

de se produire : l'échantillonnage n'était pas satisfaisant. C'est sans doute une des raisons pour lesquelles la communauté médicale n'a pas emboîté le pas d'emblée. Au fond, la démarche logique que l'on devrait adopter est : d'abord des tests sur l'animal, puis des essais cliniques chez l'homme en échantillons sélectionnés (essai explicatif), puis des essais chez l'homme en échantillon représentatif (essai pragmatique).

Néanmoins la recherche médicale s'est, presque toujours, limitée aux essais explicatifs. Le développement des essais pragmatiques a été lent, pour plusieurs raisons. D'abord parce que la méthode est nouvelle, donc mal connue. Ensuite parce qu'elle donne l'impression d'un manque de rigueur : absence de test statistique, recherche d'une situation aussi voisine que possible de la pratique courante, souplesse dans la définition des traitements. Bref on se rapproche de la médecine quotidienne, ce qui fait craindre un retour à l'empirisme, alors qu'il s'agit d'un essai de rationalisation de la conduite médicale.

En revanche, ici comme dans d'autres domaines, un « effet SIDA » s'est révélé bénéfique : l'essai pragmatique est apparu soudain comme une panacée. La plupart des molécules étant toxiques, on a d'abord demandé que leur évaluation tienne compte d'un bilan coût-avantage. Ensuite il a paru intolérable que des essais, souvent très longs et portant sur des milliers de malades, risquent d'aboutir à la non conclusion, à la suite d'un test statistique. Enfin c'est surtout la définition des traitements qui pose problème. En raison de leur toxicité, un grand pourcentage de malades ne les supportent pas et doivent les abandonner. En général, dans la comparaison de deux traitements A et B, ceux qui ne supportent pas A l'abandonnent au profit de B et réciproquement. La comparaison des deux groupes en ressort très affaiblie et, dans la plupart des cas, la différence est non significative.

C'est ici que l'attitude pragmatique est avantageuse : ce qui arrivera, en dehors de tout essai, dans les conditions de la pratique courante, c'est que les sujets intolérants à A recevront B, et réciproquement. On ne comparera donc pas les traitements A et B, mais les stratégies « traitement A, puis traitement B si intolérance au traitement A » et « traitement B, puis traitement A si intolérance au traitement B » ; autrement dit,

on cherchera s'il faut d'abord administrer A, puis B, ou B, puis A. Remis en selle par le SIDA, les essais pragmatiques sont revenus à l'ordre du jour, et nul doute qu'ils ne se répandront.

Il serait utile que la distinction soit perçue dans de nombreux domaines de recherche. En agronomie, par exemple, un chercheur voulut un jour comparer deux races A et B de haricots. Il constitua des parcelles de haricots A et des parcelles de haricots B. Les premiers poussaient tout en hauteur, les seconds formaient des boules s'étendant en largeur et se gênant dans leur croissance. L'agronome avait utilisé le même nombre de graines par mètre carré. Pourquoi ? Parce que, pour comparer l'effet d'un facteur, il devait, pensait-il, constituer deux groupes comparables pour tous les autres facteurs. Que vient faire ici ce souci d'égalisation ? Le problème était de nature pragmatique. Il n'était pas de tester l'hypothèse, tout à fait invraisemblable, d'égalité des deux races, mais de choisir la meilleure. Il fallait donc donner à chacune ses chances optimales.

Les modèles

Qu'est-ce qu'un modèle ? Cette question, éludée au début de l'article, avait été reportée avec l'idée que la réponse se concevrait mieux à la lumière de quelques exemples. Nous avons annoncé qu'il y avait, dans l'utilisation du mot, différences et points communs. Les différences sont évidentes : entre le modèle de conception, l'insémination artificielle et la théorie des signaux, elle saute aux yeux.

Cette différence existe d'ailleurs dans l'utilisation du mot en langage courant : on parle des petites filles modèles, du fusil modèle 1936, d'Harpagon comme modèle de l'avare, de la personne qui pose pour les artistes. Dans le domaine scientifique, on justifie cette diversité en instituant des catégories : il y a les modèles dialectiques, parmi lesquels figurent les modèles mathématiques, et les modèles physiques (comme le pendule, modèle du mouvement périodique) ou biologiques (comme la souris, modèle de l'homme pour l'étude d'un médicament).

D'autres parlent de modèles abstraits et concrets, mais la question reste le pourquoi de l'utilisation d'un même mot. Une définition courante du modèle est « instrument d'étude de la réalité », mais cette définition manque

de spécificité : ne s'applique-t-elle pas à un microscope, voire à un crayon ? Suzanne Bachelard dit plutôt « instrument d'intelligibilité ». Il faudrait ajouter « ou d'aide à la décision ». Même imparfaites, ces définitions mettent l'accent sur ce but commun des divers modèles, concrets comme abstraits. Ce but ressort clairement des exemples que nous avons présentés.

Nous avons dû faire un choix : ainsi nous avons ignoré les modèles à compartiments, qui décrivent la circulation d'éléments entre des départements qui communiquent, par exemple les échanges d'hormones entre divers organes. De tels modèles font l'objet de nombreuses études, mais ils n'auraient rien ajouté à notre propos. Nous avons préféré retenir quelques modèles très différents et que nous avons nous-mêmes utilisés.

Certains pourront paraître s'écarter de la notion stricte de modèle. Le modèle probabiliste, par exemple, est-il vraiment un modèle ? Il en crée en tous cas plusieurs. Ainsi l'essai thérapeutique avec le tirage au sort des patients, son protocole précis, un médicament administré à l'aveugle, n'est-il pas typiquement un modèle construit pour prouver la causalité ? Où s'arrête d'ailleurs la frontière des modèles ? Selon Boltzmann, l'hypothèse, la théorie, la science elle-même sont des modèles de la réalité.

Daniel SCHWARTZ est professeur émérite à la Faculté de médecine de Paris Sud.

Henri LERIDON, *Les enfants du désir*, éditions Julliard, 1995.

H. Le BRAS, *Lois de mortalité et âge limite*, in *Populations*, n° 3, 1976.

G. DAVID, *L'insémination artificielle et le système CECOS*, in *L'insémination artificielle*, éditions Masson, 1991.

Ph. LAZAR, *La naissance prématurée*, in *L'anthropologie*, tome 90, n° 3, 1986.

G. BOUVENOT, E. ESCHWÈGE et D. SCHWARTZ, *Le médicament*, éditions de l'INSERM et Nathan, 1993.

J. M. LEGAY, *La méthode des modèles, état actuel de la méthode expérimentale*, éditions Informatique et biosphère.

D. SCHWARTZ, *Le jeu de la science et du hasard*, éditions Flammarion, 1994.

D. SCHWARTZ et J. LELLOUCH, *Exploratory and Pragmatic Attitudes in Clinical Trials*, in *J. of Chronic Diseases*, vol. 20, 1967.

La nature de l'espace et du temps

STEPHEN HAWKING • ROGER PENROSE

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

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.

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 gravitationnelles 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.

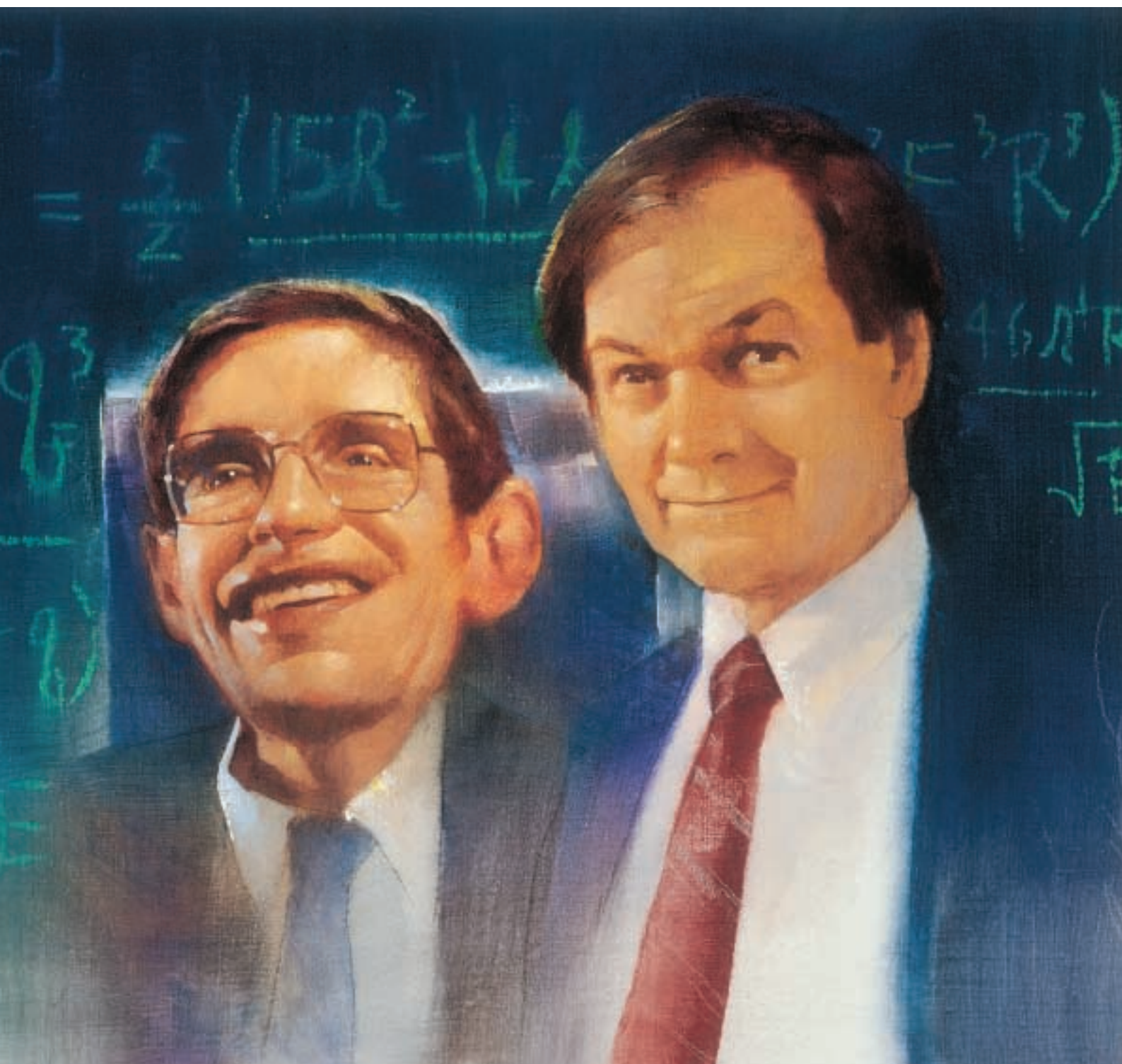
Les physiciens divergent, enfin, dans leur interprétation de la mécanique quantique. S. Hawking croit que toute théorie doit simplement fournir des prédictions qui s'accordent aux données expérimentales. R. Penrose pense qu'une simple comparaison des prédictions et des expériences ne suffit pas à expliquer 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.

© 1996 Princeton University Press

© Éditions Gallimard, pour la traduction française établie par Françoise Balibar, à paraître dans la collection NRF Essais/Gallimard

Stephen Hawking, à propos des trous noirs quantiques

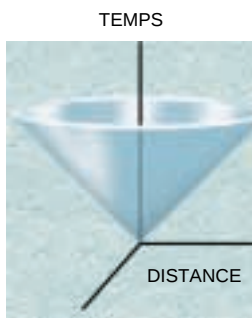
La théorie quantique des trous noirs [...] semble introduire une nouveau degré d'imprévisibilité en physique, au-dessus et par-delà l'incertitude habituellement associée à la mécanique quantique. Les trous noirs semblent avoir une entropie intrinsèque et perdre de l'information en provenance de notre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



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.

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.

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 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.

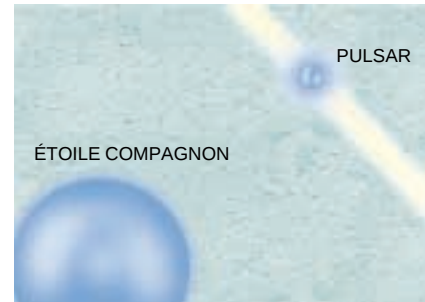
Bien qu'ayant remporté des succès remarquables, les quatre théories citées ne sont pas sans poser des problèmes. [...] La relativité générale prédit l'existence de singularités d'espace-temps. En théorie quantique, il y a le «problème de la mesure», que je décrirai plus tard. On peut admettre que la 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, 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

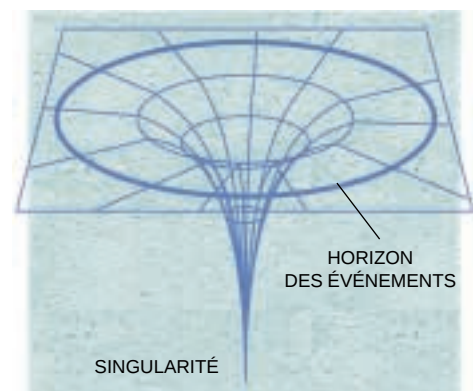
PULSARS

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.



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.

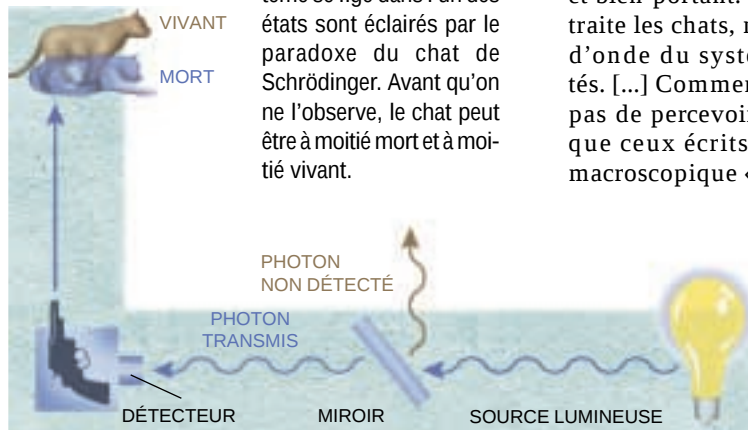


ESPACE DES PHASES

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.

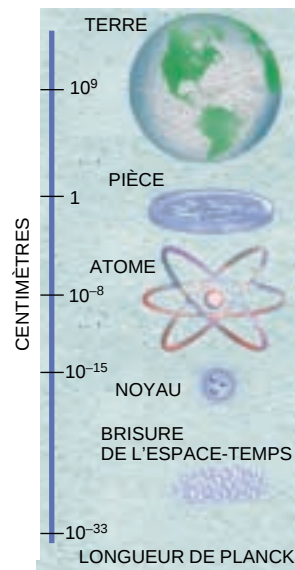
LE CHAT DE SCHRÖDINGER

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 «superposition» 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.



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.



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 positon de charge positive et de spin inverse se mouvant vers le passé.

respecte donc pas cette loi de conservation. Toutefois, dans mon modèle, cette 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 superposition 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 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 suggéré 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. [...]

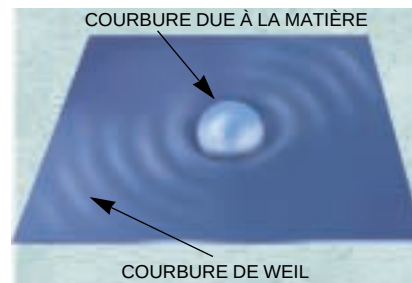
Comment les deux extrémités du temps peuvent-elles être différentes? Pourquoi les perturbations sont-elles faibles à une extrémité et pas à l'autre? La réponse est la suivante : il existe deux solutions complexes possibles des équations du champ. [...] Il est clair qu'une des solutions correspond à une 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 théo-

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.

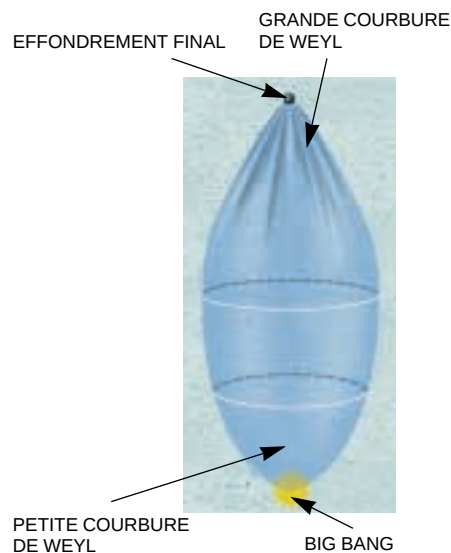


PROPOSITION «SANS FRONTIÈRE»

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.

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.



rie qui explique la structure des singularités devra violer [CPT et d'autres symétries] pour que puisse apparaître quelque chose de même nature que la 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

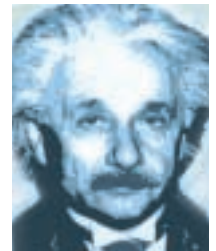
La mécanique quantique n'existe que depuis environ soixante quinze ans. C'est peu au regard, par exemple, de la théorie de la gravitation de Newton. Je ne serais donc pas étonné si la mécanique quantique devait être modifiée pour des objets très macroscopiques.

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.



NIELS BOHR



ALBERT EINSTEIN

Les éditeurs remercient de son aide Gary T. Horowitz de l'Université de Californie à Santa Barbara.
