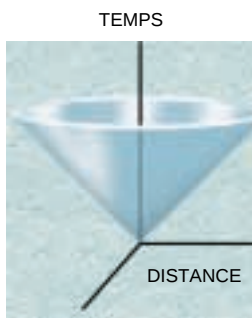


PRESSION DE DÉGÉNÉRESCENCE

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.

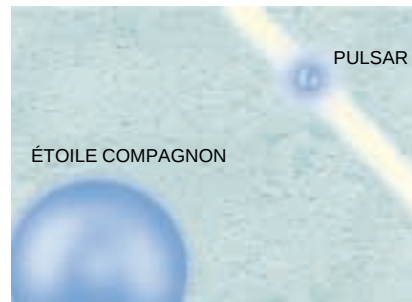
Bien qu'ayant remporté des succès remarquables, les quatre théories citées ne sont pas sans poser des problèmes. [...] La relativité générale prédit l'existence de singularités d'espace-temps. En théorie quantique, il y a le «problème de la mesure», que je décrirai plus tard. On peut admettre que la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

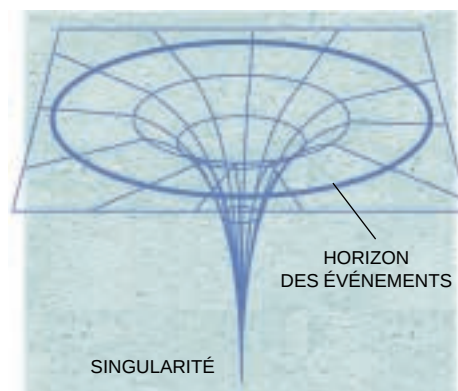
PULSARS

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.