

■ L'AUTEUR



Joseph POLCHINSKI est professeur de physique à l'université de Californie à Santa Barbara, et membre permanent de l'institut Kavli de physique théorique.

comme ce fut aussi le cas pour le résultat de Stephen Hawking, aucune alternative satisfaisante n'a encore émergé. En supposant que la physique quantique est correcte, le mur de feu en est une conséquence directe, bien que son existence soulève d'autres difficultés théoriques. Il semble que les physiciens doivent abandonner l'une de leurs théories fétiches, mais nous ne savons pas encore laquelle. Nous espérons cependant qu'une compréhension plus profonde de la physique quantique et de la relativité naîtra de cette confusion et, avec de la chance, qu'un moyen de résoudre les contradictions apparentes entre ces deux théories reines de la physique émergera.

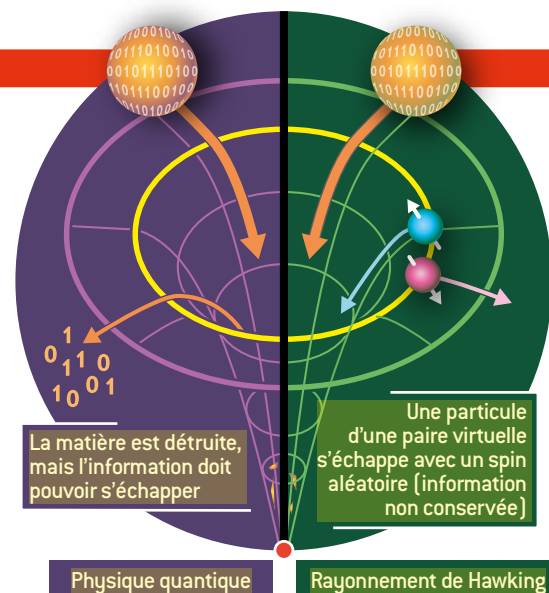
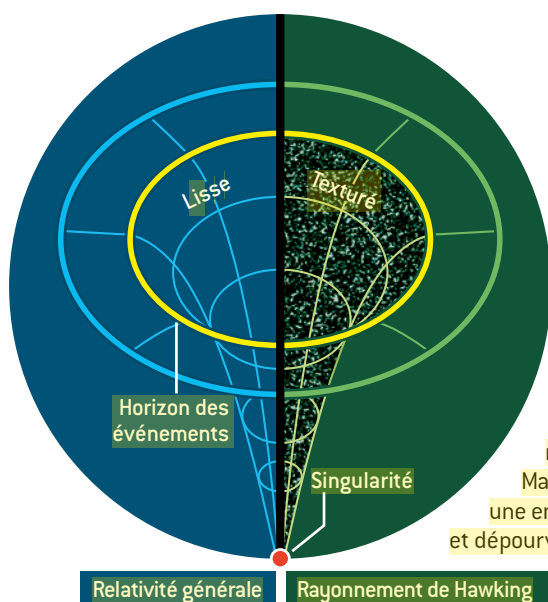
Pour bien comprendre le problème, il faut partir de la notion de trou noir. Cet objet est une prévision de la relativité générale, la théorie de la gravitation. Dans ce cadre, la matière, ou plus généralement l'énergie, déforme l'espace-temps. Pour le

cas le plus extrême, celui du trou noir, si la masse présente est suffisamment importante, la force gravitationnelle entraîne son effondrement en un point, nommé singularité du trou noir. À cet endroit, certaines quantités décrivant le champ gravitationnel deviennent infinies.

Autour de cette singularité, on définit l'horizon des événements comme la limite où le champ gravitationnel est si fort que même une particule se déplaçant à la vitesse de la lumière ne peut en sortir. Un voyageur spatial qui franchirait cette frontière serait alors dans l'impossibilité d'échapper à l'attraction gravitationnelle du trou noir. Cependant, pour un trou noir très massif, l'augmentation du champ gravitationnel est si progressive au niveau de l'horizon que l'astronaute ne se douterait de rien en le traversant. En vertu du principe d'équivalence de la relativité générale, l'horizon des événements est une région sans caractère

LES ÉNIGMES DE L'HORIZON DES TROUS NOIRS

EN 1974, STEPHEN HAWKING a montré de façon théorique qu'un trou noir émet un faible rayonnement. D'après la physique quantique, partout dans l'Univers et en permanence, des paires particule-antiparticule surgissent du vide et s'annihilent aussitôt ou presque. Stephen Hawking a remarqué que, si une telle « paire virtuelle » émerge du vide près de l'horizon d'un trou noir, l'une des deux particules tombe dans l'astre tandis que l'autre s'échappe, constituant le « rayonnement de Hawking ». Ce phénomène conduit à des difficultés portant sur les liens entre la relativité générale et la physique quantique.



Le problème de l'entropie

Le spectre du rayonnement de Hawking suggère que l'on peut attribuer une température à tout trou noir. En principe, la température d'un objet est liée aux mouvements de ses atomes. L'existence d'une température pour un trou noir implique que ce dernier a une sous-structure, des sortes d'éléments constitutants internes. Ceux-ci peuvent s'organiser selon diverses configurations équivalentes, ce qui confère au trou noir une « entropie », une mesure du désordre reflété par le nombre de combinaisons possibles. Mais la théorie de la relativité générale interdit aux trous noirs d'avoir une entropie : d'après cette théorie, un trou noir est entièrement lisse et dépourvu de structure interne.

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.

