

> devient celui d'un trou blanc. C'est la physique quantique qui permet cette transformation grâce à l'effet tunnel. Ce phénomène correspond à une brève violation des équations classiques de la physique (ici, celles de la relativité générale). Connu depuis les années 1920, l'effet tunnel permet d'expliquer, par exemple, la radioactivité alpha. Dans le noyau atomique, la particule alpha (deux protons et deux neutrons liés) ne peut *a priori* pas s'échapper du fait du potentiel nucléaire dû aux interactions forte et électromagnétique exercées par le noyau. Mais grâce à l'effet tunnel, elle peut « passer sous le mur du potentiel » et s'extraire du noyau.

En 2018, grâce à des calculs quantiques détaillés, Marios Christodoulou, Fabio D'Ambrosio, Simone Speziale et moi, à Marseille, en collaboration avec Ilya Vilensky, de l'université de Floride atlantique, Eugenio Bianchi, à l'université d'État de Pennsylvanie, et Hal Haggard ont montré que la transition du trou noir au trou blanc par effet tunnel est possible dans le cadre de la gravité quantique à boucles. En même temps, Abhay Ashtekar, de l'université d'État de Pennsylvanie, Xavier Olmedo et Parampreet Singh, de l'université

d'État de Louisiane, ont montré que la transition de trou noir à trou blanc est possible au plus près du centre du trou noir. En combinant ces deux résultats avec la solution des équations d'Einstein en dehors de la région où les effets quantiques sur l'espace-temps sont importants, on obtient une description complète de ce qui peut arriver à un trou noir : la conclusion est qu'il meurt et se transforme en trou blanc.

AU BOUT DU TUNNEL, UN TROU BLANC !

Un phénomène qui dépend de l'effet tunnel prend du temps à se réaliser, car la probabilité d'occurrence est très faible. Certains éléments radioactifs, en principe instables, ont ainsi des durées de vie qui dépassent des milliers d'années. De la même façon, les trous noirs ne deviennent pas des trous blancs immédiatement. Ils ont une durée de vie très grande, et d'autant plus grande que le trou noir a une masse élevée. En effet, l'effet tunnel étant un phénomène quantique, il a plus de chance de se produire sur de petites échelles, donc sur de petits trous noirs.

Si les trous noirs étaient décrits uniquement par les lois classiques, ils seraient

L'INFORMATION EST-ELLE CONSERVÉE PAR UN TROU NOIR ?

L'existence des trous noirs a été une confirmation éclatante de la théorie de la relativité générale, mais ces corps posent un problème quand on s'intéresse à la conservation de l'information. Un objet contient de l'information, et lorsqu'il tombe dans un trou noir, il est perdu, *a priori*, à jamais pour le reste de l'Univers car il ne peut pas ressortir du trou noir. La seule façon d'accéder à cette information est de se jeter aussi dans le trou noir, mais il sera alors impossible de renvoyer l'information vers le reste de l'Univers. Dès lors, les trous noirs semblent être des régions du cosmos où l'information se perd : elle n'est pas conservée. Mais est-ce vraiment le cas ? Les physiciens ont longtemps

débatu de cette question. Le scénario du trou blanc comme destin du trou noir offre une solution simple, puisque tout ce qui tombe dans le trou noir finit par ressortir une fois que celui-ci s'est transformé en trou blanc.

Cette solution est cependant confrontée à un argument qui mérite d'être analysé plus en détail. Dans les années 1970, Jacob Bekenstein et Stephen Hawking ont montré qu'un trou noir a une entropie proportionnelle à l'aire de son horizon. Cette entropie permet de définir la température du trou noir et implique que celui-ci rayonne, comme tout corps chaud. Or, d'après les travaux de Boltzmann, l'entropie est aussi une mesure de l'information. L'aire d'un trou noir pourrait donc indiquer une quantité maximale d'information qu'il peut stocker. Certains physiciens ont pris au sérieux cette relation entre aire et quantité maximale d'information, et en ont fait un principe absolu, nommé principe holographique. Or, quand le trou noir s'évapore, son aire diminue. Et dès qu'il a perdu environ la moitié de sa masse par évaporation, son horizon

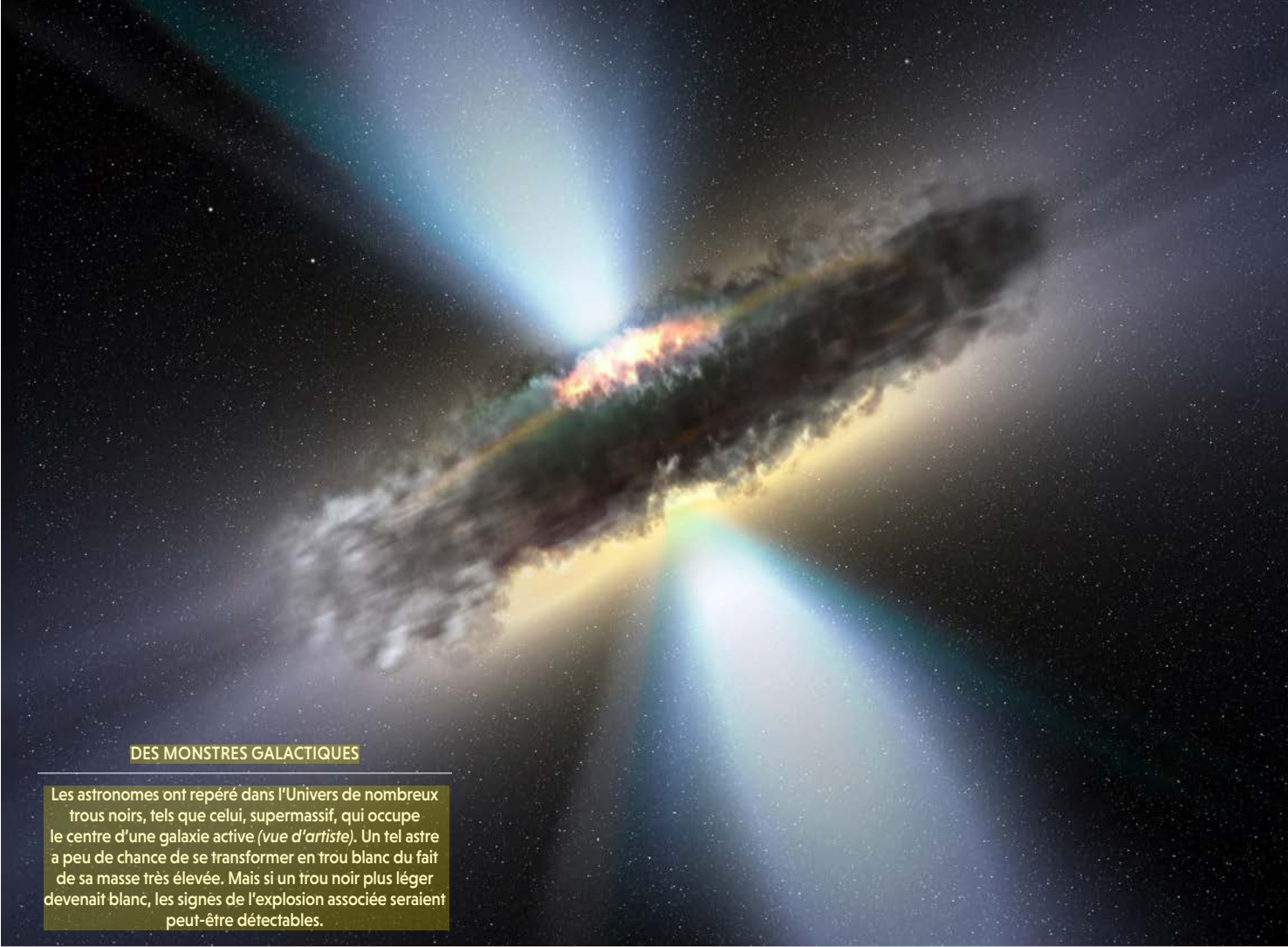


Lorsque de la matière tombe dans un trou noir, c'est de l'information qui semble perdue pour le reste de l'Univers. Pas nécessairement...

est trop petit pour conserver l'information présente à l'intérieur. Il y aurait alors nécessairement une perte d'information.

Mais il y a peut-être une erreur dans ce raisonnement, qui confond deux notions distinctes d'entropie : celle qui mesure l'information accessible par l'extérieur avant la transition quantique en trou blanc (information qui détermine le comportement thermodynamique du trou noir) et celle qui mesure la totalité de l'information interne. La première est donnée par l'entropie de Bekenstein et Hawking et diminue avec l'évaporation. La seconde reste grande.

L'information mesurée par l'entropie de Bekenstein et Hawking n'est pas l'information qui est entrée dans le trou noir, mais seulement l'information qui reste accessible sur sa surface. Alors que le trou noir est créé, la matière à l'intérieur continue de s'effondrer et l'espace s'étire en un long « tube ». Le volume de ce tube augmente, alors même que le rayonnement de Hawking tend à diminuer la surface de l'horizon. Le volume interne du trou noir peut conserver l'information, qui sera intégralement restituée dans l'Univers quand le trou noir deviendra blanc.



DES MONSTRES GALACTIQUES

Les astronomes ont repéré dans l'Univers de nombreux trous noirs, tels que celui, supermassif, qui occupe le centre d'une galaxie active (*vue d'artiste*). Un tel astre a peu de chance de se transformer en trou blanc du fait de sa masse très élevée. Mais si un trou noir plus léger devenait blanc, les signes de l'explosion associée seraient peut-être détectables.

éternels. Mais rien n'est éternel. Comme nous l'avons déjà évoqué, Stephen Hawking, a montré en 1974 que les trous noirs émettent un faible rayonnement. Pour un observateur lointain, le trou noir perd de la masse: il s'évapore (*voir l'encadré page 28*).

Plus le trou noir diminue de taille grâce à ce processus d'évaporation, plus la probabilité qu'il réalise la transition vers un trou blanc par effet tunnel augmente. À un certain point, cela se produit et l'espace-temps lui-même opère sa transformation par effet tunnel et sa géométrie change. Au lieu de continuer à se comporter comme le voudraient les équations de la relativité générale classique, le trou noir subit la transition et devient un trou blanc. Après, sous cette forme, il recommence à suivre les équations de la relativité générale classique.

UN PARADOXE TOUT RELATIF

Il y a un aspect *a priori* incohérent entre les deux descriptions que j'ai données de la naissance du trou blanc. D'un côté, la transition par effet tunnel prend du temps, et effectivement nous voyons dans le cosmos des trous noirs qui sont âgés de millions d'années, et probablement beaucoup plus pour certains. D'un autre côté, quand une étoile s'effondre pour former un trou noir, la matière se précipite vers le centre en moins d'une milliseconde, elle atteint

le stade de l'étoile de Planck avant de rebondir, également en moins d'une milliseconde. Dans un cas, la transformation est lente, dans l'autre elle est quasi immédiate! Comment la transformation d'un trou noir en un trou blanc peut-elle être à la fois si lente et si rapide?

Le paradoxe n'est qu'apparent, car l'ensemble est en fait bien cohérent dans le cadre de la relativité générale, où le temps est très «flexible». Un objet massif courbe l'espace-temps de telle façon qu'il ralentit (dilate) le temps. Par exemple, sur Terre, le temps s'écoule plus lentement au niveau de la mer qu'au sommet des montagnes. L'effet est infime sur la planète bleue, mais il devient beaucoup plus marqué près d'un trou noir. Un intervalle de temps très court à l'intérieur du trou noir est perçu comme très long pour quelqu'un en dehors. Le rebond qui se produit en quelques millisecondes est vu de l'extérieur comme au ralenti. Les trous noirs que nous observons dans le cosmos peuvent donc être des objets en train de s'effondrer et de rebondir, perçus par nous comme dans un film ralenti à l'extrême.

Ce scénario de la transformation d'un trou noir en trou blanc est intéressant à bien des égards. Il offre une vision cohérente de l'évolution des trous noirs et apporte une réponse au problème de la conservation de l'information (*voir l'encadré page ci-contre*). Il présente ➤