

particulier. En revanche, plus près de la singularité, le champ gravitationnel s'intensifie rapidement au point que des forces de marées finiront par étirer et déchiqueter le corps de l'astronaute.

Pour en revenir à l'aspect anodin de l'horizon des événements, les physiciens aiment souligner que le Système solaire tout entier pourrait tomber en ce moment même dans un trou noir géant sans que nous ne ressentions rien qui sorte de l'ordinaire.

En 1974, Stephen Hawking chamboula la vision classique des trous noirs en considérant certaines prévisions de la physique quantique qu'il appliqua au voisinage de l'horizon des trous noirs. Selon cette théorie, partout dans l'Univers et en permanence, des paires constituées d'une particule et de son homologue d'antimatière se forment spontanément pour disparaître aussitôt. Si de telles fluctuations se produisent juste à l'extérieur de l'horizon du trou noir, Stephen

Hawking a montré que la paire pouvait être séparée. L'une des particules tombe alors dans le trou noir, tandis que l'autre s'échappe. Un observateur situé loin du trou noir ne voit que les particules qui s'échappent ; l'astre semble émettre des particules, donc perdre de sa masse. À terme, le trou noir tout entier se viderait de sa substance par cette « évaporation ».

Les trous noirs s'évaporent

Pour les trous noirs observés par les astrophysiciens, l'évaporation n'est pas un problème, car ces astres acquièrent de la masse sous forme de gaz et de poussière beaucoup plus rapidement qu'ils n'en perdent par le rayonnement de Hawking (voir la figure page 89). Mais à des fins théoriques, on peut étudier ce qui se passerait si un trou noir était complètement isolé et si nous avions

assez de temps pour assister au processus d'évaporation. En se livrant à une telle expérience de pensée, Stephen Hawking a découvert deux contradictions entre la relativité générale et la physique quantique.

Le premier conflit concerne la température du trou noir. Le spectre lumineux du rayonnement de Hawking pour un trou noir isolé est identique à celui émis par un objet chauffé (le rayonnement dit de corps noir). Il s'ensuit que l'on peut attribuer une température au trou noir. Comme la température d'un objet résulte de l'agitation de ses composants microscopiques, on en déduit qu'un trou noir aurait une structure microscopique constituée d'éléments discrets (non continus).

En 1972, le physicien Jacob Bekenstein, maintenant à l'université hébraïque de Jérusalem, était déjà arrivé à cette conclusion en se livrant à des expériences de pensée consistant à jeter des objets

Le paradoxe de l'information

Selon les principes de la physique quantique, l'information ne peut pas être détruite. Cependant, cela pourrait être le cas dans un trou noir. Cet objet s'évapore par rayonnement de Hawking, mais les propriétés des particules qui s'échappent n'ont aucun lien avec l'information portée par la matière qui est tombée dans le trou noir. L'information est donc perdue. Stephen Hawking suggérait qu'il faudrait modifier la mécanique quantique afin d'autoriser une telle perte d'information.

DES PISTES EN THÉORIE DES CORDES

Les premières avancées...

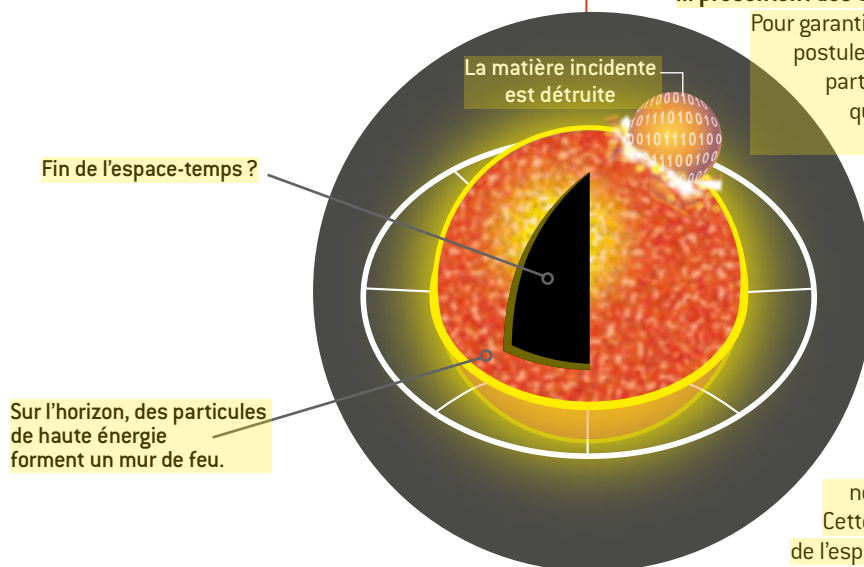
Pour résoudre ces énigmes, les physiciens ont tenté d'unifier la relativité générale et la physique quantique en une théorie cohérente qui parviendrait à décrire les trous noirs. Une piste, la théorie des cordes, postule que les particules sont de minuscules cordes vibrantes. Cette théorie semblait résoudre certains aspects du paradoxe de l'information et du problème de l'entropie.

... présentent des difficultés...

Pour garantir la conservation de l'information, il faut postuler un lien quantique, l'intrication, entre les particules de chaque paire virtuelle, ainsi qu'avec le rayonnement de Hawking. Or la mécanique quantique interdit qu'une particule soit intriquée avec deux systèmes différents, ce que sont pourtant sa partenaire de la paire et le rayonnement de Hawking.

... qui ont conduit aux murs de feu

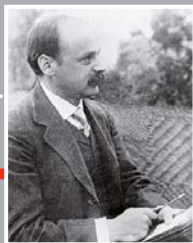
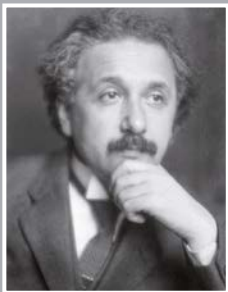
Pour résoudre ce problème, on peut supposer que l'intrication de la paire virtuelle est brisée. Il s'ensuit une libération de particules de haute énergie au niveau de l'horizon du trou noir, ce qui forme un mur de feu. Cette frontière pourrait marquer la fin de l'espace-temps.



Du trou noir...

1915

Albert Einstein élabore la théorie de la relativité générale.



1916

Karl Schwarzschild trouve la première solution exacte des équations d'Einstein, préfigurant ce que l'on nommera un trou noir.

1971

On identifie pour la première fois un trou noir, dans le système binaire Cygnus X-1.



dans un trou noir. À partir de ces idées, il détermina, avec Stephen Hawking, une formule donnant l'entropie d'un trou noir, liée au nombre d'éléments qu'il contient. L'entropie est une mesure du désordre, qui augmente avec le nombre d'états ou configurations microscopiques que le système peut avoir. Plus le trou noir contient d'éléments, plus il y a de configurations possibles, et plus l'entropie est grande. Selon la formule trouvée par les deux physiciens, l'entropie d'un trou noir est proportionnelle à l'aire de l'horizon des événements.

Cette température du trou noir et l'existence d'éléments discrets sont en contradiction avec la relativité générale, qui stipule que les trous noirs ont une géométrie lisse et sans structure. Dans la théorie d'Einstein, ces astres sont caractérisés uniquement par leur masse, leur moment cinétique (leur rotation) et leur charge électrique: pour reprendre l'image de John Wheeler, physicien à l'université de Princeton, «les trous noirs n'ont pas de cheveux». En considérant les effets de la physique quantique à proximité de l'horizon du trou noir, ce dernier acquiert des «cheveux».

Le rayonnement de Hawking défie aussi les principes de la physique quantique. Selon les calculs de Stephen Hawking, les propriétés des particules qui s'échappent d'un trou noir ne dépendent pas des caractéristiques de la matière qui lui a donné naissance (en général une étoile massive qui s'est effondrée). Cela signifie que toute l'information que contenait la matière avant la formation du trou noir est définitivement perdue. Par

exemple, si nous envoyons dans le trou noir une lettre comportant un message, il n'y a aucun moyen de reconstituer ce dernier à partir des particules qui finissent par émerger du trou noir. Une fois que le message a franchi l'horizon, son information est piégée à l'intérieur du trou noir et n'a aucune incidence sur le rayonnement qui est émis par l'astre. Plus grave, comme le trou noir finit par s'évaporer complètement, l'information disparaît totalement.

Or, en physique quantique, la perte d'information est interdite. Tout système est décrit par un objet mathématique, la fonction d'onde, qui spécifie l'état du système. Cette fonction peut se transformer, mais il est toujours possible de retrouver

La perte d'information est interdite dans le cadre de la physique quantique, mais semble se produire dans les trous noirs.

les conditions initiales, car l'information est conservée. Dans l'expérience de pensée de Stephen Hawking, la perte d'information signifie que nous n'avons aucun moyen de prédire la fonction d'onde du rayonnement de Hawking à partir des propriétés de la matière que le trou noir a engloutie. Stephen Hawking en a conclu que les lois de la physique quantique devaient être modifiées pour autoriser la perte d'information dans les trous noirs.

Le problème est bien plus fondamental qu'il n'y paraît. Comparons cette situation avec ce qui se produit si nous brûlons le message. En pratique, nous ne savons pas

le reconstituer et le message est perdu, mais pas du point de vue de la physique quantique. Comme le processus de combustion est décrit par la physique quantique, la fonction d'onde de la fumée dépend du message de départ. En théorie donc, si nous étions capables de collecter toute l'information quantique de la fumée, nous pourrions reconstituer le message. Pour les trous noirs, la fonction d'onde du rayonnement de Hawking n'a aucun lien avec le message entrant, la perte d'information est définitive.

Certains physiciens ont argumenté que, si Stephen Hawking a raison et que l'information peut être détruite, alors cela devrait se produire non seulement dans la situation exotique de l'évaporation du trou noir, mais partout et tout le temps car, en physique quantique, tout ce qui n'est pas interdit arrive. Nous en verrions les signes dans la physique du quotidien, y compris probablement des violations importantes de la loi de conservation de l'énergie. L'argument de Stephen Hawking résiste pourtant à ces objections en soulignant le rôle essentiel de l'horizon des événements, spécifique aux trous noirs et absent dans le cas de la combustion du papier.

Il semble ainsi que nous soyons confrontés à un dilemme pour résoudre ce conflit. Il faut soit modifier la physique quantique pour autoriser une perte d'information, soit modifier la relativité générale pour permettre à l'information de s'échapper de l'intérieur d'un trou noir.

Une autre piste serait que le trou noir ne s'évapore pas complètement, mais