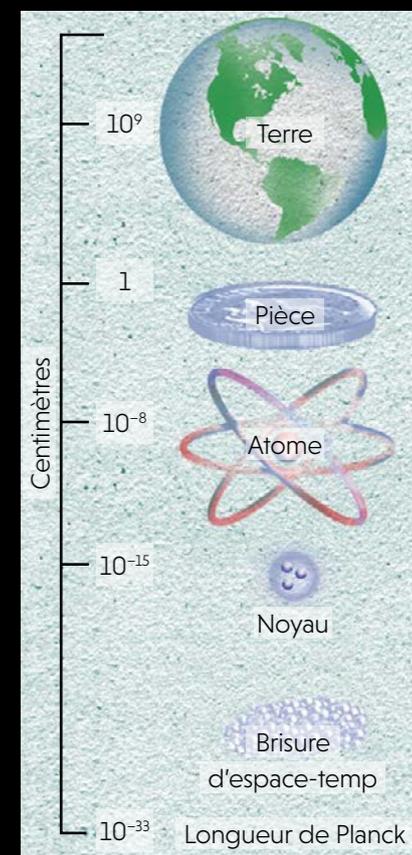
PENROSE SUR LA COSMOLOGIE QUANTIQUE

D'après ce que je comprends de

la position de S. Hawking, il ne me semble pas que notre différend soit si grand sur ce point [l'hypothèse sur la courbure de Weyl]. Pour une singularité initiale, la courbure de Weyl est approximativement nulle. [...] S. Hawking estime qu'il doit exister de petites fluctuations quantiques dans l'état initial; il en conclut que l'hypothèse classique selon laquelle la courbure de Weyl doit être exactement zéro ne peut être raisonnable. Je ne pense pas que nous soyons vraiment en désaccord. L'hypothèse que la courbure de Weyl soit nulle à la singularité initiale est une idée classique, et un énoncé précis de l'hypothèse admet une certaine marge de manœuvre. De mon point de vue, rien n'interdit de petites fluctuations, certainement envisageables en régime quantique. Il faut simplement disposer d'un moyen de les astreindre à être très proches de zéro. [...] Peut-être la proposition selon laquelle il n'y a pas de bord de James Hartle et S. Hawking constitue-t-elle une candidature sérieuse à la description de la structure de l'état initial. Mais il me semble que, pour traiter l'état final, il nous faut autre chose, de très différent. En particulier, une théorie qui explique la structure des singularités devra violer [cpt et d'autres symétries] pour que puisse apparaître quelque chose de même nature que la

LONGUEUR DE PLANCK

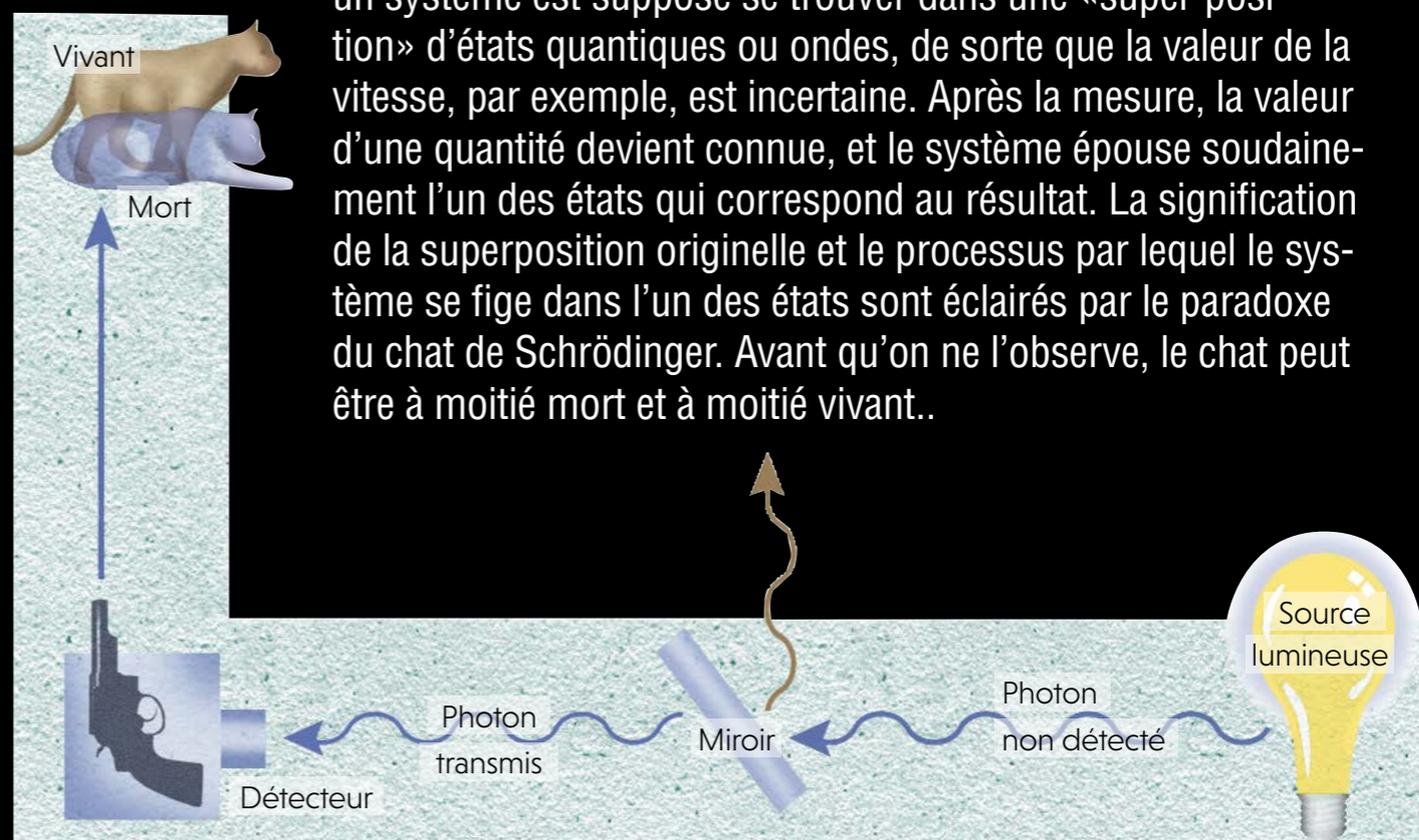
La longueur de Planck représente une distance très petite et inatteignable, reliée, par la mécanique quantique, à un intervalle de temps extrêmement bref et à une colossale énergie. Cette longueur émerge d'une combinaison des constantes fondamentales de l'attraction gravitationnelle, de la vitesse de la lumière et de la mécanique quantique. Cette longueur représente la distance ou l'énergie à laquelle nos concepts actuels d'espace, de temps et de matière ne s'appliquent plus et où une future théorie, la gravité quantique, doit prendre le relais.



LE CHAT DE SCHRÖDINGER

Penrose évoque une expérience de pensée inventée par Einstein et utilisée par Erwin Schrödinger pour étudier les blocages conceptuels résultant de l'utilisation des fonctions d'onde. Avant toute mesure,

un système est supposé se trouver dans une «super-position» d'états quantiques ou ondes, de sorte que la valeur de la vitesse, par exemple, est incertaine. Après la mesure, la valeur d'une quantité devient connue, et le système épouse soudainement l'un des états qui correspond au résultat. La signification de la superposition originelle et le processus par lequel le système se fige dans l'un des états sont éclairés par le paradoxe du chat de Schrödinger. Avant qu'on ne l'observe, le chat peut être à moitié mort et à moitié vivant..



courbure de Weyl. Cette brisure de la symétrie par renversement du temps pourrait prendre une forme extrêmement subtile et elle devrait être implicite dans la théorie à venir, qui doit aller au-delà de la mécanique quantique.

LA PHYSIQUE ET LA RÉALITÉ SELON S. HAWKING

Ces conférences ont montré très clairement ce qui nous sépare, S. Penrose et moi. Il est platonicien; je suis positiviste. Il est préoccupé par le fait que le chat de Schrödinger dans un état quantique est pour moitié vivant et pour moitié mort. Il a l'impression que cela ne peut correspondre à la réalité. Moi, cela m'est égal. Je n'exige pas d'une théorie qu'elle corresponde à la réalité, parce que je ne sais pas ce que c'est. La réalité n'est pas une qualité que l'on puisse tester avec du papier tournesol. Tout ce qui m'importe, c'est que la théorie prédise les résultats des mesures. C'est ce que fait à merveille la théorie quantique[...]

R. Penrose pense que [...] l'effondrement de la fonction d'onde introduit [en physique] une violation de cpt. Il voit cette violation à l'œuvre dans au moins deux situations: la cosmologie et les trous

noirs. Je suis d'accord sur le fait que nous pouvons introduire l'asymétrie en temps dans la manière de poser les questions à propos des observations, mais je suis violemment opposé à l'idée qu'il existe un processus physique qui corresponde à la réduction de la fonction d'onde ou que cela ait quelque chose à voir avec la gravité quantique ou avec la conscience. Pour moi, c'est de la magie, pas de la science.

LA PHYSIQUE ET LA RÉALITÉ SELON R. PENROSE

La mécanique quantique n'existe que depuis environ soixante quinze ans. C'est peu au regard, par exemple, de la théorie de la gravitation de Newton. Je ne serais donc pas étonné si la mécanique quantique devait être modifiée pour des objets très macroscopiques.

Lors de ce débat, S. Hawking a mentionné qu'il était positiviste et que j'étais platonicien. Qu'il soit positiviste me convient bien, mais je crois en l'occurrence que ce qui est important c'est que je sois un réaliste. Si l'on compare ce débat au fameux débat qui a opposé Einstein et Bohr, il y a environ soixante-dix ans, il me semble que S. Hawking joue le rôle de Bohr et moi celui d'Einstein! En effet

Einstein soutenait qu'il devait exister un monde réel, non nécessairement représenté par une fonction d'onde, alors que Bohr insistait sur le fait que la fonction d'onde ne décrit pas un micromonde «réel», mais seulement la «connaissance» qui nous est nécessaire à la formulation de prédictions.

Bohr passe pour être sorti vainqueur de la discussion. De fait, si l'on en croit la dernière biographie d'Einstein par Abraham Pais (1994), Einstein aurait tout aussi bien fait d'aller à la pêche à la ligne à partir de 1925. Il est vrai qu'il n'a plus accompli de grandes avancées, même si ses critiques pénétrantes ont été très utiles. Je pense que la raison pour laquelle Einstein n'a pas continué à faire avancer la théorie quantique tient à ce qu'il manquait à la théorie quantique un ingrédient essentiel. Cet ingrédient essentiel, S. Hawking l'a découvert cinquante ans plus tard: c'est le rayonnement du trou noir. Cette perte d'information, liée au rayonnement du trou noir, est un nouveau tournant.

**Article publié
dans *Pour la Science* n° 227, septembre 1996**



Les prédictions de Stephen Hawking

Renaud Parentani

En 1974, Stephen Hawking a montré que les trous noirs devaient émettre un rayonnement, mettant fin à un débat sur la thermodynamique des trous noirs. Ce résultat a eu de nombreux développements. Mais il a aussi soulevé des questions toujours sans réponse.

En 1973, en combinant des travaux préexistants et en regroupant leurs efforts, James Bardeen, de l'Université Yale, aux États-Unis, ainsi que Brandon Carter et Stephen Hawking, de l'Université de Cambridge, en Grande-Bretagne, publient un article désormais célèbre et intitulé *Les quatre lois de la mécanique des trous noirs*. Ils y établissent une analogie précise entre les lois de transformation des trous noirs et celles qui relient les états d'équilibre en thermodynamique. En particulier, ils démontrent que l'aire de leur horizon ne peut qu'augmenter au cours du temps, en analogie avec le second principe de la thermodynamique selon lequel l'entropie d'un système ne peut aussi qu'augmenter. Rappelons que l'entropie quantifie le désordre d'un système macroscopique, tel un gaz ou une étoile. Plus précisément, elle correspond au logarithme du nombre d'états microscopiques indistinguables aux échelles macroscopiques. Toutefois, pour ces auteurs, cette analogie était purement mathématique, car les trous noirs sont vides de matière, ce qui ne permet apparemment pas d'incorporer les no-

tions de flux de chaleur et de température.

La même année, par un tout autre raisonnement, Jacob Bekenstein, alors étudiant sous la direction de John Wheeler à l'Université de Princeton, aux États-Unis, parvient à une conclusion inverse : pour conserver la validité du second principe de la thermodynamique, on doit attribuer une entropie aux trous noirs. Il défend aussi l'idée que cette entropie est proportionnelle à l'aire de leur horizon. En d'autres termes, à l'inverse des auteurs précédents, il affirme que l'analogie avec la thermodynamique est bien de nature physique. Cette interprétation fut énergiquement combattue par S. Hawking jusqu'au jour où, en 1974, il prit en compte les effets de la mécanique quantique qui avaient été ignorés. À sa grande surprise, ses calculs indiquèrent que l'hypothèse thermodynamique de J. Bekenstein est parfaitement fondée, car les trous noirs émettent une radiation thermique.

REVIREMENT DE SITUATION

Pour expliquer ce retournement de situation, nous présenterons les propriétés géométriques des trous noirs, car

elles déterminent les propriétés de la radiation qu'ils émettent. Nous expliquerons ensuite que la découverte de S. Hawking résulte de la combinaison de deux aspects distincts qui peuvent être expérimentalement testés, de façon indépendante. Le premier concerne la diffusion des ondes lumineuses au voisinage de l'horizon du trou noir et le second la prise en compte d'effets quantiques. Enfin, nous exposerons les principales questions que soulève cette radiation, et indiquerons que certains aspects pourraient ne pas être propres aux trous noirs, mais bien caractériser l'espace-temps lui-même !

En relativité générale, les trous noirs sont des objets particulièrement simples lorsqu'ils sont isolés. En effet, quand ils ne sont ni alimentés par un disque d'accrétion ni en contact proche avec un astre voisin (une étoile à neutrons ou un autre trou noir) qui les déforme par effet de marées, ils sont entièrement caractérisés par leur masse et leur moment orbital. Cette extrême simplicité est étonnante, car les trous noirs sont des objets macroscopiques : ils auraient donc pu dépendre de nombreuses quantités microscopiques à l'instar des étoiles. Leur

simplicité traduit le fait qu'ils sont des solutions stationnaires stables: ils sont comme figés dans le temps et n'évoluent plus. En effet, si un trou noir est perturbé par l'adjonction de matière, il évoluera de façon irréversible vers un nouvel état stationnaire. Les trous noirs sont donc des états d'équilibre, l'ultime étape de l'évolution gravitationnelle.

LA GÉOMÉTRIE DES TROUS NOIRS

Pour simplifier la discussion, nous ne considérerons dans cet article que les trous noirs sans moment orbital. Ces objets sont à symétrie sphérique et caractérisés par leur seule masse. Ils sont obtenus par effondrement gravitationnel d'une étoile immobile. Dans le futur de l'effondrement, l'espace-temps ainsi engendré est vide. En effet, l'extérieur de l'étoile occupe tout l'espace-temps futur, car la matière stellaire est cantonnée dans le passé. Les processus physiques postérieurs à l'effondrement, telle la radiation de Hawking qui nous occupe, sont donc indépendants de cet événement. Dès lors, nous ne tiendrons compte que de cette géométrie vide qui est aussi statique, c'est-à-dire

strictement indépendante du temps: un trou noir laissé à lui-même est immuable et éternel.

La propriété géométrique la plus remarquable est son horizon. Il s'agit d'une sphère de surface $4\pi r_s^2$, où r_s est le rayon de Schwarzschild (en deçà duquel rien ne peut s'échapper). Celui-ci est proportionnel à la masse M du trou noir puisque $r_s = 2GM/c^2$, où G est la constante de gravitation de Newton et c la vitesse de la lumière dans le vide. De façon étonnante, cette sphère fait partie du cône de lumière futur, car les rayons lumineux émis à partir d'elle

L'horizon fait partie du cône de lumière futur, car les rayons lumineux émis se propagent le long de celui-ci au lieu de diverger

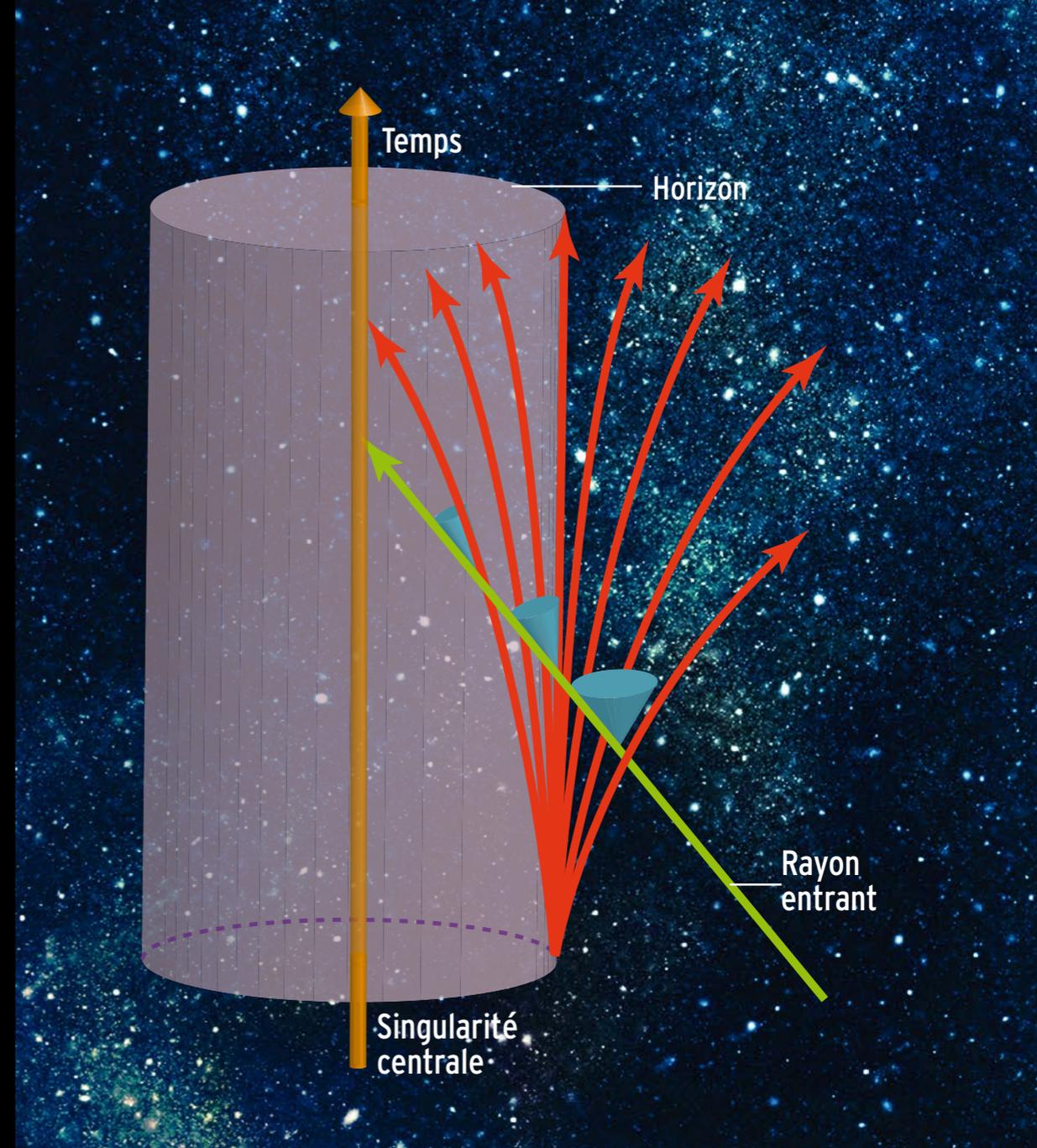
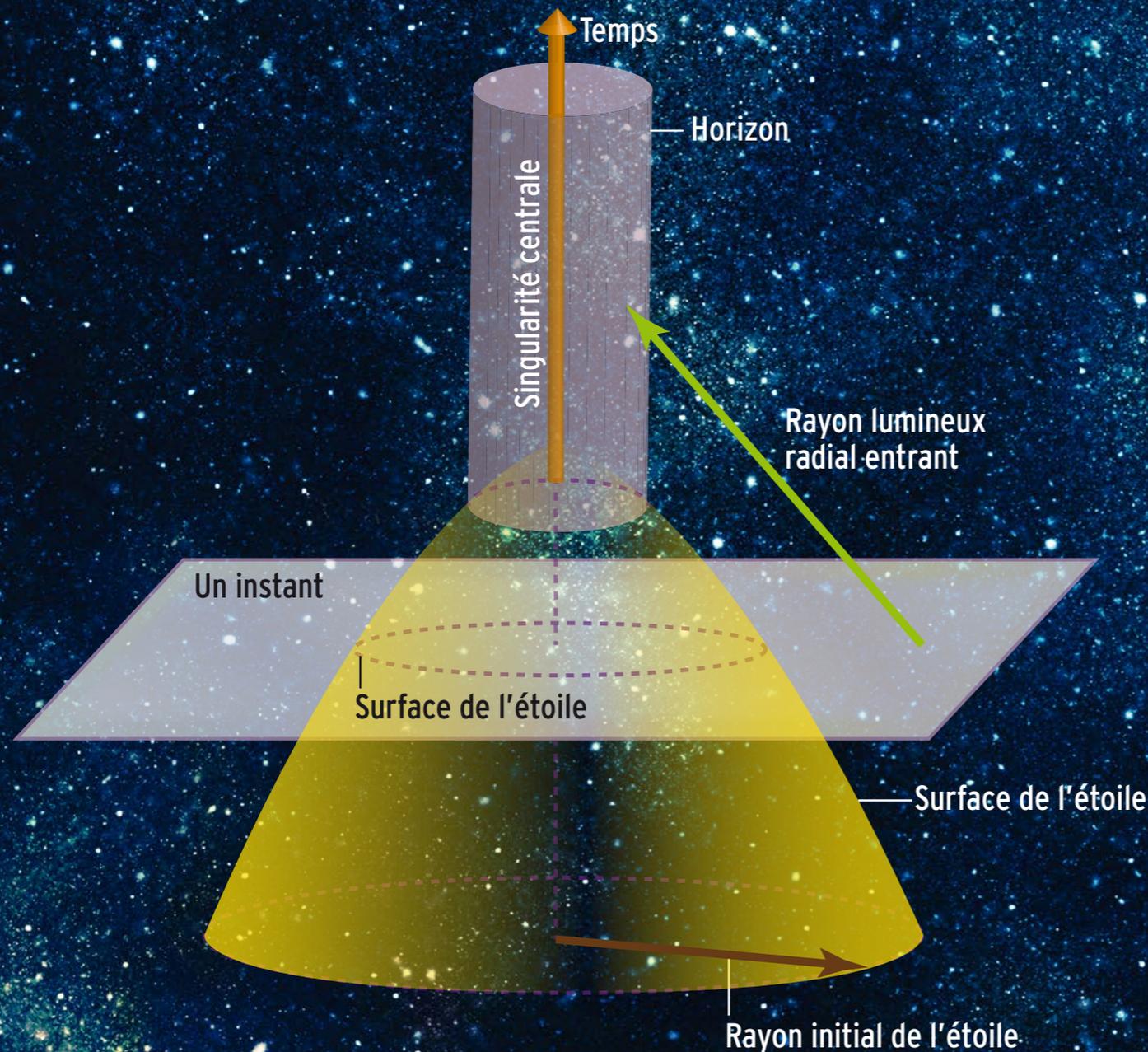
dans la direction radiale extérieure se propagent le long de celle-ci, au lieu de diverger les uns des autres comme c'est le cas dans l'espace-temps plat.

Cette propriété est l'une des manifestations de la courbure de l'espace-temps d'un trou noir. Elle permet de comprendre pourquoi la région interne

est une région piégée dont aucun signal ne peut sortir. En relativité, rappelons qu'aucun signal ne peut se propager plus vite que la lumière. Ceci implique qu'aucun signal ne peut sortir de l'horizon, celui-ci faisant partie du cône de lumière sortant. Soulignons aussi le fait que la géométrie au voisinage de l'horizon est parfaitement régulière: un individu qui tomberait dans un trou noir n'observerait rien de particulier en franchissant l'horizon.

La dernière propriété importante concerne le taux d'extinction des signaux lumineux émis par des objets

qui vont franchir l'horizon. On montre que la lumière reçue par un observateur loin du trou noir décroît de façon exponentielle avec un temps de demi-vie t_k correspondant au temps que prend la lumière pour parcourir une distance égale à $2r_s$, le diamètre de l'horizon. En outre, les rayons lumineux s'éloignent de



L'espace-temps obtenu par effondrement gravitationnel. Ici, le temps s'écoule vers le haut, l'axe vertical est situé au centre de l'étoile, et seules deux des trois dimensions spatiales sont représentées. À chaque instant, c'est-à-dire dans un plan horizontal, la surface sphérique de l'étoile est représentée par une circonférence. Son rayon décroît au cours du temps. Dans la partie supérieure du diagramme, le cylindre vertical de rayon constant (en violet) représente l'horizon du trou noir. Celui-ci apparaît lorsque la masse de l'étoile pénètre à l'intérieur de cette surface. Au centre du diagramme, la ligne épaisse représente la singularité. Ce qui s'y passe n'est pas compris, mais reste (sans doute) confiné dans un voisinage immédiat.

La géométrie spatio-temporelle entourant l'horizon (en violet) d'un trou noir est révélée par la trajectoire de rayons lumineux. Nous avons représenté en vert un rayon entrant qui franchit l'horizon et en rouge une famille de rayons sortants : ceux qui démarrent à l'extérieur de l'horizon s'éloignent du trou noir ; ceux qui partent à l'intérieur sont piégés et tombent vers la singularité centrale, celui qui démarre exactement sur l'horizon se propage à jamais le long de celui-ci. Trois cônes de lumière ont été dessinés en bleu. Lorsque le sommet du cône est situé à l'extérieur de l'horizon, une partie des rayons s'éloignent du trou noir. Quand il se trouve à l'intérieur, tous les rayons se dirigent vers la singularité centrale. Enfin lorsqu'il se trouve exactement sur l'horizon, le cône est tangent à l'horizon.

façon exponentielle de l'horizon avec un temps caractéristique précisément égal à t_k . Celui-ci caractérise donc l'intensité des effets gravitationnels au voisinage de l'horizon. Il jouera un rôle déterminant dans ce qui suit.

LA DIFFUSION DES ONDES LUMINEUSES

La propagation des ondes lumineuses est gouvernée par l'équation de d'Alembert. En étudiant le comportement de ses solutions au voisinage de l'horizon d'un trou noir, on généralise l'étude des rayons lumineux fondée sur l'optique géométrique. En effet, celle-ci est une approximation de l'optique ondulatoire édifée à partir de l'équation de d'Alembert. À l'aide de cette description plus précise, on peut étudier la propagation de paquets d'ondes.

On montre ainsi qu'un paquet initialement situé dans le voisinage immédiat de l'horizon se sépare en deux. Un premier paquet s'éloigne du trou noir en suivant les trajectoires des rayons lumineux sortants, tandis que son partenaire se dirige vers la singularité centrale. Ce résultat se précise lorsque l'on intègre deux éléments supplémentaires. D'une part, puisque la

géométrie est statique, les paquets d'ondes peuvent se décomposer en ondes monochromatiques de fréquence ν constante. D'autre part, quand on impose à chaque onde monochromatique d'être régulière sur l'horizon (mathématiquement, des solutions irrégulières existent, mais elles ne jouent pas de rôle en physique), le rapport des amplitudes de l'onde sortante et de l'onde piégée est fixé. Ce rapport $R(\nu)$ caractérise précisément la diffusion des ondes par un horizon. Il ne dépend que de la fréquence et du demi-temps de vie t_k : il est donné par l'exponentielle du produit de ces deux quantités multipliée par π . Le calcul de ce rapport constitue la première prédiction de Hawking. De façon remar-

La caractérisation de la diffusion des ondes par un horizon constitue la première prédiction de Hawking

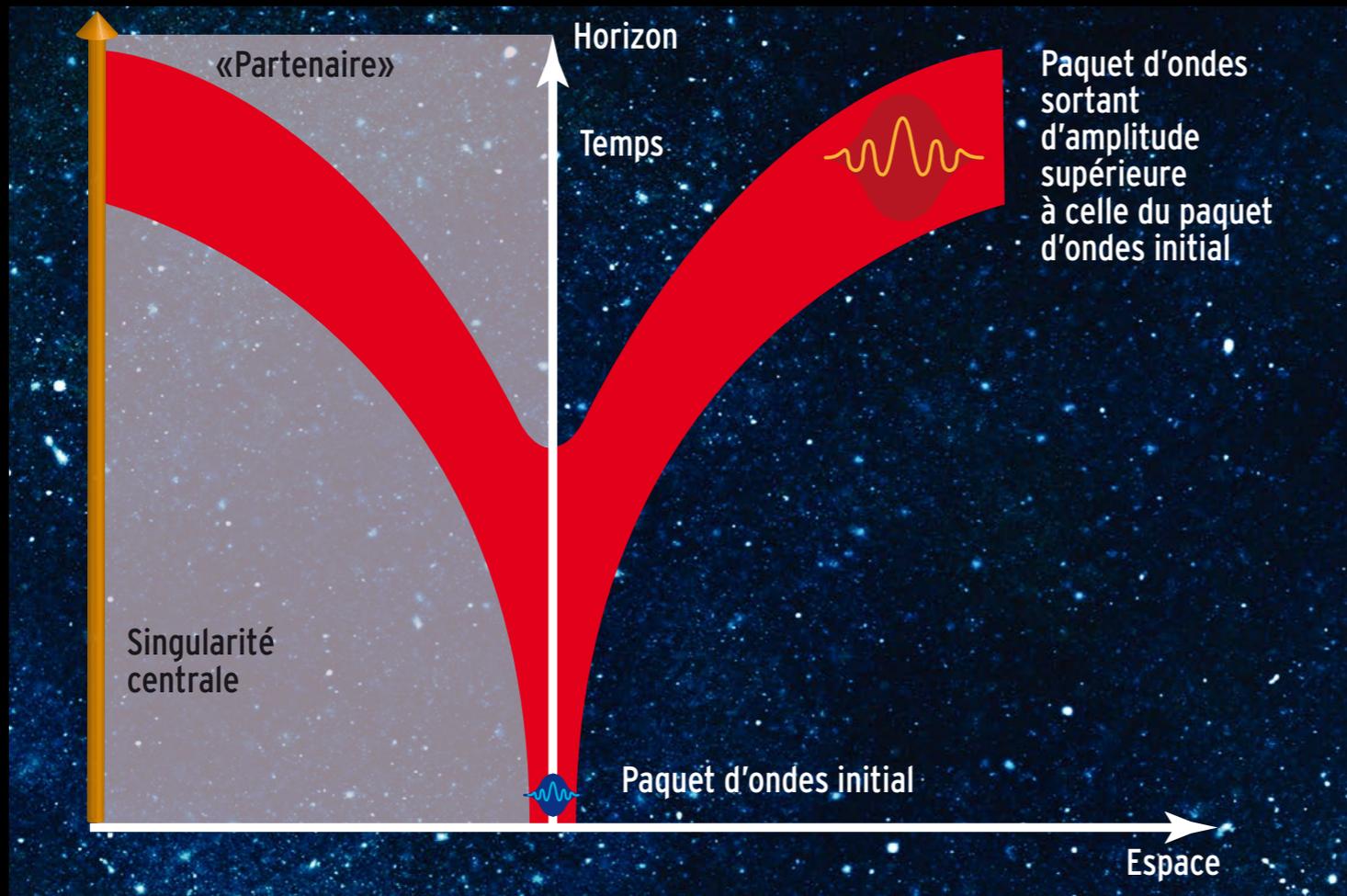
quable, elle a récemment été confirmée en étudiant des trous noirs « analogues ».

Soulignons enfin que cette diffusion est dite anormale, car elle conduit à une amplification des ondes plutôt qu'à une répartition de l'énergie de l'onde

incidente comme dans le cas général. Ce type d'amplification est nommé paramétrique pour souligner qu'elle résulte du changement d'un paramètre du système (ici, la courbure de l'espace-temps) et non pas d'une source d'énergie extérieure. Le caractère exceptionnel, mais pas unique, de la diffusion des ondes sur l'horizon d'un trou noir est ainsi établi et caractérisé.

Les propriétés physiques de la lumière peuvent être analysées dans le cadre classique de l'équation de d'Alembert, mais on a parfois besoin de se placer dans le cadre plus général de la mécanique quantique. Ainsi le cadre classique est suffisant pour décrire la propagation

de l'énergie lumineuse du Soleil vers la Terre ou la diffusion des ondes par un trou noir analogue. Dans les deux cas, l'approximation classique est justifiée, car les corrections apportées par la mécanique quantique sont négligeables. À



La diffusion anormale des ondes lumineuses. Un paquet d'ondes initialement situé dans le voisinage immédiat de l'horizon se sépare en deux : une partie s'éloigne du trou noir et l'autre tombe vers la singularité centrale. Cette diffusion est inhabituelle, car l'amplitude de l'onde sortante est plus grande que celle du paquet initial.

l'inverse, lorsque l'on étudie des phénomènes mettant en jeu un petit nombre de photons (des quantas de lumière), seule la mécanique quantique décrit correctement les observations.

Les descriptions classique et quantique divergent d'autant plus que le nombre de photons (et plus généralement

de particules) est petit. Leur désaccord est maximal quand on décrit les phénomènes spontanés qui ont lieu dans le vide. Dans la vision classique, en l'absence de lumière, aucun phénomène optique n'a lieu, alors que dans le cadre quantique, même en l'absence de photons, le champ de radiation fluctue

de façon stationnaire. Ces fluctuations dites du vide ont une amplitude minimale dont la valeur moyenne est fixée par \hbar la constante de Planck. Lorsque le champ de radiation n'est pas sollicité par un autre système physique, tel un atome, ces fluctuations ne se manifestent pas : le vide est alors un état stationnaire où il ne se passe rien. En revanche, lorsque l'on couple le champ de radiation à un atome excité, ces fluctuations déstabilisent l'atome, il y a un transfert d'énergie et un photon est émis. On parle de processus spontanés, par opposition aux processus induits par la lumière que l'on trouve en optique, pour souligner le fait qu'aucun photon préexistant ne déclenche le processus.

La radiation de Hawking est un exemple de processus spontané sans équivalent classique. En effet, dans la description classique, les trous noirs laissés à eux-mêmes n'émettent aucune lumière et sont donc définitivement noirs. Toutefois, en mécanique quantique, la diffusion anormale des ondes au voisinage de l'horizon amplifie les fluctuations du vide, ce qui se traduit par des émissions spontanées de paires de photons. Au sein de chaque paire, l'un des photons

s'échappe du trou noir et participe à la radiation de Hawking, l'autre, son partenaire, reste piégé à l'intérieur du trou noir. La conséquence de cette production est la diminution de la masse du trou noir. On peut donc concevoir un trou noir comme un système macroscopique qui se dirigerait progressivement vers son état fondamental en émettant un très grand nombre de photons.

LES ÉTATS MICROSCOPIQUES DES TROUS NOIRS

Dans le second volet de son travail, S. Hawking démontre que l'effondrement gravitationnel d'une étoile entraîne, après une période transitoire, l'émission d'un flux constant de photons dont le spectre est précisément fixé par le rapport $R(\nu)$. On constate donc que la mécanique quantique récupère les propriétés classiques de la diffusion tout en leur conférant une nouvelle interprétation: en l'occurrence, la diffusion anormale des ondes conduit à une production spontanée de paires de photons. Ce résultat est général, la radiation de Hawking n'en étant qu'une illustration parmi d'autres exemples, que l'on peut trouver en optique quantique.

Hawking avait précédemment démontré que le rapport $R(\nu)$ dépend de façon exponentielle du produit de la fréquence et du temps de demi-vie t_k . Au niveau quantique, ceci implique, d'une part, que le spectre des photons émis est thermique et, d'autre part, que la température est fixée par l'inverse de t_k . En d'autres termes, un trou noir rayonne à la façon d'un objet chauffé à cette température, cette dernière étant inversement proportionnelle à la masse du trou noir.

En combinant ce résultat avec les lois de la thermodynamique, S. Hawking a validé l'idée de J. Bekenstein selon laquelle les trous noirs ont une entropie proportionnelle à la surface de leur

Les trous noirs ont une entropie proportionnelle à la surface de leur horizon

horizon. Plus précisément, les calculs montrent que leur entropie est égale au quart de l'aire de leur horizon exprimée en longueur de Planck au carré. Rappelons que les unités introduites par Planck

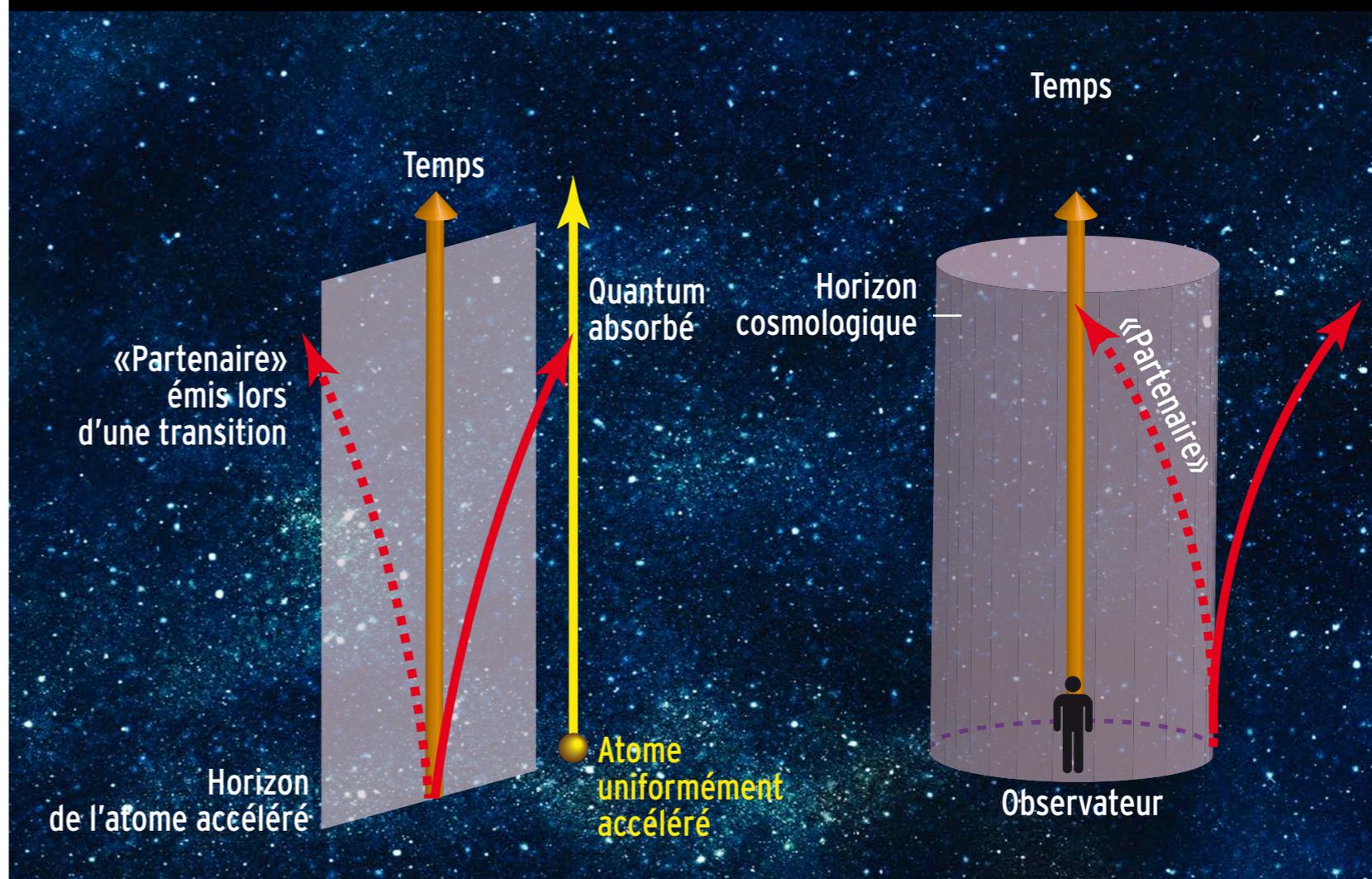
sont naturelles dans le sens où elles ne dépendent que des quantités fondamentales c , G et \hbar qui caractérisent respectivement la vitesse de la lumière en relativité, la constante de gravitation de Newton et la constante de Planck de la mécanique quantique. Cette longueur de Planck est de l'ordre de 10^{-35} mètre. Le rayon d'un trou noir d'une masse solaire étant de l'ordre de trois kilomètres, cet astre est doté d'une entropie gigantesque, bien supérieure à celle du Soleil.

Cette découverte de la radiation des trous noirs soulève plusieurs questions. La première concerne le destin d'un trou noir. Puisque cette radiation entraîne une diminution de la masse, un trou noir

plongé dans le vide s'évaporerait progressivement. De plus, comme sa température est inversement proportionnelle à sa masse, ce processus d'évaporation s'accélérerait et deviendrait explosif. Que

restera-t-il à la fin? Un mini trou noir, une singularité nue qui serait le vestige de la singularité centrale, ou encore rien du tout? On doit ici reconnaître notre incapacité à y répondre.

La deuxième question concerne la nature des états microscopiques dont le grand nombre serait à l'origine de l'entropie des trous noirs? De nombreuses propositions ont été avancées, mais aucune n'est satisfaisante. La principale raison de cet échec résulte de l'absence d'une théorie quantique de la gravitation qui soit véritablement prédictive. Une autre raison serait que la radiation de Hawking est un cas particulier d'une classe de phénomènes quantiques qui dépasse la physique des seuls trous noirs. Ainsi, selon Theodore Jacobson, de l'Université du Maryland, les lois de la thermodynamique des trous noirs pourraient n'être qu'un cas particulier de lois thermodynamiques qui s'appliqueraient en chaque point de l'espace-temps. Hélas, par cette audacieuse généralisation, les questions posées par la radiation de Hawking se retrouvent elles aussi généralisées, et toujours sans réponse. Pour justifier cette généralisation, présentons maintenant deux effets quantiques qui



L'effet Unruh (à gauche). L'espace-temps de Minkowski est représenté tel qu'il est perçu par un atome uniformément accéléré dans un système de coordonnées tel que cet atome y soit au repos : sa trajectoire est une droite verticale (*en jaune*). Dans ce système, les trajectoires suivies par les rayons lumineux (*en rouge*) sont similaires à celles près de l'horizon d'un trou noir. À un instant donné, l'horizon est un plan infini et non plus une sphère : ce plan est comme la limite d'un horizon de trou noir lorsque son rayon de Schwarzschild tend vers l'infini. L'espace-temps de De Sitter (*à droite*) est représenté dans un système de coordonnées centré sur l'observateur inertiel dont la trajectoire est ici une droite verticale. L'horizon est une sphère centrée sur l'observateur. Celui-ci reçoit le « partenaire » du photon qui s'échappe à l'infini. Le spectre de ces deux photons est identique et thermique.

ont été découverts à la suite du travail de S. Hawking.

Dès sa parution, ce travail a suscité un grand intérêt et de nombreux développements dont le dénominateur commun est la présence d'un horizon qui sépare l'espace-temps en deux régions «étanches». Dans ces situations, on trouve des effets thermiques dont la température est fixée par l'inverse du temps de demi-vie t_k associé à l'horizon.

L'EFFET UNRUH

En 1976, William Unruh, aujourd'hui à l'Université de Colombie-Britannique, à Vancouver, au Canada, a découvert un effet qui offre de nombreuses similitudes avec la radiation des trous noirs. Un atome

de radiation auquel il est couplé est vide de photons. En présence de photons, cet atome peut bien sûr absorber l'un d'eux et devenir excité. Mais lorsqu'il est accéléré, même plongé dans le vide, l'atome va spontanément s'exciter en émettant un photon. Une telle transition est semblable à la production spontanée de la radiation de Hawking. Notons qu'une partie de l'énergie mécanique utilisée pour imposer la trajectoire est dissipée par ces transitions, comme l'est la masse d'un trou noir.

Lorsque la trajectoire est uniformément accélérée, W. Unruh a montré que cet atome perçoit le vide de photons comme s'il contenait un bain de photons isotrope et thermique avec une température proportionnelle à

Un atome accéléré, même plongé dans le vide, va spontanément s'exciter en émettant un photon : c'est l'effet Unruh

qui se déplace de façon inertielle (rectiligne et uniforme) dans l'espace-temps de Minkovski (la relativité générale n'est pas prise en compte) reste à jamais dans son état fondamental tant que le champ

son accélération a (celle-ci est reliée au temps de demi-vie t_k par $a = c/t_k$). Ce résultat peut se comprendre ainsi : suite à son accélération, l'atome perçoit un horizon où les ondes lumineuses

auxquelles il est couplé sont diffusées exactement de la même façon que le sont les ondes près de l'horizon d'un trou noir. Pour cet atome, tout se passe comme s'il y avait un horizon qui émette un rayonnement thermique, à l'instar de l'horizon d'un trou noir. On en déduit que la radiation de Hawking n'est pas tant associée aux trous noirs eux-mêmes qu'à leur horizon, et à la façon dont celui-ci est perçu par des observateurs éloignés. Cette leçon est renforcée par l'exemple suivant.

DANS L'ESPACE DE DE SITTER

L'espace-temps de De Sitter est un espace cosmologique simple, car le paramètre H de la loi de Hubble ne dépend pas du temps. Rappelons que cette loi ($v = Hd$) relie la vitesse de récession v des galaxies éloignées d'une distance d . Dans notre Univers, la valeur de H n'a fait que décroître. Un observateur inertielle plongé dans cet univers perçoit un horizon sphérique dont le rayon r_H (l'équivalent du rayon de Schwarzschild pour un trou noir) est égal à c/H . Ce rayon est donc à une distance telle de l'observateur que la

L'AUTEUR



Renaud Parentani enseigne à l'Université de Tours, et mène ses recherches au sein du Laboratoire de mathématiques et physique théorique.

BIBLIOGRAPHIE

S. Weinfurtner et al., Measurement of stimulated Hawking emission in an analogue system, in *Phys. Rev. Lett.*, vol. 106, 021302, 2011.

T. Jacobson, Thermodynamics of spacetime : the Einstein equation of state, in *Phys. Rev. Lett.*, vol 75, pp. 1260-1263, 1995.

W. Unruh, Experimental black-hole evaporation ?, in *Phys. Rev. Lett.*, vol. 46, pp. 1351-1353, 1981.

S. Hawking, Black holes explosions ? in *Nature*, vol. 248, pp. 30-31, 1974.

R. Parentani et Ph. Spindel, Hawking radiation (et articles reliés), sur Scholarpedia : www.scholarpedia.org/article/Hawking_radiation

vitesse de récession y est égale à la vitesse de la lumière c .

Cet horizon est centré sur l'observateur inertiel, ce qui pourrait lui donner l'illusion qu'il est placé au centre de l'Univers. Imaginons que cet observateur se munisse d'un atome, tel celui utilisé pour mettre en évidence l'effet Unruh. Il constatera que cet atome atteint spontanément une température fixée par H tout comme celle de l'effet Unruh l'était par l'accélération a , et celle de Hawking par l'inverse du temps de demi-vie t_k .

Cette correspondance révèle que l'on a affaire à un seul et même phénomène dans trois situations différentes. Ce constat est renforcé par le fait que les lois de la thermodynamique des trous noirs s'appliquent aussi à l'horizon cosmologique de De Sitter. On est donc parfaitement en droit de se poser la question : quels sont les états microscopiques dont le grand nombre serait à l'origine de l'entropie cet horizon ?

La difficulté est ici de taille, car cet horizon n'est pas là *en-soi*, il n'est perçu comme tel que par l'observateur inertiel en question. Ce fait troublant soutient la conjecture selon laquelle l'entropie d'un

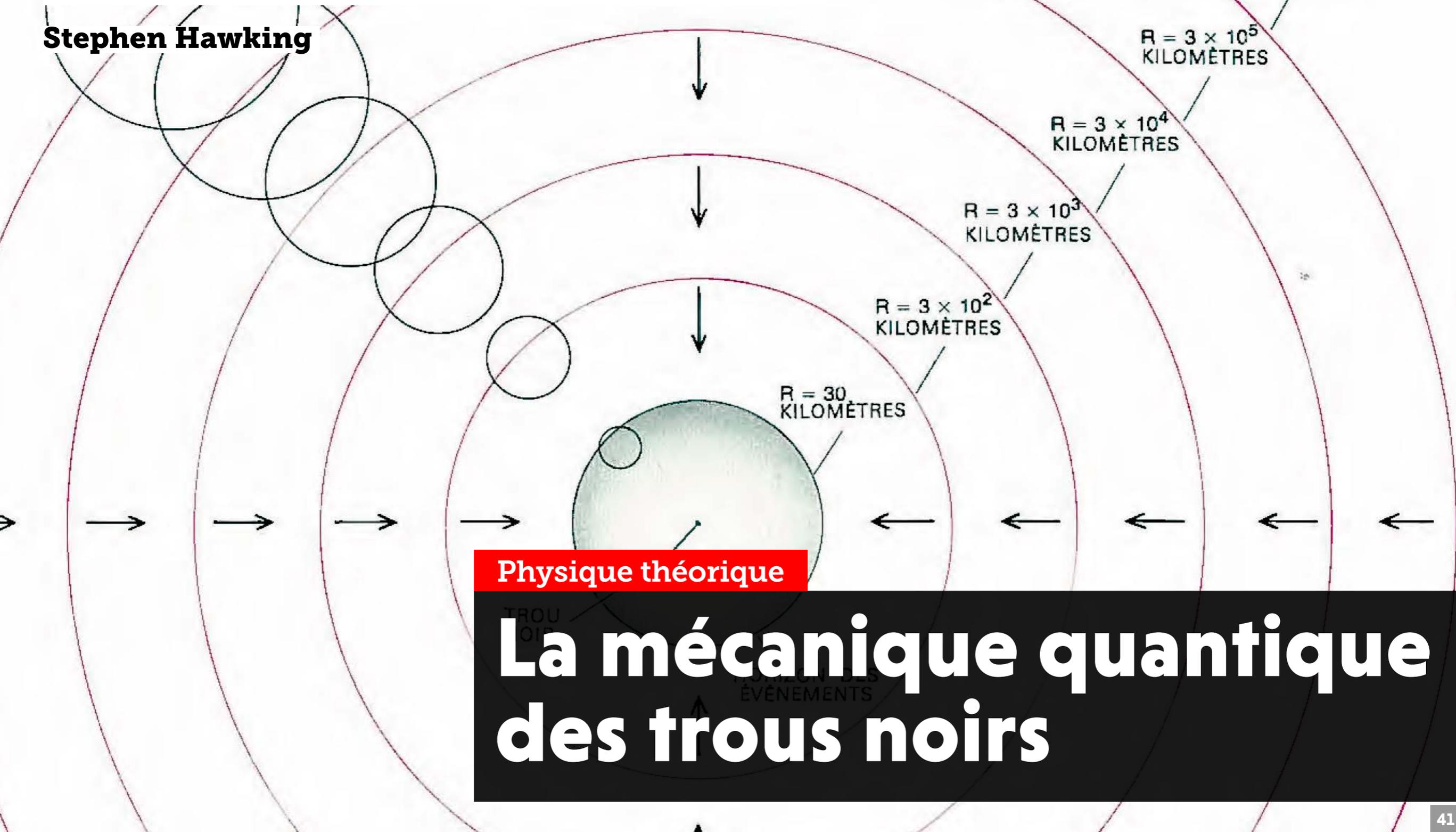
horizon quantifierait les états microscopiques inaccessibles aux observateurs qui perçoivent cet horizon, et donc *in fine* que l'entropie d'un trou noir ne serait que l'entropie de son horizon perçu par des observateurs éloignés. L'effet Unruh et les effets thermiques dans l'espace de De Sitter sont deux exemples parmi d'autres qui illustrent le caractère fécond du travail de Hawking, et la profondeur des questions qu'il soulève. Aujourd'hui encore les résultats de ce travail motivent et orientent les recherches.

**Article publié dans le Dossier
Pour la Science n° 74, avril-Juin 2012**



On définit souvent les « trous noirs » comme des régions d'où rien ne peut s'échapper, pas même la lumière. Il existe cependant quelques raisons de penser que des particules peuvent en sortir, par « effet tunnel ».

Stephen Hawking



Physique théorique

La mécanique quantique des trous noirs

Au cours des trente premières années de ce siècle, trois nouvelles théories ont bouleversé non seulement l'idée que l'homme se faisait de la physique, mais également sa conception du monde réel. Aujourd'hui encore, les physiciens en explorent les conséquences et tentent de les réunir en un tout cohérent. Ces trois théories sont : la théorie de la relativité restreinte (1905), la théorie de la relativité générale (1915) et celle de la mécanique quantique (1926). Albert Einstein fut, pour une part majeure, l'auteur de la première, l'unique inventeur de la seconde et joua un rôle prépondérant dans le développement de la troisième. Néanmoins, Einstein n'accepta jamais totalement la mécanique quantique, en raison de l'élément de probabilité et d'incertitude qu'elle introduisait. La formule célèbre « Dieu ne joue pas aux dés » résume son sentiment. La plupart des physiciens cependant, acceptèrent immédiatement et la relativité restreinte et la mécanique quantique parce que ces deux théories décrivaient des phénomènes directement observables. La relativité générale,

en revanche, fut longtemps délaissée parce qu'elle semblait d'une trop grande complexité mathématique, qu'elle n'était pas susceptible de vérification en laboratoire et que c'était une théorie « classique » apparemment incompatible avec la mécanique quantique. La relativité générale resta donc un peu « en sommeil » pendant une cinquantaine d'années.

Vers les années 1960, le développement considérable des observations astronomiques suscita un regain d'intérêt pour la théorie classique de la relativité

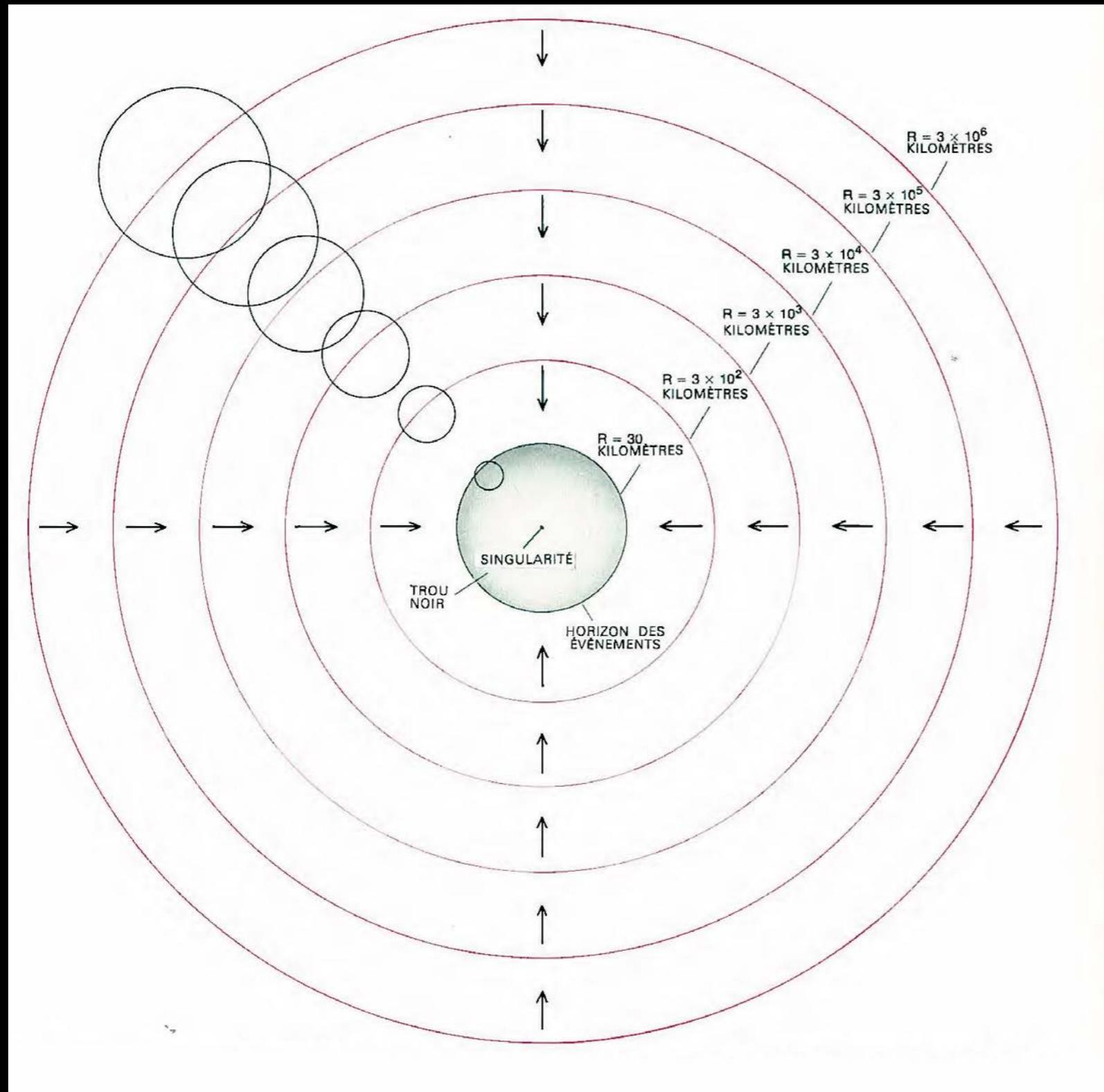
Dans les années 1960, le développement des observations suscita un regain d'intérêt pour la théorie de la relativité générale

générale : en effet la plupart des phénomènes découverts alors, tels que les quasars, les pulsars et les sources compactes de rayons X, mettaient en jeu des champs de gravitation très intenses qui ne pouvaient être étudiés que dans le cadre de la relativité générale. Les quasars, s'ils sont aussi éloignés que le décalage vers le rouge de leur spectre le laisse supposer, sont des objets stellaires

très brillants, beaucoup plus brillants qu'une galaxie toute entière ; les pulsars sont constitués par les restes clignotants d'une supernova après qu'elle ait explosé : ce sont très probablement des étoiles à neutrons d'une extrême densité ; les sources compactes de rayons X, découvertes grâce aux instruments placés à bord des véhicules spatiaux, seraient, elles aussi, des étoiles à neutrons ou des objets hypothétiques de densité encore plus élevée, des « trous noirs », appelés encore « astres occlus ».

Les physiciens devaient utiliser la relativité générale pour mieux comprendre la structure de ces objets, qu'ils soient récemment découverts ou seulement de nature hypothétique ; il fallait toutefois que cette théorie soit compatible avec celle de la mécanique quantique. Récemment, divers travaux ont fait naître l'espoir qu'avant peu on disposerait d'une théorie quantique de la

L'EFFONDREMENT D'UNE ÉTOILE MASSIVE



Cette évolution est représentée schématiquement à partir d'un rayon initial de l'étoile égal à trois millions de kilomètres (environ cinq fois le rayon du Soleil) jusqu'à ce que le rayon atteigne 30 kilomètres. Pour cette valeur, l'étoile disparaît derrière l'horizon qui définit les limites extérieures d'un trou noir. L'étoile continue à s'effondrer et engendre ce qu'il est convenu d'appeler une singularité spatio-temporelle, dont la physique reste inconnue. La série de six petits cercles représente les fronts d'onde de la lumière, émise à partir des différentes surfaces représentées, un instant avant que le rayon de l'étoile n'atteigne chacune des valeurs représentées. Les rayons successifs de l'étoile et des fronts d'onde sont représentés dans une échelle logarithmique. A chaque étape de l'effondrement, le front d'onde tombe davantage à l'intérieur du volume de l'étoile, alors que la vitesse de libération augmente depuis 1 000 kilomètres par seconde, jusqu'à 300 000 kilomètres par seconde (vitesse de la lumière) ; cette dernière valeur est atteinte lorsque l'étoile disparaît à travers l'horizon. La lumière émise ensuite ne parvient plus à un observateur situé à l'extérieur du trou noir.

gravitation satisfaisante, en accord avec la relativité générale dans le domaine des objets microscopiques, et débarrassée, du moins peut-on l'espérer, des difficultés mathématiques qui infestent les autres théories quantiques du champ.

Le rayon de l'horizon d'un trou noir dépend de la masse de l'étoile effondrée

Ces travaux traitent des effets quantiques liés aux trous noirs et permettent de relier de façon remarquable les trous noirs aux lois de la thermodynamique.

Décrivons brièvement la formation d'un trou noir. Imaginons une étoile ayant une masse égale à dix fois celle du Soleil. Pendant la plus grande partie de sa vie, soit environ un milliard d'années, le centre de l'étoile engendre de la chaleur par fusion thermonucléaire (conversion d'hydrogène en hélium). L'énergie ainsi dégagée crée une pression suffisante pour empêcher l'implosion de l'étoile sous l'effet de sa propre gravitation : ce processus conduit à un astre dont le rayon est environ cinq fois celui du Soleil. La vitesse de libération à

la surface d'une telle étoile est d'environ 1000 kilomètres par seconde. Cela signifie qu'un objet lancé verticalement vers le haut, à partir de la surface de l'étoile, avec une vitesse inférieure à 1000 km/s, est retenu par le champ gravitationnel

de l'étoile et retombe sur sa surface ; en revanche un objet lancé avec une vitesse supérieure à cette valeur s'échappe de l'attraction de l'étoile et va à l'infini.

Lorsque l'étoile a épuisé son combustible nucléaire, la pression interne diminue et l'étoile commence à s'effondrer sous l'effet de sa propre gravitation. Au fur et à mesure que l'étoile se ramasse sur elle-même, le champ gravitationnel à sa surface s'accroît et la vitesse de libération augmente. La vitesse de libération est égale à la vitesse de la lumière (300000 km/s) lorsque le rayon atteint la valeur de 30 km ; en deçà de cette valeur toute lumière émise à partir de l'étoile est retenue par le champ gravitationnel et ne peut s'échapper à l'infini. Or, selon

la théorie de la relativité restreinte, aucun corps ne peut se déplacer à une vitesse supérieure à celle de la lumière ; si la lumière ne peut s'échapper d'une telle région de l'espace, a fortiori aucun autre corps. Le résultat final de cette évolution serait un trou noir, c'est-à-dire une région de l'espace-temps d'où il n'est pas possible de s'échapper. La frontière limitant cette région est « l'horizon » du trou noir. Elle correspond au front d'onde de la lumière émise à partir de l'étoile, qui ne peut s'éloigner à l'infini et se trouve confinée à une distance du point d'émission égale au « rayon de Schwarzschild », dont la valeur est $2GM/c^2$, où G est la constante de gravitation universelle, M la masse de l'étoile et c la vitesse de la lumière. Pour une étoile d'environ 10 fois la masse du Soleil, le rayon de Schwarzschild est d'environ 30 km.

DES TROUS NOIRS À FOISON

Un faisceau de preuves expérimentales convergentes laisse à penser qu'il existe des trous noirs de cette taille dans les systèmes à étoile double, telle que la source de rayons X connue sous le nom de Cygnus X-1, pourrait également exister un assez grand nombre de trous noirs

beaucoup plus petits, dispersés dans l'Univers, qui se seraient formés à partir de l'effondrement, non pas d'étoiles, mais de régions de haute densité. Ces régions denses auraient existé dans le milieu chaud et dense résultant de l'explosion originelle (appelée « big bang ») qui a donné naissance à l'Univers. De tels trous noirs « originels » présentent, comme on le verra par la suite, des effets quantiques du plus haut intérêt. Un trou noir d'un milliard de tonnes (à peu près la masse d'une montagne) aurait un rayon d'environ 10-13 centimètre, c'est-à-dire la taille d'un neutron ou d'un proton. Il pourrait être en orbite autour du Soleil, ou autour du centre de la galaxie.

THERMODYNAMIQUE ET TROUS NOIRS

La première suggestion concernant un lien possible entre les trous noirs et la thermodynamique a été émise en 1970 : c'est la découverte mathématique selon laquelle la surface de l'horizon constituant la frontière d'un trou noir croît lorsque matière ou rayonnement tombent dans le trou noir ; de plus, si deux trous noirs entrent en collision et se fondent en un seul, la surface de

l'horizon du trou noir ainsi formé est supérieure à la somme des surfaces des horizons des deux trous noirs initiaux. Ces deux propriétés suggèrent une analogie entre la surface de l'horizon d'un trou noir et le concept thermodynamique d'entropie. L'entropie d'un système est une mesure du désordre qui y règne ou encore une mesure de l'igno-

Un trou noir n'a pas d'aspérité

rance concernant son état précis. La célèbre seconde loi de la thermodynamique enseigne que l'entropie d'un système augmente toujours avec le temps.

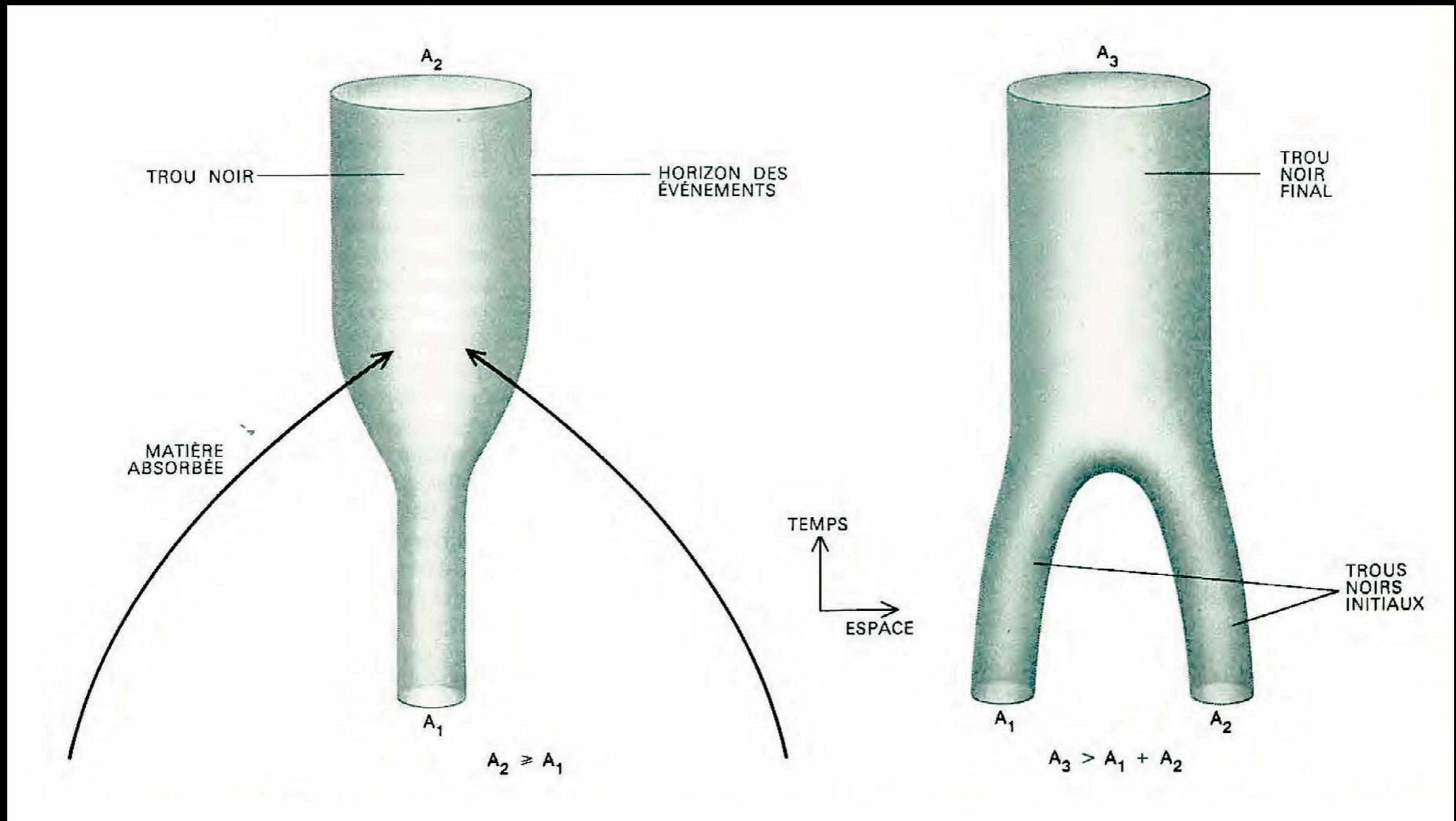
James M. Bardeen, de l'Université de Washington, Brandon Carter, actuellement à l'Observatoire de Meudon, et moi-même avons étudié les correspondances entre les propriétés des trous noirs et les lois de la thermodynamique. La première loi de la thermodynamique énonce qu'une petite variation d'entropie d'un système s'accompagne d'une variation proportionnelle de son énergie. Le coefficient de proportionnalité entre ces deux grandeurs est la température du système. Bardeen, Carter et moi-même

avons mis en évidence une loi analogue reliant la variation de la masse d'un trou noir et la variation de la surface de son horizon. Le facteur de proportionnalité reliant ces deux quantités est une quantité appelée « gravitation de surface », qui est une mesure de l'intensité du champ gravitationnel au niveau de l'horizon. Si l'on admet que la surface de l'horizon

correspond à l'entropie, la gravitation de surface correspond à la température. L'uniformité de la gravitation de surface en tout point de l'horizon permet de lui faire correspondre la température, également uniforme en tout point d'un corps en équilibre thermique.

Il existait ainsi une analogie manifeste entre l'entropie et la surface de l'horizon d'un trou noir ; toutefois, nous ne comprenions pas encore très bien la signification physique réelle de l'entropie associée à un trou noir. En 1972, Jacob D. Bekenstein, alors étudiant à l'Université de Princeton et, maintenant à l'Université du Néguev en Israël, suggéra le théorème suivant : lorsqu'un trou

HORIZON DES TROUS NOIRS ET ENTROPIE



Il existe une analogie entre la surface de l'horizon des trous noirs et l'entropie. Lorsque de la matière tombe dans un trou noir (à gauche, le temps s'écoulant de bas en haut) la surface de l'horizon augmente. Si deux trous noirs fusionnent en un seul (à droite) la

surface de l'horizon du trou noir résultant est supérieure à la somme des surfaces des horizons des trous noirs initiaux. La seconde loi de la thermodynamique (principe de Carnot) énonce que l'entropie d'un système isolé augmente toujours avec le temps.

Rejoignez-nous
sur Instagram

POURLA
SCIENCE

[instagram.com/pourlascience](https://www.instagram.com/pourlascience)



noir est engendré par effondrement gravitationnel, il prend rapidement un état stationnaire qui n'est caractérisé que par trois paramètres: la masse, le moment angulaire et la charge électrique; en dehors de ces trois paramètres, le trou noir ne conserve aucun détail de l'objet ayant subi l'effondrement; cette propriété très importante, résumée de manière imagée par le théorème «un trou noir n'a pas d'aspérité», a été confirmée par les travaux de Carter, Werner Israel (Université d'Alberta), David C. Robinson (King's College, Londres) et moi-même.

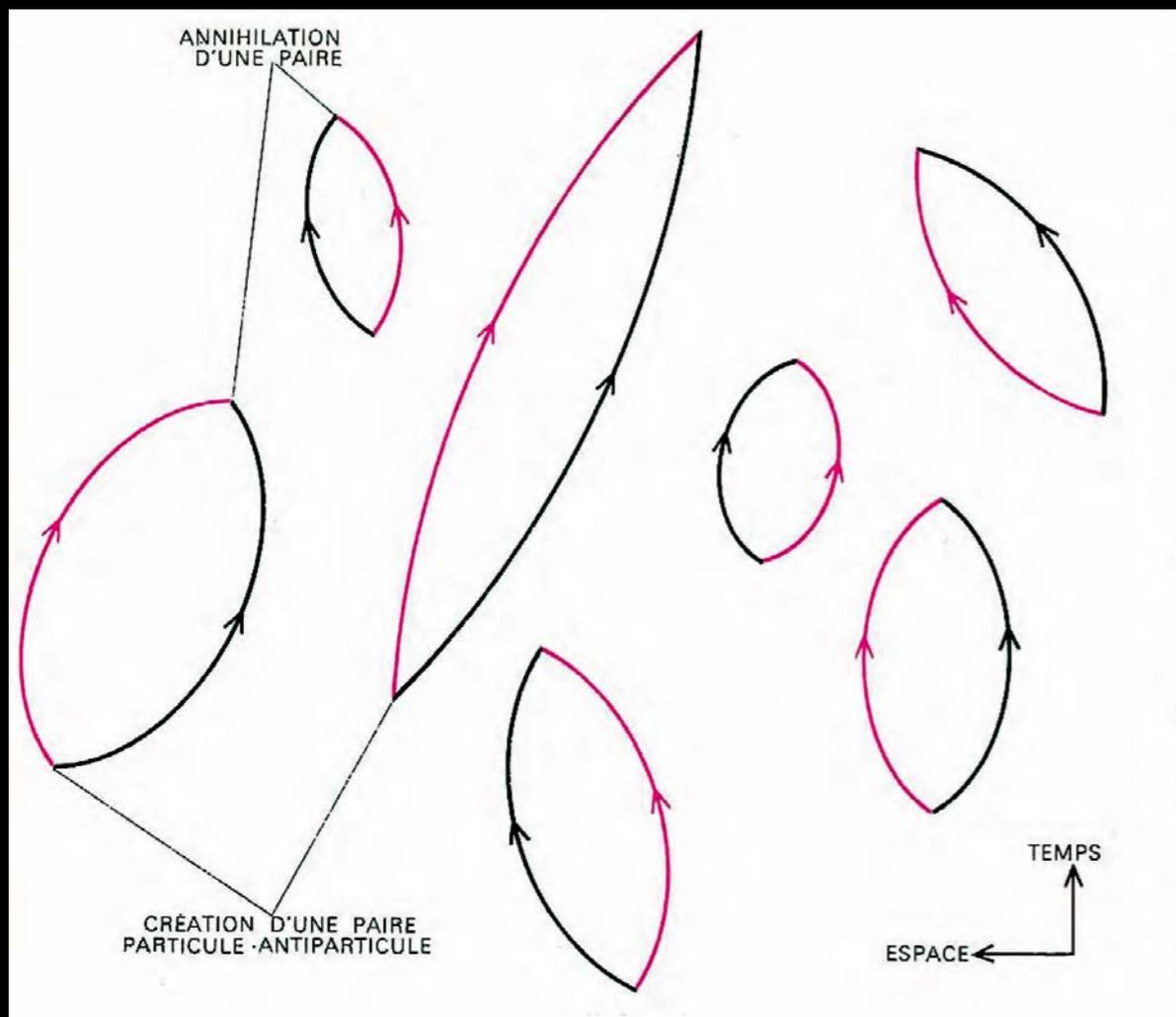
UN NOMBRE FINI DE CONFIGURATIONS

D'après le théorème précédent, on perd une grande quantité d'informations lors de l'effondrement gravitationnel d'un corps. Par exemple, l'état final du trou noir est indépendant de la constitution initiale du corps, qu'il soit composé de matière ou d'anti-matière, et que sa forme soit sphérique ou très irrégulière. En d'autres termes, un trou noir de masse, de moment angulaire et de charge électrique donnés, peut avoir été formé par effondrement d'une multitude de configurations matérielles différentes.

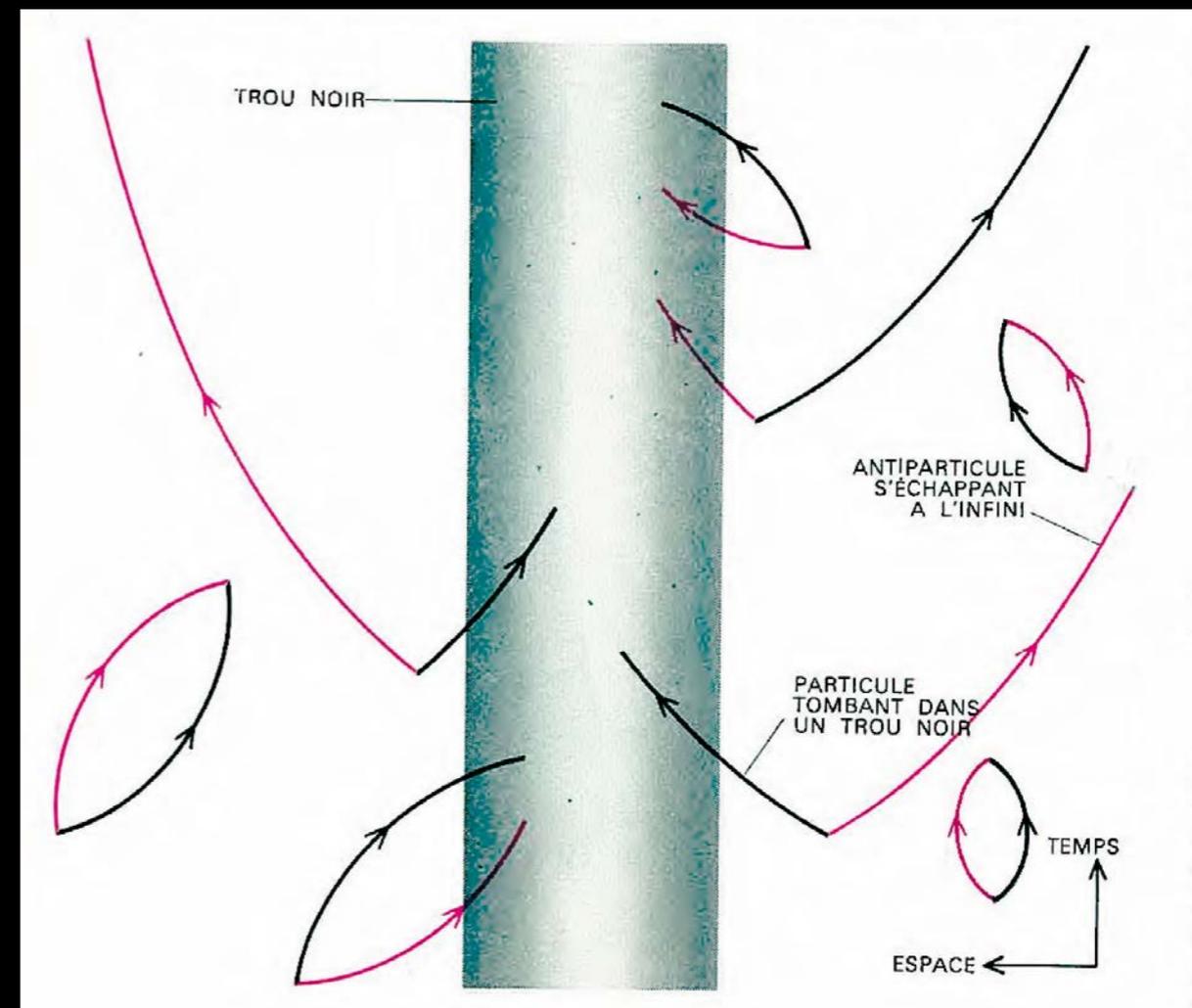
En fait, si on néglige les effets quantiques, le nombre de configurations initiales possibles est infini, puisque le trou noir pourrait avoir été formé par l'effondrement d'un nuage constitué par un nombre infiniment grand de particules de masse infiniment petite.

Cependant, selon le principe d'incertitude de la mécanique quantique, une particule de masse m se comporte comme une onde de longueur d'onde h/mc , où h est la constante de Planck (nombre égal à $6,62 \times 10^{-27}$ erg-seconde) et c la vitesse de la lumière. Pour qu'un nuage de particules puisse constituer, après effondrement, un trou noir, il est nécessaire que cette longueur d'onde soit plus courte que la taille d'un trou noir formé. Il en résulte que le nombre de configurations qui peuvent donner naissance à un trou noir de masse, de moment angulaire et de charge donnés, est certes très grand mais néanmoins fini. Bekenstein proposa d'identifier le logarithme de ce nombre de configurations initiales possibles avec l'entropie du trou noir. Ce logarithme serait une mesure de la quantité d'informations irrémédiablement perdue lorsque la matière constituant le trou noir traverse l'horizon.

DES PAIRES DE PARTICULES VIRTUELLES À L'ORIGINE DU RAYONNEMENT DES TROUS NOIRS



L'espace-temps vide est rempli de paires virtuelles de particules (*en noir*) et d'antiparticules (*en magenta*). Les éléments d'une paire naissent simultanément en un point de l'espace-temps, s'éloignent puis se rapprochent et enfin s'annihilent entre elles (*à gauche*). Ces paires sont qualifiées de virtuelles car, contrairement aux particules réelles, elles ne peuvent pas être détectées directement. On peut



néanmoins mesurer leurs effets indirects. A proximité d'un trou noir, une composante d'une paire particule-antiparticule peut tomber dans celui-ci, laissant l'autre élément de la paire isolé, sans partenaire pour s'annihiler (*à droite*). Si cet élément ne suit pas son partenaire dans le trou noir, il peut s'échapper jusqu'à l'infini. Le trou noir apparaît ainsi comme émettant à la fois des particules et des antiparticules.

Le raisonnement de Bekenstein semblait hélas contenir une difficulté apparemment irréductible. En effet, si un trou noir possède une entropie finie proportionnelle à la surface de l'horizon, il doit aussi posséder une température finie, proportionnelle à la gravitation de surface. Il est donc nécessaire que le trou noir soit en équilibre avec un rayonnement thermique, à une température différente de zéro. Selon les concepts classiques, un tel équilibre est impossible puisque, par définition, le trou noir absorbe tout rayonnement thermique qu'il reçoit sans qu'il puisse émettre quoi que ce soit en retour.

LE RAYONNEMENT THERMIQUE DES TROUS NOIRS

Ce paradoxe a subsisté jusqu'au début de 1974; Je m'intéressais à cette époque au comportement quantique de la matière au voisinage d'un trou noir et je découvris, à ma grande surprise, qu'un trou noir semblait émettre en permanence des particules! Comme tout le monde alors, je tenais pour acquis qu'un trou noir ne pouvait rien émettre. Mes efforts théoriques pour me débarrasser de ce terme émissif restèrent vains et

je dus me résigner à accepter son existence; je fus définitivement convaincu de la réalité physique du phénomène par la nature «thermique» du spectre d'émission des particules le trou noir crée et émet un rayonnement et des particules, tout comme un corps chaud ordinaire qui posséderait une température proportionnelle à sa gravitation de surface et inversement proportionnelle à sa masse. Cette découverte élimina le paradoxe qui infirmait la proposition de Bekenstein: le trou noir possède une entropie finie, puisqu'il peut être en équilibre thermique à une température finie autre que zéro degré. La réalité mathématique de l'émission thermique des trous noirs a été depuis confirmée par un grand nombre de chercheurs et différentes approches du phénomène

On peut comprendre cette émission de la manière suivante: selon la théorie quantique il se crée en permanence, et même dans le vide absolu, des paires «virtuelles» comprenant une particule et une antiparticule. Les particules constituant une paire se séparent d'abord et se réunissent ensuite pour s'annihiler l'une l'autre. Ces particules sont dites «virtuelles», car, à la différence

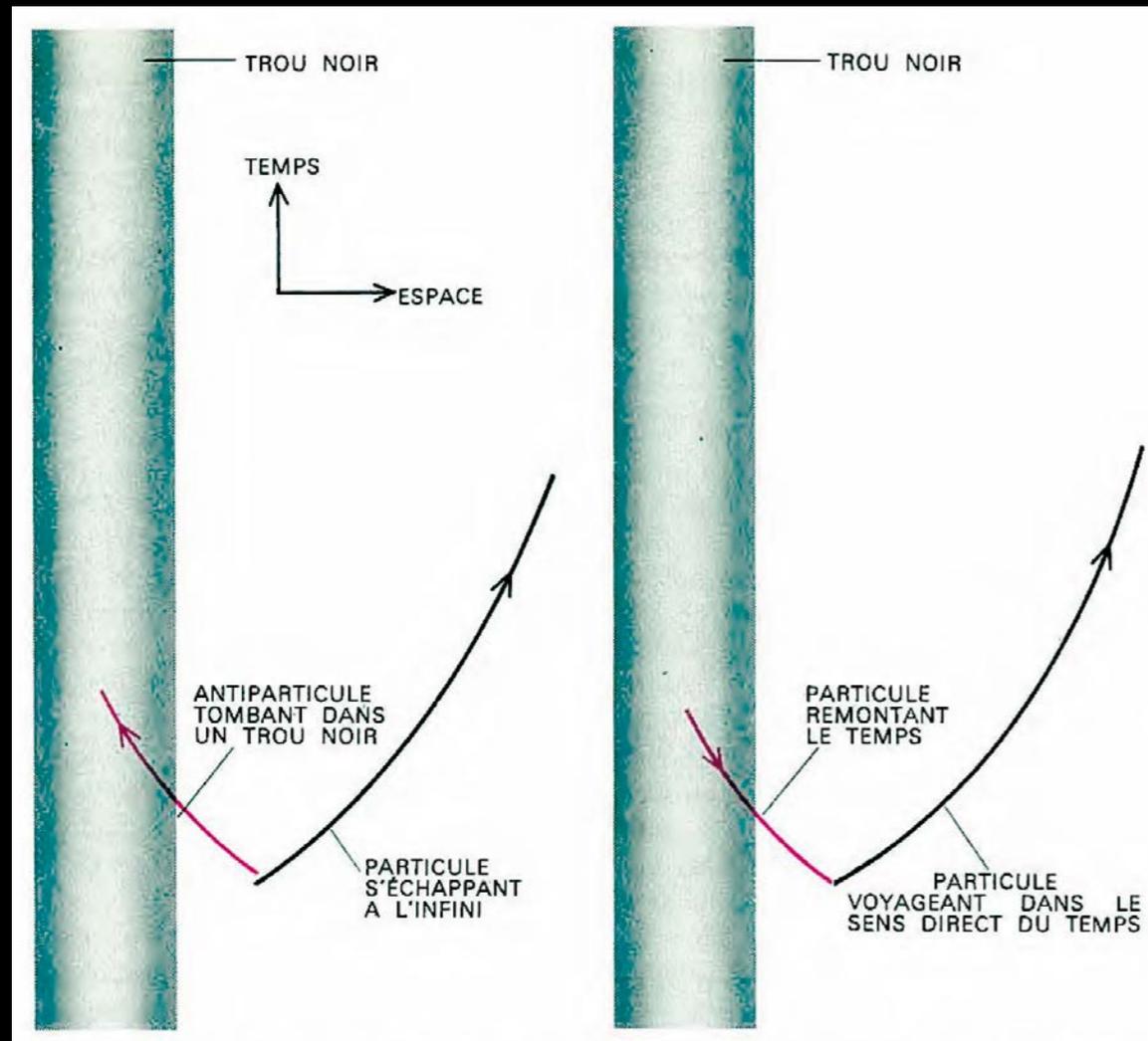
des particules «réelles», on ne peut pas les déceler au moyen d'un détecteur de particules. On peut néanmoins en observer les effets indirects: leur existence a été confirmée par le petit décalage (effet Lamb) qu'elles produisent dans le spectre de la lumière émise par des atomes d'hydrogène excités.

DES PAIRES DE PARTICULES VIRTUELLES SÉPARÉES

En présence d'un trou noir, l'un des éléments d'une paire de particules «virtuelles» peut «tomber» dans le trou noir, et laisser toute seule l'autre particule dépourvue du partenaire qui la détruisait. La particule ou l'antiparticule abandonnée peut suivre sa partenaire dans le trou noir, mais elle peut aussi s'échapper à l'infini, et elle apparaît alors comme un élément du rayonnement émis par le trou noir.

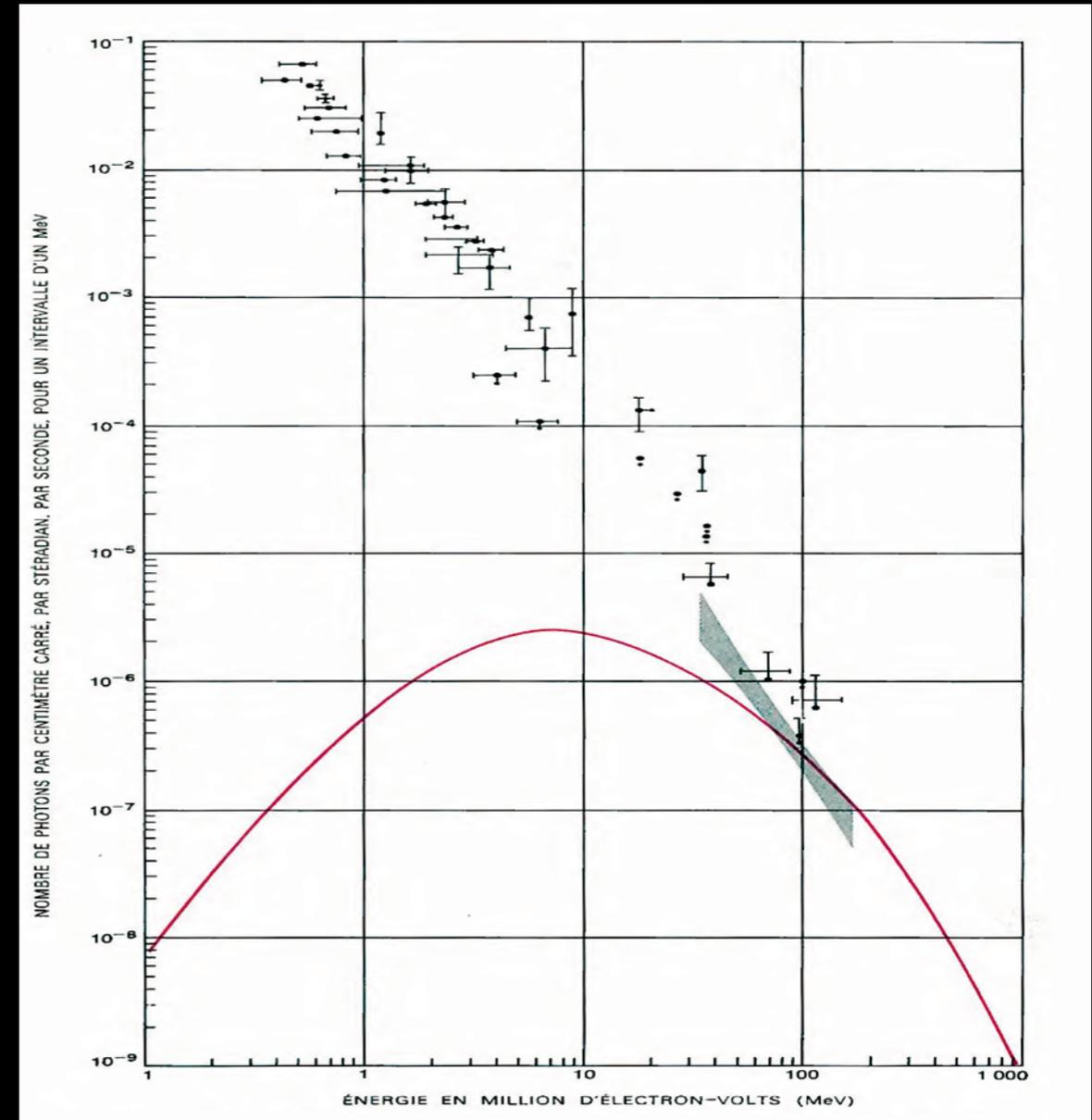
Selon une autre interprétation de ce phénomène, une des deux particules qui tombe dans le trou noir, par exemple l'antiparticule, est une particule réelle qui remonte le temps; l'antiparticule qui tombe dans le trou noir, peut être considérée comme une particule qui sort du trou noir mais qui remonte le temps.

DES PARTICULES QUI REMONTENT LE TEMPS



Plusieurs interprétations peuvent expliquer pourquoi un trou noir émet des particules. Une explication s'appuie sur la formation d'une paire virtuelle particule-antiparticule dont l'un des éléments est piégé dans le trou noir alors que l'autre s'en échappe (*à gauche*). Selon une autre explication, on considère qu'une antiparticule tombant dans un trou noir est l'équivalent d'une particule normale qui remonte le temps en sortant du trou noir (*à droite*). Une fois à l'extérieur, cette particule est diffusée par le champ de gravitation ; elle est transformée en une particule descendant le temps, qui s'échappe alors à l'infini.

DES MICRO TROUS NOIRS PRIMORDIAUX



Des trous noirs de la taille d'une particule élémentaire et pesant un milliard de tonnes pourraient avoir été formés juste après le big bang. D'une température de 70 milliards de degrés, ils devraient émettre du rayonnement gamma. Les observations gamma (*points et zone grise ci-dessus*) indiquent que la densité de ces trous noirs primordiaux doit être inférieure à un million par année-lumière au cube. La courbe rouge correspond au spectre déduit d'une telle densité.

Lorsque la particule atteint le point où la paire particule antiparticule se matérialisait initialement, elle est diffusée par le champ de gravitation, et se met alors à descendre le temps.

Ainsi, la théorie quantique, contrairement à la mécanique classique, permet à une particule de s'échapper d'un trou noir. Ce n'est d'ailleurs pas le seul domaine de la physique atomique ou nucléaire où des barrières, qui semblent infranchissables par les particules lorsqu'on s'en tient aux principes classiques, deviennent perméables lorsque l'on fait intervenir les principes de la mécanique quantique.

Un trou noir originel dégagerait une puissance d'environ 6000 megawatts

L'épaisseur de la barrière associée à un trou noir est proportionnelle à la masse de ce trou noir. Seul, un très petit nombre de particules peut s'échapper d'un trou noir de la taille de celui que l'on situe dans Cygnus X-1 ; mais en revanche, les particules s'échappent assez rapidement de trous noirs plus petits.

Des calculs détaillés démontrent que les particules émises possèdent un spectre thermique qui correspond à une température en augmentation rapide quand la masse du trou noir décroît.

Pour un trou noir ayant la masse du Soleil, la température associée n'est que d'un dix-millionième de degré au-dessus du zéro absolu. Le rayonnement thermique qui s'échappe d'un trou noir à cette température est complètement noyé dans le bruit de fond du rayonnement de l'univers. Mais pour un trou noir dont la masse serait seulement égale à un milliard de tonnes, c'est à dire un trou noir « originel » de la taille

d'un proton, la température serait de quelques 120 milliards de degrés Kelvin, ce qui correspond à une énergie d'environ 10 millions d'électron-volts. A une telle température, un trou noir serait capable d'engendrer des paires électron-positon et des particules de masse nulle, telles que des photons, des neutrinos

et des gravitons (les gravitons seraient les particules transmettant les forces de gravitation). Un trou noir « originel » dégagerait une puissance d'environ 6000 mégawatts, soit la puissance de six grandes centrales nucléaires.

La masse et la taille d'un trou noir diminuent quand celui-ci émet des particules. Cette diminution favorise à son tour la fuite des particules, de sorte que l'émission se poursuit à un rythme accéléré, jusqu'à disparition finale du trou noir. Cette mort inéluctable est le destin de tout trou noir. La durée de vie des trous noirs de grande taille est cependant très longue : environ 10⁶⁶ ans pour un trou noir de la taille du Soleil. En revanche, les trous noirs originels doivent se consumer entièrement en quelques 10 milliards d'années après l'explosion originelle qui aurait donné naissance à l'univers. De tels trous noirs devraient de nos jours émettre des rayons gamma durs dont l'énergie est d'environ 100 millions d'électronvolts.

Don N. Page (California Institute of Technology) et moi-même avons calculé la densité moyenne des trous noirs originels dans l'univers. Ces calculs utilisent des mesures effectuées à bord

Rejoignez-nous
sur Twitter

POUR LA
SCIENCE

twitter.com/pourlascience



du satellite SAS-2 sur le bruit de fond cosmique (rayonnement gamma) et montrent qu'il y a moins de 200 trous noirs originels dans un cube d'une année lumière de côté. Si les trous noirs sont concentrés dans le halo des galaxies – cet étroit nuage constitué d'étoiles en mouvement rapide entourant chaque galaxie – au lieu d'être uniformément répartis, la densité locale des trous noirs autour de nous pourrait être un million de fois plus grande. Dans cette hypothèse le trou noir le plus proche de la Terre serait probablement au moins aussi éloigné que Pluton.

L'étape finale du processus de disparition d'un trou noir serait si rapide qu'elle s'achèverait dans une formidable explosion dont la puissance dépendrait du nombre d'espèces différentes de particules existantes. Si, comme on l'admet généralement, toutes les particules sont constituées à partir de six espèces différentes de quarks, une explosion finale aurait une énergie équivalente à environ 10 millions de bombes à hydrogène d'une mégatonne chacune. Cependant, une autre théorie des particules élémentaires, avancée par R. Hagedorn du C.E.R.N., prévoit

un nombre infini de particules élémentaires, de masse de plus en plus élevée. Alors, selon cette théorie, lorsque le trou noir rapetisserait et s'échaufferait, il émettrait un nombre de plus en plus grand de particules de types différents, entraînant une explosion 100000 fois plus puissante que celle correspondant à l'hypothèse des quarks. L'observation de l'explosion d'un trou noir pourrait fournir de très importantes informations sur la physique des particules élémentaires, informations qu'il semble impossible d'obtenir autrement.

UNE EXPLOSION GAMMA

L'explosion d'un trou noir engendrerait un flux considérable de rayons gamma à haute énergie. On pourrait bien entendu les capter avec des détecteurs de rayons gamma disposés à bord de satellites ou de ballons; il serait toutefois difficile d'embarquer un détecteur de dimensions suffisantes pour intercepter avec une probabilité raisonnable un nombre important de photons gamma provenant d'une telle explosion. Une solution consisterait à utiliser une navette spatiale pour mettre en orbite un grand détecteur. Une autre solution, plus simple et moins coûteuse,

consisterait à utiliser la haute atmosphère comme détecteur: un rayon gamma de haute énergie traversant l'atmosphère crée une avalanche de paires électrons-positons, qui, initialement, se propage à travers l'atmosphère à une vitesse supérieure à celle de la lumière dans le milieu (la lumière y est ralentie par interaction avec les molécules d'air). Les électrons et les positons vont alors provoquer une espèce de « bang » sonique, ou onde de choc, de type électromagnétique. On peut détecter une telle onde de choc (effet Cerenkov) en mesurant l'éclair de lumière visible auquel elle donne naissance.

Une expérience préliminaire effectuée par Neil A. Porter et Trevoc C. Weekes (University College, Dublin), montre que si les trous noirs explosent selon le processus prévu par la théorie de Hagedorn, il y a, par siècle et dans la région de la galaxie que nous occupons, moins de deux explosions de trous noirs par année-lumière-cube, c'est-à-dire dans un cube d'une année lumière de côté. Ceci impliquerait une densité de trous noirs originels inférieure à 100 millions par « année lumière-cube ». Il devrait être possible d'améliorer considérablement la sensibilité de ces observations; même si elles ne permettent pas

de prouver l'existence de trous noirs originels, elles seront enrichissantes. Si ces observations fixent une valeur basse à la limite supérieure de la densité de tels trous noirs, l'univers, à sa naissance, devait être très calme et peu turbulent.

L'explosion originelle « big bang » ressemblerait à l'explosion d'un trou noir, mais à plus vaste échelle. On peut espérer qu'une meilleure compréhension du mécanisme d'émission des particules par un trou noir améliorera notre compréhension de la création de la matière au moment du « big bang ». Dans un trou

La matière a pu d'abord s'effondrer puis être ensuite recréée dans le big bang

noir, si la matière disparaît et est à jamais perdue, une nouvelle matière est recréée. Il est donc possible que dans une phase primitive de l'univers la matière se soit « effondrée » pour être ensuite recréée au moment de l'explosion originelle.

Si la matière qui donne naissance à un trou noir par effondrement possède une charge électrique globale, le trou noir résultant possède la même charge. Cela signifie que le trou noir aura tendance à attirer

l'élément des paires particule-antiparticule qui possède une charge de signe opposé à la sienne et à repousser l'élément dont la charge est de même signe. Le trou noir émettra donc de préférence des particules dont la charge aura le même signe que la sienne, ce qui aura pour effet de lui faire perdre rapidement sa charge. De même, si la matière soumise à l'effondrement possède un moment angulaire global, le trou noir résultant sera animé d'un mouvement de rotation et émettra de préférence des particules possédant un moment angulaire. La raison pour laquelle un trou noir « se souvient » de la

charge électrique, du moment angulaire et de la masse de la matière qui s'est effondrée, et « oublie » les autres caractéristiques, tient à ce que ces trois quantités sont couplées à des champs à longue portée, à savoir le champ électromagnétique pour la charge, et le champ de gravitation pour le moment angulaire et la masse.

Les expériences réalisées par Robert H. Dicke (Université de Princeton) et Vladimir Braginsky (Université d'État

de Moscou) ont montré qu'il n'y avait pas de champ à longue portée associé à l'effet quantique appelé « nombre baryonique » (les baryons constituent une certaine classe de particules incluant le proton et le neutron). En conséquence, un trou noir formé à partir de l'effondrement d'une collection de baryons doit oublier son nombre baryonique et rayonner autant de baryons que d'antibaryons. En disparaissant, le trou noir devrait donc violer

franchissent par effet tunnel le mur formé par le trou noir, proviennent d'une région sur laquelle un observateur extérieur n'a aucun renseignement, sinon les valeurs de la masse, du moment angulaire et de la charge électrique. Il en résulte que toutes les combinaisons ou configurations de particules émises, qui ont la même énergie, le même moment angulaire et la même charge électrique, sont équiprobables. S'il n'est pas rigoureusement impossible

on peut prévoir simultanément la position et la vitesse d'une particule. En mécanique quantique, le principe d'incertitude interdit de prévoir plus d'une seule de ces deux mesures; l'observateur peut prévoir soit la position future, soit la vitesse future, mais pas les deux. Éventuellement, il prévoit le résultat d'une mesure combinant la position et la vitesse. Un observateur n'a donc pas, en réalité, toute latitude pour effectuer des mesures. La situation est encore pire avec les trous noirs. Puisque les particules émises par un trou noir proviennent d'une région dont l'observateur n'a qu'une connaissance limitée, il lui est impossible de prévoir la position ou la vitesse d'une particule ou une combinaison des deux; tout ce qu'il peut calculer est la probabilité d'émission de certaines particules. Il semble donc qu'Einstein avait doublement tort lorsqu'il déclarait « Dieu ne joue pas aux dés ». L'examen de l'émission de particules à partir de trous noirs semblerait montrer que non seulement Dieu joue aux dés, mais que, parfois, il les jette dans des abysses où l'on ne peut plus les voir!

Einstein avait doublement tort en déclarant « Dieu ne joue pas aux dés »

l'une des lois les plus chères à la physique des particules, à savoir la loi de conservation du nombre baryonique.

Bien que l'hypothèse de Bekenstein selon laquelle les trous noirs possèdent une entropie finie, requière, pour être conséquente, que les trous noirs rayonnent thermiquement, il semble miraculeux que des calculs précis de mécanique quantique, portant sur la création de particules, aboutissent également à une émission à spectre thermique. L'explication de ce phénomène est que les particules émises qui

que le trou noir émette un programme de télévision ou les œuvres de Proust en dix volumes, le nombre de configurations de particules correspondant à ces cas exceptionnels, est cependant extrêmement faible. Le nombre de configurations le plus grand correspond, et de loin, à une émission dont le spectre est thermique.

L'émission de particules par les trous noirs présente un caractère d'incertitude supplémentaire par rapport à l'incertitude habituelle, conséquence de la mécanique quantique. En mécanique classique,

**Cet article a été publié dans
Pour la Science - n° 01 - Novembre 1977**

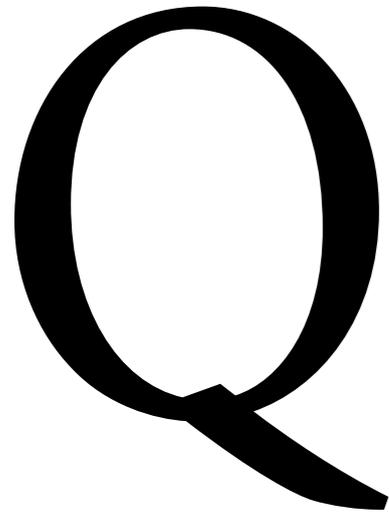


Les trous noirs détruisent-ils irrémédiablement l'information portée par la matière qu'ils engloutissent, en contradiction avec les principes de la physique quantique ? Ce paradoxe défie les physiciens depuis plus de 40 ans. Stephen Hawking, Andrew Strominger et Malcolm Perry proposent une nouvelle piste pour le résoudre.

Sean Baily

Paradoxes

Trous noirs : une nouvelle piste pour le problème de l'information



ue devient une lettre que vous jetez dans un trou noir? Selon la théorie de la relativité générale, lorsque votre texte franchit une certaine limite, l'horizon des événements du trou noir, il ne pourra jamais ressortir, même s'il se déplaçait à la vitesse de la lumière. Il semble définitivement perdu... Mais dans les années 1970, Stephen Hawking s'est intéressé aux effets quantiques qui se manifestent près de l'horizon des événements et a démontré que, malgré les principes de la relativité générale, un faible rayonnement s'échappe quand même du trou noir. En d'autres termes, il « s'évapore », et toute la matière à l'origine du trou noir ou tombée dedans par la suite finit par en sortir sous la forme de rayonnement. Alors, peut-on récupérer notre message? Hélas, le rayonnement prédit par Stephen Hawking est un rayonnement de corps noir (semblable au rayonnement thermique émis par un métal chauffé), qui ne porte aucune information sur l'objet émetteur autre que sa température. En

particulier, le rayonnement de Hawking ne porte aucune information sur la matière tombée dans le trou noir. En fin de compte, notre message semble irrémédiablement perdu.

Or, une telle conclusion est en contradiction directe avec les principes de la physique quantique: l'information peut être transformée, mais elle n'est jamais perdue. Il est toujours théoriquement possible de reconstituer le message initial. Comment résoudre cette contradiction? Les physiciens qui se sont attaqués à ce problème depuis 40 ans ont exploré les aspects les plus étonnants de la physique théorique, faisant appel à des concepts exotiques comme le « principe holographique » ou le « mur de feu ». Stephen Hawking, avec Malcolm Perry, de l'université de Cambridge, au Royaume-Uni, et Andrew Strominger, de l'université Harvard, aux États-Unis, proposent aujourd'hui une nouvelle solution.

L'APPROCHE HOLOGRAPHIQUE

Les trous noirs sont une sorte de laboratoire virtuel pour les physiciens, qui peuvent y mettre à l'épreuve leurs théories. En effet, comme ils concentrent

une grande masse dans une région très petite, ces astres sont le point de rencontre de la relativité générale et de la mécanique quantique, deux théories jusqu'ici irréconciliables. L'étude des trous noirs pourrait être la clé pour construire une théorie quantique de la gravité. Un des obstacles est justement la question de la perte d'information dans les trous noirs.

En 1997, une avancée importante a été réalisée par le physicien argentin Juan Maldacena. Il a montré qu'une procédure mathématique permettait de traduire une théorie incluant la gravitation en une théorie équivalente mais sans gravitation dans un espace comptant une dimension en moins. [Cette procédure est nommée principe de correspondance AdS/CFT ou principe holographique.](#) Par exemple, le système d'un trou noir dans un espace à 4 dimensions peut être traduit en celui d'un gaz chaud d'atomes en 3 dimensions. Le point crucial ici est que cette dernière formulation n'est régie que par la physique quantique, qui garantit qu'il n'y a aucune perte d'information. Cette approche a permis de conclure qu'il n'y avait pas de perte d'informa-

tion dans un trou noir. Ce raisonnement a convaincu de nombreux chercheurs, dont Stephen Hawking.

Reste à savoir comment l'information tombée dans le trou noir s'en échappe si le rayonnement de Hawking ne dépend que de sa température? De nombreuses pistes ont été proposées, mais aucune n'a encore vraiment permis de résoudre le problème. Une des approches les plus discutées ces dernières années conduit à [un paradoxe que Joe Polchinski a tenté de résoudre en introduisant la notion de mur de feu](#): l'horizon des événements devient le siège d'une importante émission d'énergie, de nature différente du rayonnement de Hawking. Mais même cette approche a des lacunes.

Les supertranslations mettent à mal le «théorème de la calvitie»

Stephen Hawking, lors d'une conférence à Stockholm en août 2015, a présenté les grandes lignes d'une nouvelle piste qu'il a étudiée avec Malcolm Perry et Andrew Strominger. Comme toute annonce de Stephen Hawking, celle-ci

a été très relayée dans les médias mais les physiciens, eux, attendaient de voir les calculs pour évaluer les promesses. [L'article est finalement paru début janvier 2016 sur le serveur de prépublication arXiv.](#)

L'idée au cœur de cette étude a émergé dans des travaux antérieurs d'Andrew Strominger. Celui-ci s'est intéressé à des transformations, nommées supertranslations, qui opèrent sur l'espace-temps. Ces supertranslations avaient été étudiées dès 1962 par les physiciens H. Bondi, M. van der Burg, A. Metzner et R. Sachs, et de façon différente par Steven Weinberg en 1965. Une conséquence de ces supertranslations est l'émergence de particules nommées gravitons softs et photons softs,

qui sont toutes d'énergie nulle mais se distinguent les unes des autres par des moments cinétiques différents. Ainsi, l'état de plus basse énergie (le «vide») d'un système physique n'est pas unique, il peut être rempli de ces particules

softs d'énergie nulle, créant une multiplicité de vides possibles. Ces derniers se distinguent par le moment cinétique des particules softs qu'ils contiennent. Quand Andrew Strominger a appliqué ce résultat à un trou noir qui s'évapore totalement, il a réalisé que dans ce cas également le vide obtenu n'est pas unique et dépend de son contenu en particules softs, ce qui est une information en soi. Cela ouvre une voie à la conservation d'information même si un trou noir s'évapore totalement.

Par ailleurs, les supertranslations mettaient à mal un autre principe lié aux trous noirs. Un tel corps est normalement caractérisé par seulement trois paramètres: sa masse, son moment cinétique et sa charge électrique. Il ne présente aucune autre caractéristique, et deux trous noirs dont ces trois grandeurs sont identiques sont strictement similaires. Ce théorème a été surnommé le «théorème de la calvitie». Or, les supertranslations imposent la conservation de grandeurs supplémentaires même par le trou noir qui s'évapore. Chaque trou noir posséderait donc des caractéristiques supplémentaires, et donc une certaine forme d'information.

Les résultats d'Andrew Strominger sur les supertranslations indiqueraient qu'il existe un lien entre ces transformations de l'espace-temps et le paradoxe de

Des particules softs créées sur l'horizon du trou noir enregistrent l'information de chaque particule qui le franchit

l'information. Stephen Hawking, Malcolm Perry et Andrew Strominger ont voulu préciser le mécanisme reposant sur ces supertranslations qui assure la conservation de l'information. Ils ont étudié un modèle simplifié de supertranslations appliquées à la force électromagnétique et ont ébauché leur application dans le cas gravitationnel, plus complexe à formaliser.

Les chercheurs ont ainsi montré que les particules softs sont créées sur l'horizon des événements du trou noir et enregistrent l'information de chaque particule qui franchit l'horizon tombant dans le trou noir, assurant ainsi la conservation de l'information.

Cependant cette piste n'en est qu'à ses premiers pas. Andrew Strominger et ses collègues, pour mettre à l'épreuve

leur modèle, ont voulu recalculer une formule célèbre, l'entropie de Bekenstein-Hawking, qui relie l'entropie du trou noir à la superficie de son horizon. Les

trois chercheurs obtiennent le bon résultat à un facteur multiplicatif près. C'est encourageant mais il reste à comprendre pourquoi le résultat est incomplet.

Dans un entretien accordé au magazine *Scientific American*, Andrew Strominger signale que, d'après lui, les supertranslations ne sont qu'une partie du mécanisme en jeu. Il faudrait aussi considérer les superrotations, un autre type de transformation que les chercheurs étudient seulement depuis une dizaine d'années. Ainsi, il reste encore des zones d'ombre et des points techniques à préciser. Mais plusieurs physiciens s'accordent déjà à dire que cette nouvelle piste est intéressante et mérite d'être explorée.

**Publié sur www.pourlascience.fr
le 11 février 2016**



L'AUTEUR



Sean Bailly est rédacteur et responsable des actualités à Pour la Science.

BIBLIOGRAPHIE

S. Hawking et al., Soft hair on black holes, prépublication sur arXiv, 5 janvier 2016.

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

POUR LA SCIENCE

170 bis boulevard du Montparnasse – 75014 Paris

GROUPE POUR LA SCIENCE
Directrice des rédactions: Cécile Lestienne

POUR LA SCIENCE
Rédacteur en chef: Maurice Mashaal
Rédactrice en chef adjointe: Marie-Neige Cordonnier
Rédacteurs: François Savatier, Sean Bailly
Rédacteur en chef adjoint (H.-S.): Loïc Mangin
Développement numérique: Philippe Ribeau-Gésippe
Community manager: Jonathan Morin

Directrice artistique: Céline Lapert
Maquette: Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy
Révisseuse: Anne-Rozenn Jouble
Marketing & diffusion: Arthur Peys
Direction du personnel: Olivia Le Prévost
Direction financière: Cécile André

Directeur de la publication et gérant: Frédéric Mériot

PRESSE ET COMMUNICATION
Susan Mackie susan.mackie@pourlascience.fr

PUBLICITÉ France
stephanie.jullien@pourlascience.fr

ABONNEMENTS
Abonnement en ligne: <http://boutique.pourlascience.fr>
Courriel: pourlascience@abopress.fr

Édition française de
SCIENTIFIC AMERICAN
Editor in chief: Mariette DiChristina
President: Dean Sanderson
Executive Vice President: Michael Florek
Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays.
La marque et le nom commercial « Scientific American » sont la propriété de Scientific American, Inc.
Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. ».
En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20 rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).

Dites-nous ce que vous en pensez

Avez vous apprécié les articles présentés
dans ce numéro ?

Voudriez-vous lire d'autres numéros spéciaux
sur des thèmes divers ?

Répondez à un bref questionnaire
et aidez-nous à construire
ce nouveau magazine numérique !

DONNEZ VOTRE AVIS

