

POUR LA
SCIENCE

www.pourlascience.fr

170 bis boulevard du Montparnasse – 75014 Paris
Tél. 01 55 42 84 00

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

HORS-SÉRIE POUR LA SCIENCE

Rédacteur en chef adjoint: Loïc Mangin

Développement numérique: Philippe Ribeau-Gésippe

Community manager: Jonathan Morin

Conception graphique: William Londiche

Directrice artistique: Céline Lapert

Maquette: Pauline Bilbault, Raphaël Queruel,

Ingrid Leroy

Revisseuse: Anne-Rozenn Jouble

Marketing & diffusion: Arthur Peys

Chef de produit: Charline Buché

Direction du personnel: Olivia Le Prévost

Direction financière: Cécile André

Fabrication: Marianne Sigogne et Olivier Lacam

Directeur de la publication et gérant: Frédéric Mériot

Anciens directeurs de la rédaction: Françoise Pétry

et Philippe Boulanger

Conseiller scientifique: Hervé This

Ont également participé à ce numéro:

Pierre Cartigny, François-Xavier Coudert, Benoît Famaey,
Mark Oliver Goerbig, Jean-François Gonzalez,
Florian Jabbour, Capucine Jahan, Jean-Philippe Perrillat,
Christophe Pichon, Sean Raymond, William Rowe-Pirra,
Bertille Thureau

PRESSE ET COMMUNICATION

Susan Mackie

susan.mackie@pourlascience.fr • Tél. 01 55 42 85 05

PUBLICITÉ France

stephanie.jullien@pourlascience.fr

ABONNEMENTS

Abonnement en ligne: <http://boutique.pourlascience.fr>

Courriel: pourlascience@abopress.fr

Tél.: 03 67 07 98 17

Adresse postale: Service des abonnements –

Pour la Science, 19 rue de l'Industrie, BP 90053,

67402 Illkirch Cedex

Tarifs d'abonnement 1 an (12 numéros)

France métropolitaine: 59 euros – Europe: 71 euros

Reste du monde: 85,25 euros

DIFFUSION

Contact kiosques: À Juste Titres ; Benjamin Boutonnet

Tél. 04 88 15 12 41

Information/modification de service/réassort:

www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in chief: Mariette DiChristina

President: Dean Sanderson

Executive Vice President: Michael Florek

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue « Pour la Science », dans la revue « Scientific American », dans les livres édités par « Pour la Science », 162 rue du Faubourg Saint-Denis, 75010 Paris. © Pour la Science S.A.R.L. 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).

Origine du papier: Autriche

Taux de fibres recyclées: 30 %

«Eutrophisation» ou «Impact sur l'eau»: P_{tot} 0,007 kg/tonne



Certifié PEFC

Ce produit est issu
de forêts gérées
durablement et de
sources
contrôlées.

10-31-1282

pefc-france.org

É
DITO



**MAURICE
MASHAAL**
Rédacteur
en chef

DE L'ORDRE UNIVERSEL DANS LE HASARD

Le hasard est un phénomène désigné en général au singulier, ce qui est trompeur: il existe en effet d'innombrables formes de hasard. Pour prendre un exemple simple, le hasard d'un jet de dé régulier n'est pas le même que celui associé à un dé pipé, dont la face favorable apparaît plus souvent que une fois sur six. Mais en dépit de l'existence d'une infinité de formes différentes de hasard, celui-ci obéit, quand on répète un grand nombre de fois la même épreuve aléatoire, à certaines lois statistiques de caractère universel.

La plus célèbre est sans doute la loi de Gauss, aussi appelée loi normale: cette distribution statistique décrite par une courbe en forme de cloche est universelle dans le sens où une multitude de phénomènes aléatoires différents s'y conforment. Et ce n'est pas seulement une constatation: un théorème fondamental de la théorie des probabilités explique cette réalité.

La loi de Gauss et des lois statistiques analogues font aujourd'hui partie de la science «classique». Dans ce numéro, le physicien théoricien Bertrand Eynard nous introduit à d'autres lois universelles, découvertes beaucoup plus récemment à propos des matrices aléatoires – des tableaux de nombres tirés au hasard (*voir pages 34 à 44*). Ces objets mathématiques, très étudiés depuis les années 1950, se sont révélés captivants: non seulement ils présentent des lois statistiques universelles, mais on retrouve celles-ci un peu partout, dans les métros, les forêts, le long des trottoirs... Et, cerise sur le gâteau, des liens profonds, souvent fructueux et parfois mystérieux, se révèlent avec divers champs des mathématiques et de la physique théorique, comme la théorie des nombres, la géométrie des surfaces, la théorie des cordes... Bonne découverte! ■

Nous avons appris avec tristesse le décès d'Annie Tacquenet, qui a été la secrétaire de rédaction de *Pour la Science* depuis ses origines, en 1977, jusqu'en 2013. Toute l'équipe adresse ses sincères condoléances à sa famille et à son époux Daniel, lui aussi collaborateur de longue date de *Pour la Science*.

S

OMMAIRE

N° 487 /
Mai 2018



POUR LA
SCIENCE.FR

LETTRE D'INFORMATION

**NE MANQUEZ PAS
LA PARUTION DE
VOTRE MAGAZINE
GRÂCE À LA NEWSLETTER**

- Notre sélection d'articles
- Des offres préférentielles
- Nos autres magazines en kiosque



Inscrivez-vous
www.pourlascience.fr

HOMMAGE



P. 6
ENTRETIEN

STEPHEN HAWKING RACONTÉ PAR THIBAUT DAMOUR

Stephen Hawking s'est éteint le 14 mars dernier à l'âge de 76 ans. Son empreinte sur la physique est-elle aussi forte que sa notoriété auprès du grand public? Au-delà des résultats qu'il a obtenus, les réflexions qu'il a suscitées en cosmologie sont une source d'inspiration qui nourrit toujours les physiciens.



En couverture:
© Shutterstock.com/bekulnis

Les portraits des contributeurs sont de Seb Jarnot

ACTUALITÉS

P. 14

ÉCHOS DES LABOS

- L'angle magique du graphène
- Les gènes des derniers Néandertaliens
- Des étoiles nées 180 millions d'années après le Big Bang
- Fin des douleurs chroniques?
- La surprise de la saxifrage
- Des virus géants très bactériens
- Traiter les eaux polluées
- L'archéoptéryx volait comme un faisan
- L'énigmatique expansion des langues Pama-Nyungan
- Eau et ondes sismiques
- La glace des profondeurs
- Des vents dans les abîmes de Jupiter

P. 26

LES LIVRES DU MOIS

P. 28

AGENDA

P. 30

HOMO SAPIENS INFORMATICUS

L'art de la synchronisation
Gilles Dowek

P. 32

CABINET DE CURIOSITÉS SOCIOLOGIQUES

Quand l'idéologie détourne la science
Gérald Bronner

GRANDS FORMATS



P. 46

BIOLOGIE DU DÉVELOPPEMENT

LE PLACENTA, CET INCONNU

Adrian Erlebacher
et Susan J. Fisher

Le placenta, l'organe le plus mystérieux de l'anatomie humaine, est bien plus qu'une simple centrale d'approvisionnement du fœtus. À la fois lien avec la mère et barrière, il conditionnerait la vie entière de l'enfant.



P. 56

PLANÉTOLOGIE

LA NAISSANCE FULGURANTE DES PLANÈTES

Linda Elkins-Tanton

Une naissance lente et progressive: tel était le scénario des origines pour les planètes du système solaire. Mais des études récentes, notamment de la météorite Allende, racontent une autre histoire, bien plus rapide et agitée.



P.66

ÉVOLUTION

COMMENT LES SERPENTS ONT PERDU LEURS PATTES

Hongyu Yi

L'étude de plusieurs fossiles de serpents et du développement embryonnaire des espèces actuelles suggère que les serpents ont acquis leur corps fuselé dans un milieu terrestre.



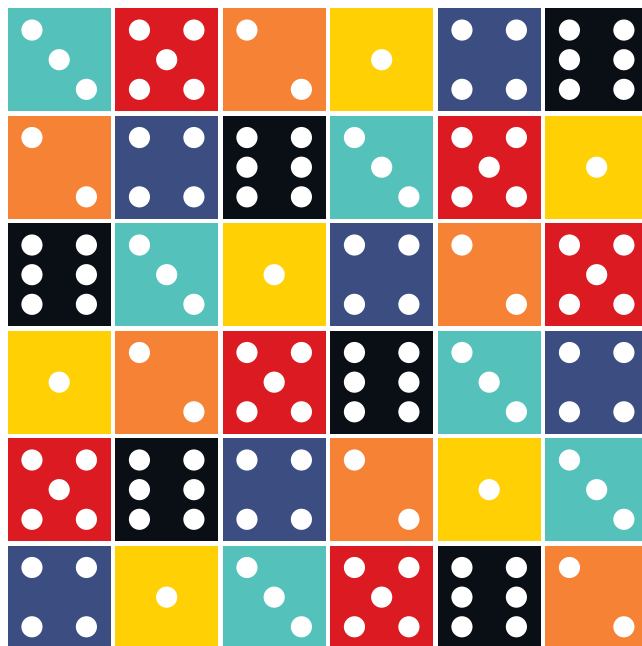
P.74

HISTOIRE DES SCIENCES

LE TROU NOIR DES LUMIÈRES

Jacques Gapaillard

Au XVIII^e siècle, d'illustres savants se sont trouvés confrontés à une singularité mathématique. Sans soupçonner qu'elle constituait un sérieux obstacle théorique, ils n'hésitèrent pas à passer outre de façon *a priori* plausible ou, au contraire, carrément extravagante.



P.34

MATHÉMATIQUES

L'UNIVERSALITÉ DES MATRICES ALÉATOIRES

Bertrand Eynard

Les régularités tapies dans le hasard n'ont pas fini de nous étonner. Avec les matrices aléatoires, les scientifiques découvrent des lois statistiques fascinantes et universelles, c'est-à-dire indépendantes du type de hasard choisi, ainsi que des liens intimes et féconds avec la géométrie, la théorie des cordes...

RENDEZ-VOUS

P.80

LOGIQUE & CALCUL

LES CARRÉS MAGIQUES D'AIRES

Jean-Paul Delahaye

On s'intéresse aux carrés magiques depuis plus de deux millénaires. Des amateurs d'énigmes leur ont récemment associé des exigences géométriques, ce qui enrichit spectaculairement le domaine.



P.86

ART & SCIENCE

Apollon et la petite souris

Loïc Mangin

P.88

IDÉES DE PHYSIQUE

Les transformations du transformateur

Jean-Michel Courty

et Édouard Kierlik

P.92

CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION

La leçon du pongo de Tapanuli

Hervé Le Guyader

P.96

SCIENCE & GASTRONOMIE

Faut-il fouetter la sauce hollandaise?

Hervé This

P.98

À PICORER



1942

Naissance
le 8 janvier
à Oxford,
en Angleterre.

Études
à l'université
d'Oxford, puis
début de la thèse
de doctorat
à l'université
de Cambridge.

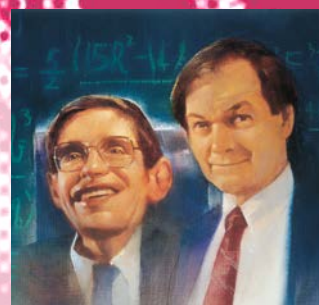
1959-1962

1963

Premiers signes
de sclérose
latérale
amyotrophique.

Obtention
du doctorat,
sur l'étude
des singularités.

1965



1970

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

Stephen Hawking

raconté par Thibault Damour

Stephen Hawking s'est éteint le 14 mars dernier à l'âge de 76 ans. Son empreinte sur la physique est-elle aussi forte que sa notoriété auprès du grand public ? Au-delà des résultats qu'il a obtenus, les réflexions qu'il a suscitées en cosmologie sont une source d'inspiration qui nourrit toujours les physiciens.

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

1974

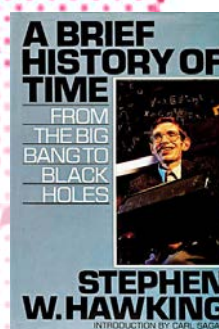


1979-2009

Chaire de professeur lucasien à l'université de Cambridge.

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

1981



1988

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

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

2004

THIBAUT DAMOUR

est physicien théoricien,
professeur à l'IHES (Institut
des hautes études scientifiques,
à Gif-sur-Yvette) et membre
de l'Académie des sciences.
Spécialiste de la relativité
générale et de la théorie
des cordes, il a reçu la médaille
d'or du CNRS en 2017
pour ses travaux sur
le rayonnement gravitationnel
des systèmes binaires.



Stephen Hawking est un sphinx qui nous lègue des énigmes

Stephen Hawking était un de vos proches collègues, mais aussi le physicien le plus connu du grand public, élevé au rang de mythe de son vivant. Que penser de cette notoriété ?

Hawking n'était peut-être pas «le nouvel Einstein» que les médias ont voulu présenter, mais n'allons pas déboulonner des statues pour autant ! Il reste avant tout un scientifique remarquable. Qu'il ait pu, sa vie durant, se maintenir aux frontières du savoir tout en affrontant sa terrible maladie m'a toujours laissé admiratif. C'était une personnalité riche, un amoureux de la musique et un homme plein d'humour.

Un autre trait de sa personnalité m'a frappé un soir qu'il m'avait invité à dîner à Cambridge. Je m'attendais à une tablée de physiciens, mais nous étions seuls et il voulait simplement jouer avec moi à un jeu – Othello – dont il a dû m'expliquer les règles. Au bout d'un moment, je commençais à comprendre et à gagner, ce qui manifestement le chiffonnait. Une minute avant minuit, l'heure à laquelle je devais partir, je jouai un coup gagnant qui mettait fin à la partie. Mais comme je me levais, à minuit et une minute, Stephen produisit discrètement un autre coup, qui l'aurait fait gagner s'il n'avait pas déjà perdu... Hawking jouait toujours pour gagner ! C'est aussi cette volonté qui lui a permis de tenir si merveilleusement face à sa maladie. Mais il n'écrasait pas les autres. Il n'a jamais joué les vedettes parmi les autres scientifiques, même si sa célébrité l'amusait. En fait, il a tenté d'en faire quelque chose d'utile, pour la défense de la vie animale ou sous la forme d'une fondation à Cambridge. C'était fondamentalement un type bien.

Stephen Hawking a fait une entrée remarquée dans le monde de la physique théorique en 1966, avec sa thèse qui prolongeait les travaux du physicien et mathématicien britannique Roger Penrose visant à prouver que les singularités sont inévitables en relativité générale. Que reste-t-il de ce travail ?

Les travaux de Penrose, puis de Stephen Hawking à cette époque, restent très importants. Penrose avait inauguré des méthodes mathématiques qui prenaient en considération les propriétés globales de l'espace-temps de la relativité générale sans qu'il y ait besoin de résoudre les équations d'Einstein. Il s'en était servi pour démontrer l'existence de lignes d'univers qui n'ont pas de futur. Qu'est-ce qu'une ligne d'univers ? En quelque sorte la ligne de vie d'un objet dans l'espace-temps. Penrose avait montré que celle d'une particule tombant dans un trou noir s'arrête en un temps fini selon son horloge. Il y a donc bel et bien quelque chose de singulier à cet endroit. L'espace-temps n'est pas complet : des points en sont ôtés, ainsi que toutes les lignes qui en partent vers le futur. Hawking s'est servi de ce résultat pour montrer qu'il en va de même

de la singularité cosmologique au début de l'Univers : des lignes d'univers n'ont pas de passé au-delà d'un certain point.

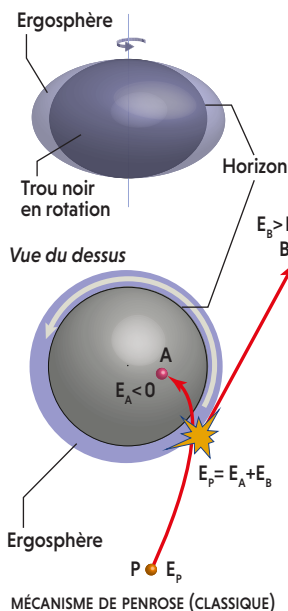
Certes, ces méthodes générales ne permettaient pas de savoir ce qui se passe exactement. Le temps existe-t-il encore au niveau du Big Bang ? N'y a-t-il effectivement plus d'espace ? À quoi correspondent les points singuliers de l'espace-temps de Penrose dans l'Univers ? On ne sait toujours pas répondre à ces questions. Néanmoins, ces résultats, aujourd'hui nommés théorème de Penrose-Hawking, ont marqué un tournant. En 1963, les Russes Isaak Khalatnikov et Evgueni Lifchitz venaient de poser le problème de la nature de la singularité cosmologique. En relativité générale, nous faisons nos calculs dans le cadre d'hypothèses simplificatrices, en supposant par exemple que l'Univers est homogène et isotrope, c'est-à-dire très symétrique. Khalatnikov et Lifchitz s'interrogeaient : est-ce à cause de ces hypothèses qu'une singularité apparaît au départ de l'Univers ? Si les choses étaient moins symétriques, cet artefact disparaîtrait-il ? Ils n'avaient pas résolu le problème. Le théorème de Hawking les a obligés à revoir leur travail puisqu'il annonçait que la singularité est, de façon très générale, obligatoire.

En collaboration avec Volodia Belinski, ils ont finalement trouvé une solution aux équations d'Einstein qui montre précisément ce qui se passe lorsque l'Univers n'est ni homogène ni isotrope : quand on s'approche du Big Bang, la géométrie au voisinage de chaque point de l'Univers oscille violemment et de façon chaotique, de plus en plus vite, de sorte qu'une infinité d'oscillations nous séparent du moment singulier, au temps $t = 0$, où toutes les distances sont réduites à zéro. Là encore, il n'est pas prouvé que c'est ainsi que fonctionne l'Univers réel. Cette question est toujours à l'étude. Mais Hawking a contribué à convaincre la communauté scientifique de l'existence d'une singularité à l'origine de l'Univers, sans pouvoir cependant préciser sa nature.

Les hypothèses qu'il a faites pour cela sont-elles toujours d'actualité ?

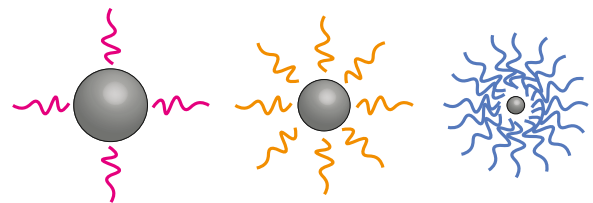
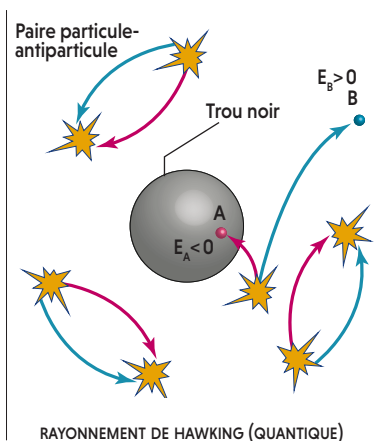
Hawking a utilisé ce qu'on appelle des conditions fortes sur l'énergie. Ce sont des hypothèses que l'on ajoute aux équations d'Einstein et qui postulent, par exemple, que la densité de masse (ou, cela revient au même, d'énergie) est positive et très supérieure à toute pression ou tension présente dans la matière. Il y a différents choix possibles. Stephen était jeune et, surtout à l'époque, très ambitieux. Il voulait un théorème ! Il a donc pris toutes les hypothèses nécessaires pour que son résultat soit obligatoire. Il faut aussi comprendre que ces conditions sur l'énergie paraissaient parfaitement naturelles à l'époque, car les observations cosmologiques semblaient aller dans ce sens.

DU MÉCANISME DE PENROSE À L'ÉVAPORATION DES TROUS NOIRS



Un trou noir en rotation est entouré d'une région, l'ergosphère, où l'espace-temps est entraîné par le mouvement du trou noir au point qu'une particule qui y pénètre ne peut rester immobile par rapport aux étoiles lointaines (ci-dessous à gauche). Roger Penrose démontra qu'il est possible d'ajuster la trajectoire d'une particule P qui se désintègre en deux particules A et B à l'intérieur de l'ergosphère pour que la partie A (qui tombe sur l'horizon) ait, du point de vue d'un observateur lointain, une énergie négative. Dès lors, la particule B qui s'échappe à l'infini a une énergie E_B supérieure à l'énergie initiale E_P : de l'énergie a donc été extraite du trou noir.

Le rayonnement de Hawking repose sur une comptabilité comparable, concernant cette fois les paires de particule-antiparticule



> Certes, depuis, des contre-exemples à cette hypothèse du théorème de Hawking sont apparus. Notamment, la découverte en 1998 que l'expansion de l'Univers s'accélère a nécessité d'introduire une nouvelle hypothèse : une forme énigmatique d'énergie, dite sombre, qui serait responsable de cette accélération. Or l'énergie sombre n'obéit pas aux conditions fortes sur l'énergie de Hawking. Néanmoins, même si son théorème n'est valide que sous certaines hypothèses, il montre clairement à quel endroit il faut chercher. Il montre que la question de la singularité cosmologique ne dépend pas des symétries du problème, alors que les conditions sur l'énergie, elles, comptent beaucoup. C'est une preuve de l'importance du théorème de Hawking.

À partir de 1970 commence le « renouveau de la relativité générale », auquel vous avez vous-même contribué, notamment autour de l'étude théorique des trous noirs. Comment Hawking s'est-il attaqué à ces questions ?

Ce renouveau a eu lieu au départ exclusivement à Cambridge, en Angleterre, et à Princeton, aux États-Unis, et je n'y étais pas ! J'étais encore étudiant et en France, où certains scientifiques ne croyaient pas du tout aux trous

noirs ! J'ai travaillé sur la question parce que je suis allé à Princeton à partir de 1974 et que je me suis retrouvé dans le bain.

Le premier résultat important du côté classique (c'est-à-dire non quantique) date d'un peu avant et vient encore de Penrose. En 1969, il étudia ce qui se passe quand une particule se désintègre en deux particules à l'approche de l'horizon d'un trou noir qui tourne sur lui-même, un trou noir de Kerr. Il montra qu'on peut ajuster les trajectoires pour qu'une particule tombe sur l'horizon et que l'autre s'échappe à l'infini avec une énergie supérieure à celle de la particule initiale (voir l'encadré ci-dessus). Autrement dit, vous avez extrait de l'énergie du trou noir. C'était la première indication que l'on pouvait extraire de l'énergie d'un trou noir tournant.

Ce processus a été immédiatement étudié en détail à Princeton par le jeune Demetrios Christodoulou (18 ans à l'époque !) et son mentor Remo Ruffini. Ils démontrèrent qu'il y avait quelque chose d'irréversible chez les trous noirs : vous pouvez extraire une partie de leur masse-énergie, mais pas tout. Il restera toujours une « masse irréductible » qui, elle, ne peut qu'augmenter, comme une sorte d'entropie (l'entropie étant ce qui mesure le « désordre » d'un système

physique, l'information qui s'y trouve cachée, et, selon le deuxième principe de la thermodynamique, celle d'un système isolé ne peut diminuer) – bien qu'à l'époque, je ne crois pas que qui que ce soit l'ait formulé ainsi. Hawking généralisa ensuite leur résultat en démontrant que l'aire de l'horizon d'un trou noir (égale dans les cas considérés ici au carré de la masse irréductible) ne peut qu'augmenter au cours du temps: même en cas de fusion de deux trous noirs, l'aire finale est supérieure ou égale à la somme des aires des deux trous noirs initiaux.

D'où est finalement venue l'idée d'entropie des trous noirs?

C'est Jacob Bekenstein qui, en 1972, sous l'impulsion de son mentor John Wheeler, a franchi le pas. Bekenstein était en thèse à Princeton et Wheeler lui avait demandé de réfléchir au problème suivant: si j'ai une tasse de thé bouillant et que je la jette dans un trou noir, que devient l'entropie de l'eau chaude? En reprenant les travaux de Christodoulou, Ruffini et Hawking, Bekenstein affirma que l'aire d'un trou noir était effectivement une mesure de son entropie. Pour cela, il suivit deux lignes de calcul différentes. D'une part, il montra que lorsque le trou noir absorbe une particule, son aire augmente d'une certaine quantité en même temps que de l'information est perdue derrière l'horizon – le «bit» d'information qui vous dit en quelque sorte si la particule existe encore ou pas. C'est cohérent avec le fait que l'entropie est une mesure de l'information cachée dans un système.

D'autre part, il considéra une petite boîte remplie d'un gaz chaud. L'entropie du gaz est grande, car du fait de sa température, le mouvement des molécules de gaz est très désordonné. Aussi, quand la boîte tombe dans un trou noir, l'entropie de l'Univers devrait diminuer, puisque le gaz ne reviendra pas. Or on s'attend à ce qu'elle augmente. Il fallait donc que le trou noir ait lui-même une entropie, qui augmenterait quand le gaz y tomberait. Et, par conséquent, une température non nulle. En d'autres termes, les trous noirs étaient d'une certaine façon «chauds» et devaient donc produire un rayonnement! C'était une idée violemment nouvelle et iconoclaste.

Comment cette idée a-t-elle été reçue?

Cette année-là, tous ces gens se sont rencontrés en France, à l'école d'été des Houches, en août 1972. Bekenstein était là en tant qu'étudiant. Les orateurs étaient Brandon Carter, Hawking, Ruffini et d'autres. Lors de cette session, Hawking, Carter et James Bardeen ont certes montré que la physique des trous noirs présente une série d'analogies avec la thermodynamique classique, mais pour eux ce n'étaient que des analogies. Ils étaient convaincus que, sur le fond, Bekenstein avait tort. Il faut dire aussi qu'à cette époque, en Union soviétique, les

Russes avaient commencé à produire des résultats nouveaux en introduisant la mécanique quantique dans l'étude des trous noirs.

Iakov Zeldovitch, notamment, avait eu l'idée nouvelle que les trous noirs en rotation, les trous noirs de Kerr, devaient rayonner des particules quantiques et il l'avait démontré avec son étudiant Alexei Starobinski. Il se trouve qu'Hawking est allé à Moscou la même année et qu'il a discuté du sujet avec Zeldovitch. C'est sûrement là qu'il a compris l'intérêt d'étudier les trous noirs d'un point de vue quantique. Il s'est dit en substance: «Je vais appliquer les méthodes de Zeldovitch, mais sur un trou noir de Schwarzschild, un trou



En 1974, il a fait sa plus grande découverte: l'évaporation quantique des trous noirs



noir qui ne tourne pas, et comme il ne rayonnera pas, cela démontrera que les idées de Bekenstein sont fausses.» Mais il a en fait prouvé le contraire! En 1974, il a fait sa plus grande découverte, celle qui restera comme un résultat essentiel de la physique théorique: l'évaporation quantique des trous noirs, qui rayonnent comme des corps incandescents dont la température est proportionnelle à leur gravité de surface (et donc inversement proportionnelle à leur masse).

Ici encore, il est remarquable que ces résultats soulèvent des questions auxquelles on ne sait toujours pas répondre. L'entropie est définie en physique comme le nombre d'états microscopiques possibles – ou plutôt le logarithme de ce nombre – pour un état macroscopique donné (par exemple le nombre de façons d'interchanger les positions et les vitesses des molécules dans une bonbonne d'air à une pression de 1 atmosphère [atm] et à 20 °C tout en ayant toujours une bonbonne d'air à 1 atm et à 20 °C). Mais dans le cas où l'état macroscopique est un trou noir, quels sont ces états microscopiques que l'on est censé compter? Où sont-ils? À quoi ressemblent-ils? On ne le sait toujours pas...

Ce qui nous amène à la très médiatisée « guerre des trous noirs » avec Leonard Susskind...

Oui, c'est surtout Susskind, à Stanford, qui a voulu jouer avec l'idée de «sa guerre contre »

> Stephen». Mais le problème est important et il faut reconnaître que là encore, c'est Stephen qui a mis le doigt dessus. Quand un trou noir finit de s'évaporer complètement, il s'est transformé en chaleur, en désordre, et l'information quantique contenue dans l'état des particules qui l'avaient constitué au départ est définitivement perdue. Elle a été détruite, ce qu'en principe la mécanique quantique interdit. Pendant des années, Hawking a affirmé qu'il fallait changer la mécanique quantique, mais en 2004, il a reconnu que c'était probablement faux. Des travaux en théorie des cordes, notamment du Néerlandais Gerard 't Hooft et de l'Argentin Juan Martín Maldacena, suggéraient en effet que l'information quantique était conservée.

Aujourd'hui, tout le monde est à peu près convaincu que c'est bien le cas, mais les preuves sont très indirectes et des chercheurs travaillent encore dessus. Des pistes d'explications impliquant des structures très modifiées à l'horizon des trous noirs sont avancées, mais elles ont à mon avis très peu de chances d'être vraies et n'expliquent pas vraiment comment l'évaporation d'un trou noir respecte l'information quantique. C'est caractéristique de tout problème vraiment profond. Longtemps après qu'on l'a posé, il vous survit. C'est le mérite de Stephen d'avoir montré qu'il y avait un problème là où tout le monde pensait qu'il n'y en avait pas.

Dans les années 1980, Stephen Hawking s'est intéressé au problème de l'inflation du très jeune cosmos...

Il a contribué dans ce cadre à des résultats pratiques très importants, même si on sait aujourd'hui que les mêmes calculs avaient été faits quelques années avant en Union soviétique par Gennady Chibisov et Viatcheslav Mukhanov. À son initiative, en 1982, des discussions ont commencé sur les fluctuations du fond de rayonnement cosmologique au sortir de l'inflation – l'image de l'Univers tel qu'il était 300 000 ans après le Big Bang et qui nous parvient sous la forme de microondes. En effet, on pense qu'au tout début de son histoire, l'Univers a connu une phase d'expansion extrêmement rapide qui a amplifié les fluctuations microscopiques du vide quantique. Ce sont ces fluctuations étirées jusqu'à une taille cosmique qui sont à l'origine des petites inhomogénéités du gaz chaud dont le fond cosmologique est l'image. Ces inhomogénéités sont à leur tour les germes qui ont donné, en se condensant, les grandes structures de l'univers actuel, les galaxies et les amas de galaxies.

Avec des gens comme Paul Steinhardt, Michael Turner, Alan Guth, le groupe réuni à Cambridge a compris comment estimer l'amplitude de ces fluctuations dans tous les modèles d'inflation. Stephen a montré dans un article très clair que tout cela est calculable. Ces calculs ont permis de comparer les modèles

aux observations lorsque les mesures du rayonnement cosmologique ont été assez précises pour montrer ces fluctuations.

Dans le même temps, Hawking a poursuivi un effort plus purement théorique en posant son hypothèse « d'Univers sans bord ».

A-t-il des successeurs sur ce chemin ?

Là encore, Hawking a posé une très bonne question qui, comme les précédentes, lui survit. Toute l'histoire de la physique jusqu'à aujourd'hui consiste à découvrir des lois dynamiques qui donnent l'évolution d'un système, par exemple de l'Univers, à partir d'un état

Il a montré qu'il y avait un problème là où personne n'en attendait

initial. Si je connais son état à un instant t_0 , je peux calculer son état à un autre instant t . Hawking s'est demandé, étant donné la présence de cette étrange singularité au début du cosmos, s'il ne manquait pas quelque chose. Ne faudrait-il pas poser, à côté des lois de la physique, une hypothèse de plus, un autre genre de loi qu'on ne peut pas déduire des lois dynamiques et qui stipulerait quel doit être l'état quantique initial de l'Univers ?

La solution « sans bord » qu'il a développée avec Jim Hartle était une proposition dans ce sens. Ils ont utilisé une technique de théorie quantique des champs – qui combine mécanique quantique et relativité restreinte – connue depuis les années 1960 et utilisée pour calculer l'état fondamental d'un système quantique simple. Le résultat n'est pas très probant, les calculs ne sont pas bien définis, mais même si au niveau technique la solution proposée par Hawking n'est plus d'actualité, la question fondamentale qu'il a posée reste. On peut dire qu'il a rendu crédible toute la discipline de la cosmologie quantique.

Tout au long de sa carrière, il a soulevé des problèmes auxquels il a apporté des contributions importantes et qui, à chaque fois, sont restés des problèmes ouverts. C'est un hommage à sa perspicacité et la preuve que ce sont des problèmes importants ! Stephen Hawking est un sphinx qui nous a légué toutes ces énigmes, ce qui est la marque des grands scientifiques. ■

PROPOS RECUEILLIS PAR RENÉ CUILLIERIER

POUR LA SCIENCE

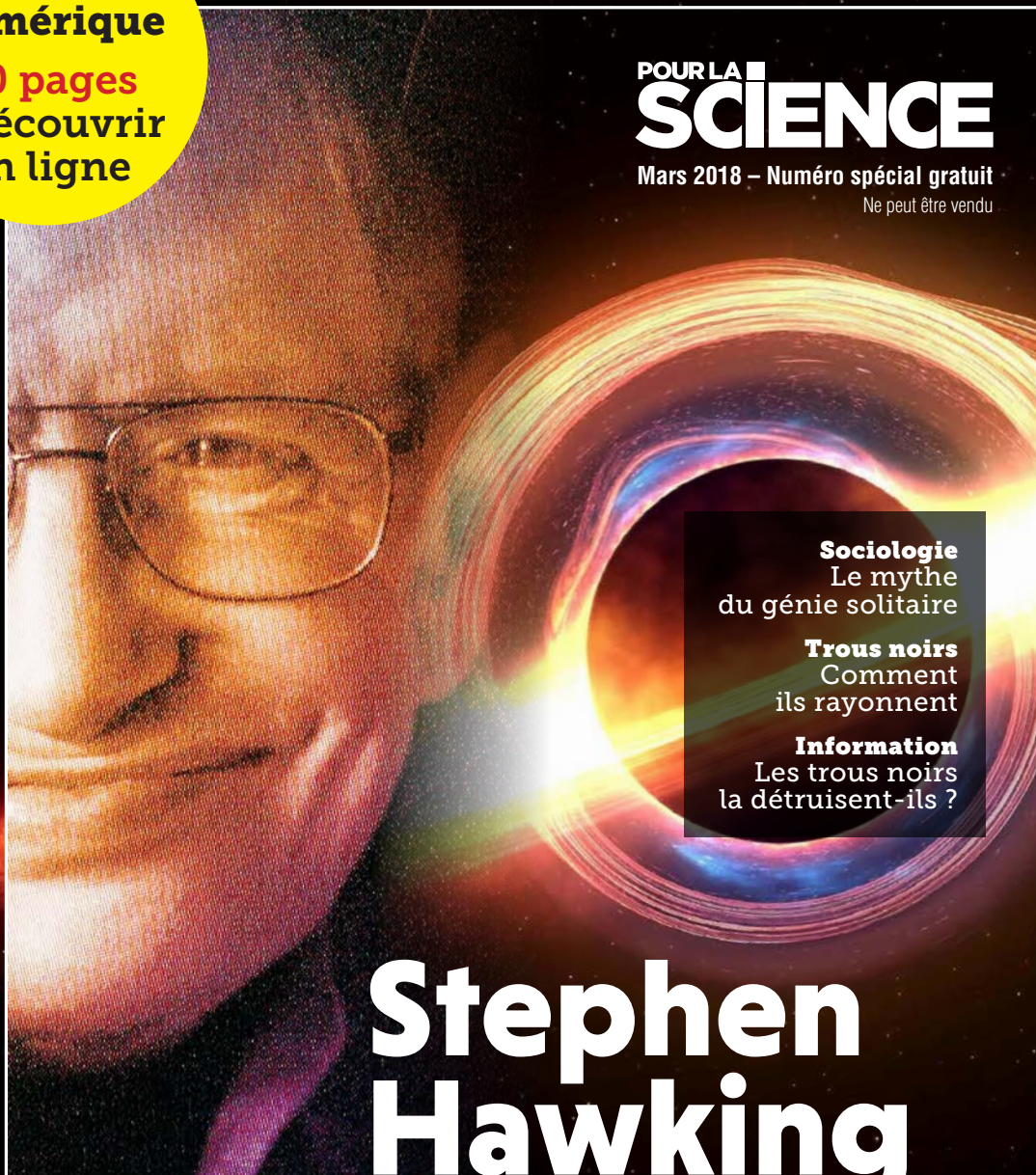
Hors-Série numérique - Mars 2018

**Hors-Série
numérique**

60 pages
à découvrir
en ligne

POUR LA
SCIENCE

Mars 2018 – Numéro spécial gratuit
Ne peut être vendu



Sociologie
Le mythe
du génie solitaire

Trous noirs
Comment
ils rayonnent

Information
Les trous noirs
la détruisent-ils ?

Stephen Hawking

FONDATEUR DE LA PHYSIQUE
DES TROUS NOIRS



Hors-série numérique à **télécharger**
gratuitement sur bit.ly/PDFHawking

A

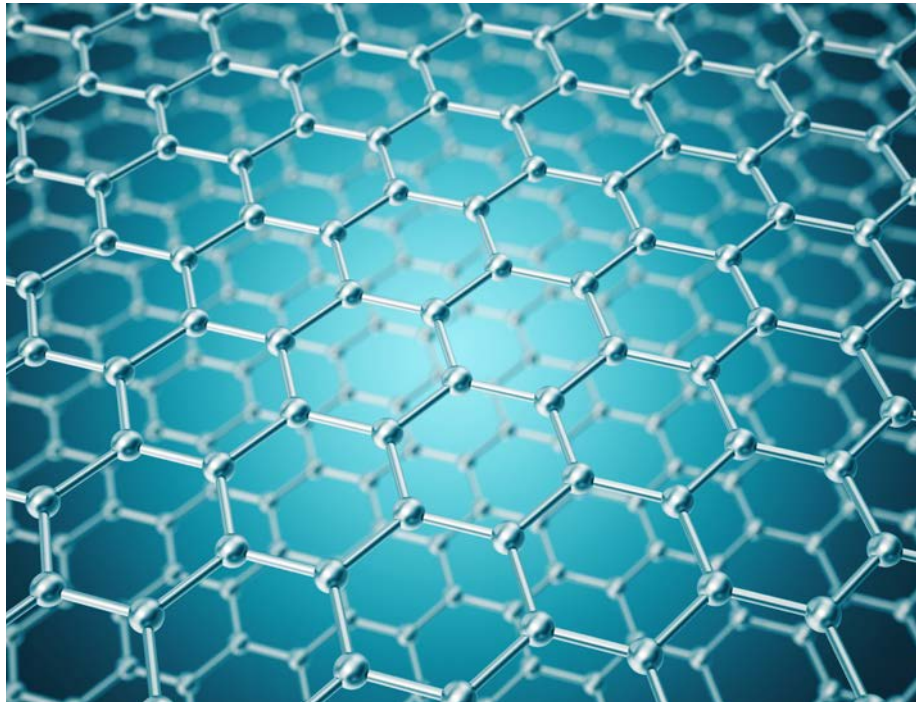
CTUALITÉS

P.14 Échos des labos
 P.26 Livres du mois
 P.28 Agenda
 P.30 Homo sapiens informaticus
 P.32 Cabinet de curiosités
 sociologiques

Une double couche
 de graphène.
 Un tel système aidera
 peut-être à comprendre
 la supraconductivité
 à haute température.

PHYSIQUE

L'ANGLE MAGIQUE DU GRAPHÈNE



En superposant à une couche de graphène une autre, tournée de 1,1 degré, on obtient un dispositif isolant, mais qui peut devenir supraconducteur à très basse température.

Découvert en 2004, le graphène n'a pas fini d'intriguer les physiciens. Sa structure, une couche unique d'atomes de carbone liés en un réseau hexagonal, lui confère des propriétés étonnantes. À la fois très bon conducteur d'électricité et de chaleur, il est aussi presque transparent et mécaniquement très résistant. Yuan Cao, du MIT (institut de technologie du Massachusetts), et ses collègues ont découvert de nouvelles propriétés électroniques du graphène lorsqu'ils en superposent deux couches tournées d'un angle relatif de 1,1°.

Pourquoi une configuration aussi particulière? Les calculs, dans le cadre de la théorie des bandes électroniques, prévoyaient des propriétés particulières pour cette double couche de graphène, que Yuan Cao et ses collègues ont vérifiées expérimentalement. La théorie des bandes explique, notamment, les comportements isolants ou conducteurs des matériaux. Ces propriétés sont liées à l'énergie et à la mobilité des électrons, qui sont décrits par un objet mathématique, la fonction d'onde. Celle-ci indique où les électrons tendent à se trouver et les niveaux d'énergie qu'ils peuvent occuper. Si la structure du matériau est périodique,

les fonctions d'onde des électrons interfèrent les unes avec les autres. Une conséquence est que les niveaux d'énergie accessibles aux électrons forment alors des intervalles continus, nommés bandes, séparés par des zones interdites, les gaps.

Les électrons remplissent d'abord les bandes de plus basses énergies. Si la dernière couche contenant des électrons – la « bande de conduction » – est totalement remplie et que le gap vers la bande d'énergie supérieure est grand, les électrons ne peuvent pas acquérir assez d'énergie pour franchir le gap et devenir mobiles au sein du matériau: ce dernier est alors un isolant. Si les électrons remplissent partiellement une bande, le moindre apport d'énergie les rend mobiles, et le matériau est alors conducteur.

Dans le cas du graphène, la dernière bande est totalement remplie mais le gap est exactement nul. Il s'ensuit un comportement très original des électrons, qui se