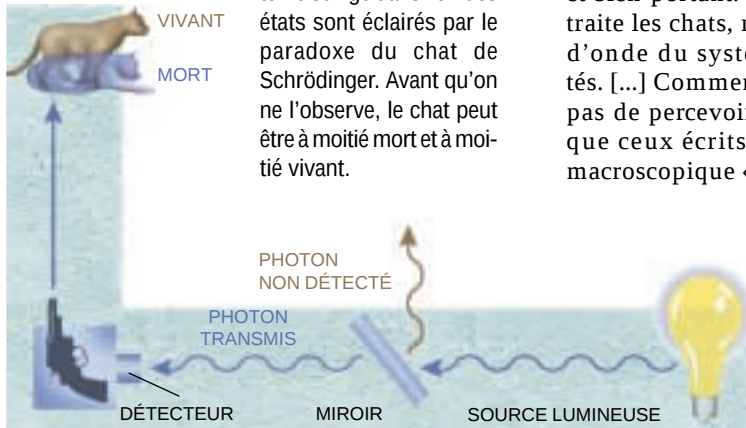


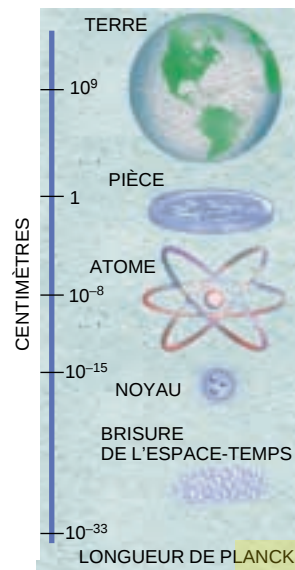
LE CHAT DE SCHRÖDINGER

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'espaces-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. [...]

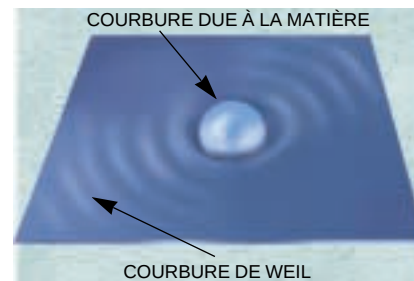
Comment les deux extrémités du temps peuvent-elles être différentes ? Pourquoi les perturbations sont-elles faibles à une extrémité et pas à l'autre ? La réponse est la suivante : il existe deux solutions complexes possibles des équations du champ. [...] Il est clair qu'une des solutions correspond à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

