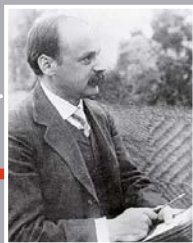
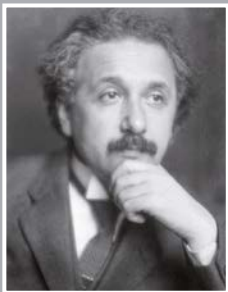


Du trou noir ...

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.

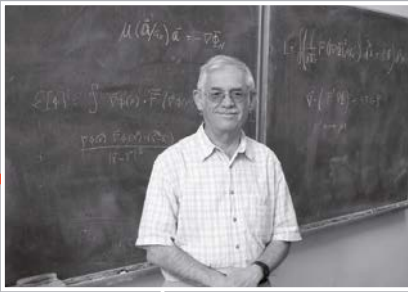
Le problème est bien plus fondamental qu'il n'y paraît. Comparons cette situation avec ce qui se produit si nous brûlons le message. En pratique, nous ne savons pas

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



1972

Jacob Bekenstein développe le concept d'entropie d'un trou noir.



1974

Le théoricien Stephen Hawking découvre l'évaporation d'un trou noir.

1976

D'après Stephen Hawking, l'information qui entre dans un trou noir est définitivement perdue.

qu'il en reste un vestige microscopique contenant toute l'information de l'étoile à partir de laquelle il s'est créé. Mais cette « solution » présente ses propres difficultés. Un objet aussi petit contenant autant d'information n'est pas compatible avec la formule de l'entropie énoncée par Jacob Bekenstein et Stephen Hawking.

Une voie alternative est celle de la théorie des cordes. Des physiciens l'ont élaborée pour concilier la relativité générale et la physique quantique et obtenir une théorie quantique de la gravitation. Dans ce cadre, les particules élémentaires ponctuelles du modèle standard sont remplacées par de microscopiques cordes vibrantes. Cette approche parvient à éliminer certaines des difficultés mathématiques qui surgissent quand on tente de combiner la physique quantique et la relativité générale. Aucune confirmation expérimentale ne permet aujourd'hui de la valider, mais la théorie des cordes a été très fructueuse pour traiter les divers problèmes rencontrés sur l'horizon des trous noirs.

Calculer l'entropie avec des cordes

En 1995, je travaillais sur une expérience de pensée avec des cordes dans des espaces confinés. En poursuivant des travaux réalisés quelques années plus tôt avec des collègues, j'ai montré que la théorie des cordes telle que nous la comprenions alors n'était pas complète. Elle imposait en fait l'existence d'autres objets que les cordes unidimensionnelles : des objets nommés D-branes ayant plusieurs dimensions, voire

plus que les trois d'espace et celle de temps qui nous sont familières. La théorie des cordes, elle-même, nécessite de supposer que l'Univers comporte 9 ou 10 dimensions d'espace. Les dimensions supplémentaires sont enroulées sur elles-mêmes de sorte qu'elles échappent à nos sens (de façon similaire, un câble électrique semble unidimensionnel de loin, son épaisseur n'étant perceptible que si l'on s'en approche). Les D-branes seraient enroulées dans ces dimensions supplémentaires. L'année suivante, Andrew Strominger et Cumrun Vafa, tous deux aujourd'hui à l'université Harvard, ont montré que les cordes et les D-branes fournissent le nombre précis de briques



CE TROU NOIR SUPERMASSIF (vue d'artiste) absorbe de la matière, contrairement au trou noir théorique considéré par les physiciens qui étudient le mur de feu. Ici, un disque d'accrétion s'est formé autour du trou noir ; la matière qu'il contient s'échauffe par frottement et rayonne.

© NASA/JPL-Caltech