

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, *Explanatory 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.

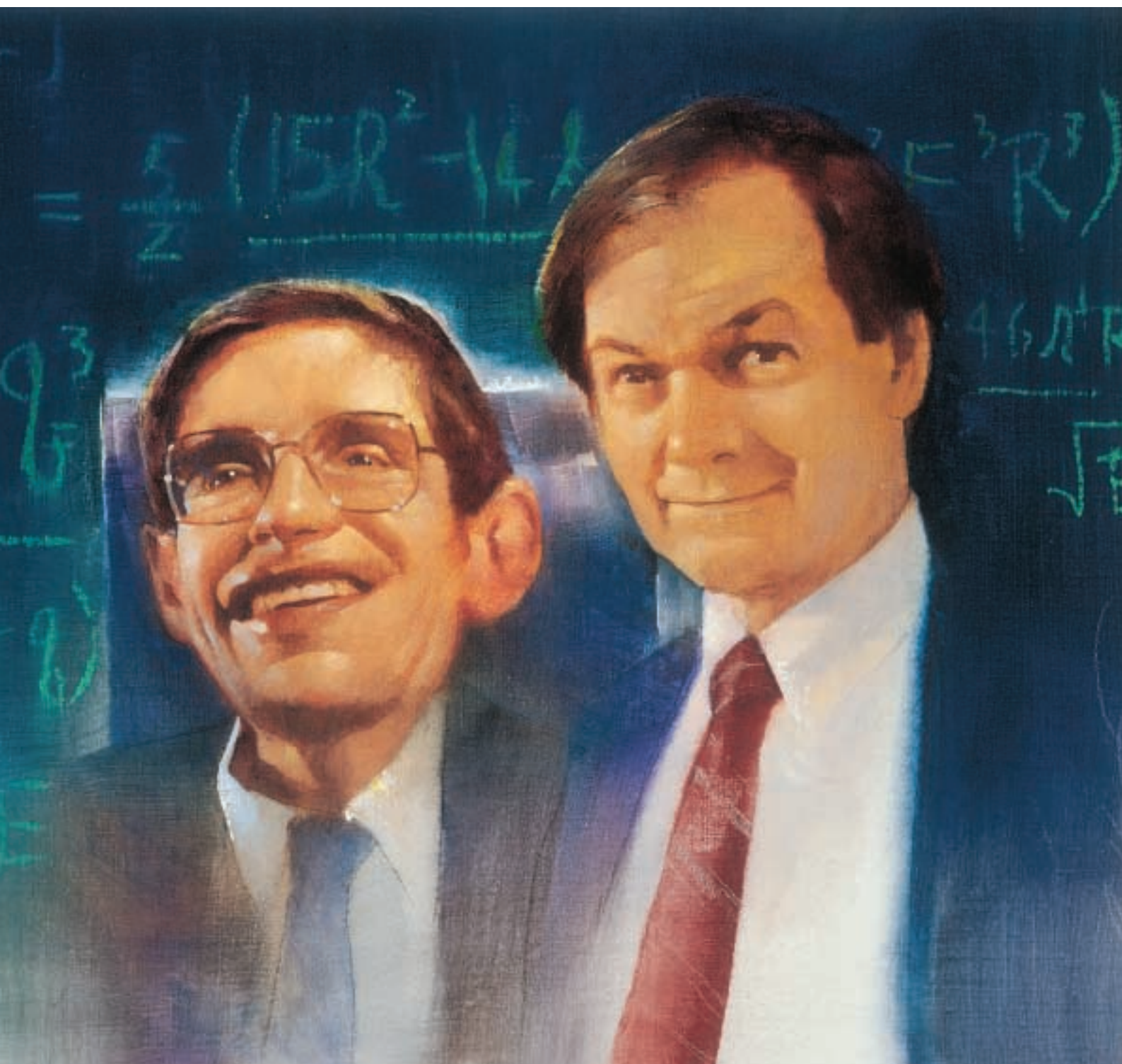
Les physiciens divergent, enfin, dans leur interprétation de la mécanique quantique. S. Hawking croit que toute théorie doit simplement fournir des prédictions qui s'accordent aux données expérimentales. R. Penrose pense qu'une simple comparaison des prédictions et des expériences ne suffit pas à expliquer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

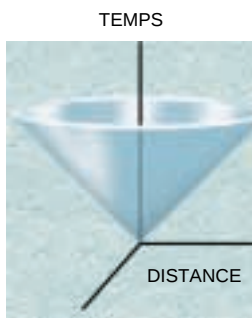
La théorie quantique des trous noirs [...] semble introduire un nouveau degré d'imprévisibilité en physique, au-dessus et par-delà l'incertitude habituellement associée à la mécanique quantique. Les trous noirs semblent avoir une entropie intrinsèque et perdre de l'information en provenance de notre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