

> Cet espace-temps discrétisé a un effet direct sur le cœur du trou noir. Il n'est pas possible d'avoir une singularité, un volume infiniment petit où règne une densité infinie. En 2014, j'ai étudié avec Francesca Vidotto, aujourd'hui à l'université de Western Ontario, au Canada, la possibilité que la matière s'effondrant dans un trou noir forme un objet de taille minimale finie, où la densité est extrême mais reste finie: une «étoile de Planck». La gravité quantique exerce une pression suffisante pour empêcher que l'effondrement de la matière se poursuive et forme une singularité. La densité de l'étoile de Planck serait le maximum qu'il est physiquement possible d'atteindre.

Mais que deviendrait ensuite la matière qui continue de tomber dans le trou noir? Elle ne peut faire qu'une

chose: rebondir! Ce scénario semble contredire la vision classique d'un trou noir où, par définition, tout objet ne peut que tomber vers le centre. Mais au cœur du trou noir, les effets quantiques ont une influence non seulement sur la matière, mais aussi sur l'espace-temps lui-même. La gravité quantique autorise l'espace-temps du trou noir à rebondir, la géométrie peut changer et donner lieu à une nouvelle région d'espace-temps de caractéristiques différentes de celles du trou noir.

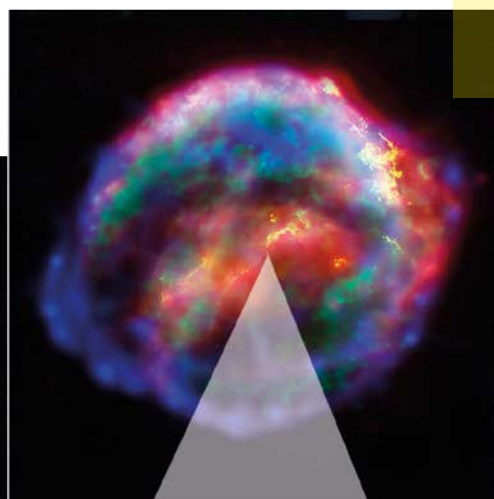
LE FUTUR DU TROU NOIR

Avec Hal Haggard, du Bard College, aux États-Unis, nous avons montré que, contrairement à ce que l'on pensait auparavant, les équations de la relativité générale d'Einstein

D'UNE ÉTOILE MASSIVE À UN TROU BLANC

Dans le scénario classique, le cœur d'une étoile massive s'effondre sur lui-même et forme un trou noir. La matière s'accumule en un volume infiniment petit : le centre acquiert une densité infinie, et l'on parle donc de singularité.

En gravité quantique à boucles, l'aspect discret de l'espace-temps empêche qu'une singularité se forme. La matière s'accumule pour atteindre une densité élevée, mais finie, et forme une «étoile de Planck», cachée sous l'horizon du trou noir. Soumis à des effets quantiques agissant directement sur l'espace-temps, le trou noir peut subir une transformation par effet tunnel, et devenir un trou blanc.



1 En fin de vie, l'étoile massive a épuisé son contenu en éléments légers pour alimenter la fusion thermonucléaire, dont l'énergie libérée contrebalance la gravité de l'astre. L'étoile explose alors en supernova. Ses couches externes forment une nébuleuse planétaire tandis que le cœur s'effondre sur lui-même.

Rayonnement de Hawking

Matière entrante

Cœur de l'étoile

Horizon du trou noir

Cœur de l'étoile

2 Le cœur de l'étoile s'effondre sur lui-même, l'espace-temps se courbe fortement.

3 À un certain stade, le cœur de l'étoile devient un trou noir. Toute matière qui franchit son horizon reste piégée. Le trou noir s'évapore par rayonnement de Hawking, une faible émission de particules.

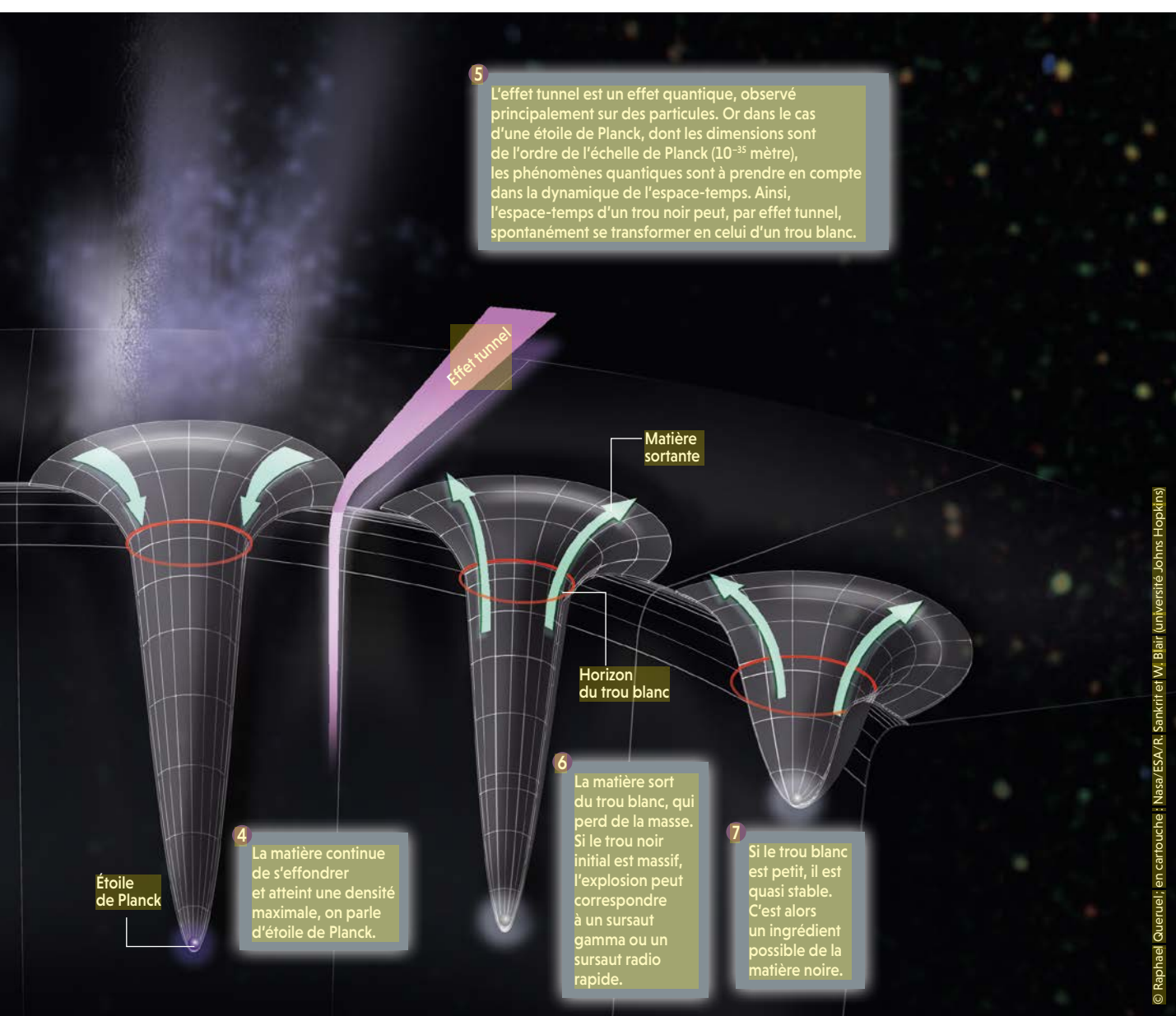
sont compatibles avec la possibilité qu'un trou noir devienne un trou blanc dans le futur, en passant par une brève phase quantique. Pour comprendre un peu plus ce qui se passe, prenons la trajectoire d'une balle qui tombe et touche le sol. Le rebond ressemble à la chute, mais visionnée à l'envers. Il en serait de même avec un trou blanc. Cet objet serait bien l'*alter ego* d'un trou noir, mais observé en remontant le temps.

Dans les années 1930, le physicien irlandais John Lighton Synge a été l'un des premiers à étudier l'intérieur d'un trou noir, même si cette notion n'était pas encore claire à l'époque. Il a montré qu'avec un petit ajustement des équations de la relativité générale, il était possible de prolonger la géométrie d'un trou noir en celle d'un trou blanc. La gravité quantique à

boucles confirme que la physique quantique autorise ce petit ajustement.

Où est situé le trou blanc produit par un trou noir? Est-il très éloigné, relié au trou noir par un trou de ver dans le tissu de l'espace-temps, ou même dans un univers différent? Rien d'aussi spectaculaire. Le trou blanc reste au même endroit que le trou noir, tout simplement dans son futur. Il est difficile de se représenter comment l'espace-temps évolue à l'intérieur de l'astre lors de ce changement, mais, vu de l'extérieur, tout est simple: dans la première partie de sa vie, le trou est noir et la matière tombe dedans sans pouvoir s'en échapper; puis, dans la seconde partie, après la transition quantique, il est blanc et la matière ne peut qu'en sortir.

Concrètement, pour que cela se produise, il doit y avoir un instant où l'horizon du trou noir ➤



> 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). Connus 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.