

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 a 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

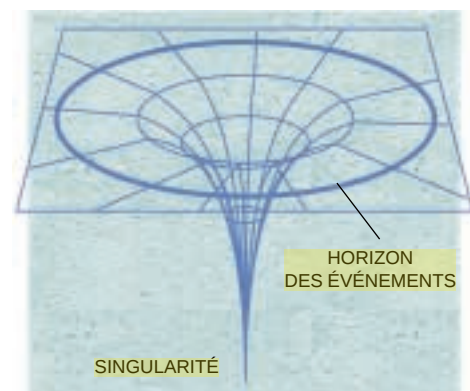
PULSARS

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.

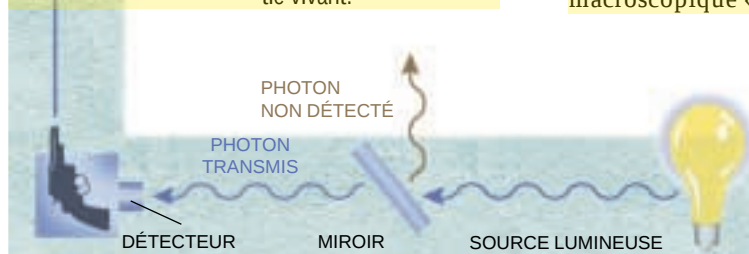


ESPACE DES PHASES

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.

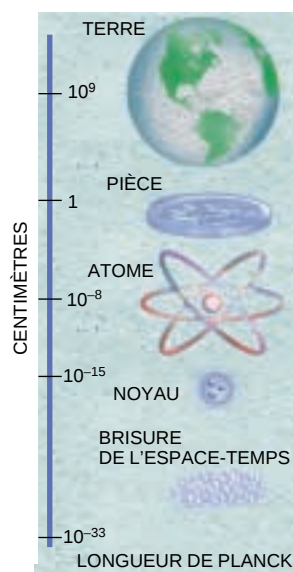
LE CHAT DE SCHRÖDINGER

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.