

de Schwarzschild, on obtient un trou noir. La surface définie par le rayon de Schwarzschild est nommée l'horizon du trou noir et marque la frontière de non-retour pour tout ce qui y tombe. Ces dernières années, nous avons accumulé de nombreuses preuves empiriques que la solution de Schwarzschild décrit bien la réalité.

La solution de Schwarzschild ne dit pas ce qui se passe au centre du trou noir ni dans le futur lointain. La matière qui traverse l'horizon continue de tomber à l'intérieur, vers le centre de l'astre. D'après la relativité générale, elle s'y accumule de sorte que la densité y devient infinie, donnant lieu à une «singularité» qui marquerait la fin de la réalité. Toute chose deviendrait néant et le temps lui-même se figerait.

Cependant, cette prédiction extrême est très certainement erronée. En effet, à l'approche du centre du trou noir, on sort du domaine de validité de la relativité générale. Dans la région centrale, la gravité est si intense que l'on ne peut plus négliger les effets de la physique quantique. Plus précisément, nous devons prendre en compte les effets quantiques sur l'espace-temps. Pour comprendre ce qui se passe au cœur du trou noir, il faut une théorie quantique de la gravitation.

On peut espérer que la prise en compte de la physique quantique dans le voisinage de la singularité fasse disparaître les grandeurs physiques infinies, et donc la singularité. L'application de la physique quantique a souvent résolu des problèmes de ce genre, par exemple pour expliquer la stabilité des atomes et le fait que l'électron ne s'écrase pas sur le noyau.

UN ESPACE-TEMPS TRÈS DISCRET

Que deviendrait la singularité du trou noir dans le cadre d'une théorie quantique de la gravitation? La réponse est loin d'être acquise, car aucune théorie ne fait consensus. Les physiciens théoriciens explorent deux principales pistes. La première est la théorie des cordes, qui suppose que les particules fondamentales ne sont pas des objets ponctuels mais de petites cordes vibrantes. La seconde, qui nous intéresse ici, est la gravité quantique à boucles, qui stipule que l'espace-temps est lui-même soumis aux phénomènes quantiques.

Avec sa théorie de la relativité, Einstein a montré que l'espace-temps n'est pas une scène figée où évolue l'Univers, mais est lui-même un acteur de cette évolution. Non seulement l'espace-temps dicte le mouvement de la matière, mais il réagit à sa présence (en se courbant, se dilatant ou se contractant). La gravité quantique à boucles étend la vision d'Einstein à la réalité quantique du monde: les concepts quantiques qui s'appliquent aux particules s'appliquent aussi à l'espace-temps.

La gravité quantique à boucles a été développée à partir des années 1980. Les physiciens ont d'abord reformulé la relativité générale

HORIZON OU HORIZON DES ÉVÉNEMENTS?

L'horizon des événements définit de façon rigoureuse la frontière d'un trou noir: si elle est franchie, il n'est plus possible d'échapper à la gravité du trou noir et donc d'en ressortir. Cette définition est simple et ne présente pas d'ambiguïté quand il s'agit d'un trou noir statique et sans charge électrique. Il en va autrement quand on considère des trous noirs réalistes, dotés par exemple d'un mouvement de rotation. On peut alors définir plusieurs types d'horizon. Et si l'on parle de trous blancs, la définition doit être inversée, car la frontière à définir correspond à la limite qu'il est impossible de franchir pour pénétrer dans le trou blanc. Dans le cadre de cet article, on a choisi de parler simplement d'horizon, sans préciser.

pour qu'elle ressemble à une théorie de l'électromagnétisme. L'idée est que nous connaissons une procédure qui permet de transformer une théorie classique, comme l'électromagnétisme, en une théorie quantique. Dès lors, les boucles de la nouvelle théorie sont les analogues des «lignes de force», ou lignes de Faraday, des champs électrique et magnétique. Et dans la formulation quantique des lignes de force de la gravitation, on trouve que l'espace y est discrétisé, composé d'éléments individuels, ou *quanta*, minuscules mais de taille finie.

À grande échelle, la trame est tellement serrée que l'espace-temps apparaît comme un continuum, dont l'évolution est décrite par la relativité générale. Mais quand la densité d'énergie devient très élevée, comme au cœur d'un trou noir, on ne peut plus négliger la structure discrète de l'espace-temps et les prédictions de la gravité quantique à boucles diffèrent de celles de la relativité générale classique.

Cet espace-temps discrétisé a un effet direct sur le cœur du trou noir. Il est impossible 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.

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 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

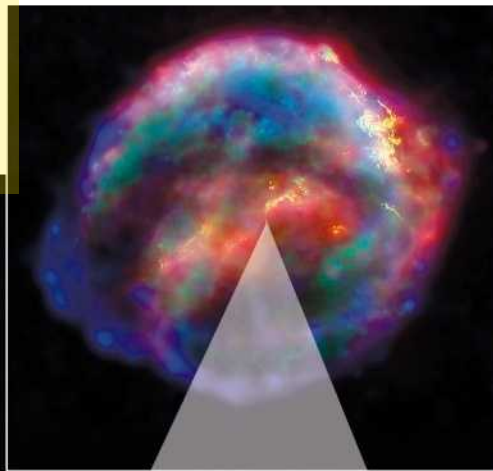
dedans sans pouvoir s'en échapper; puis, dans la seconde partie, après la transition quantique, il est blanc et la matière ne peut qu'en sortir.

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 explique, 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 «passe sous le mur du potentiel» et s'extrait du noyau.

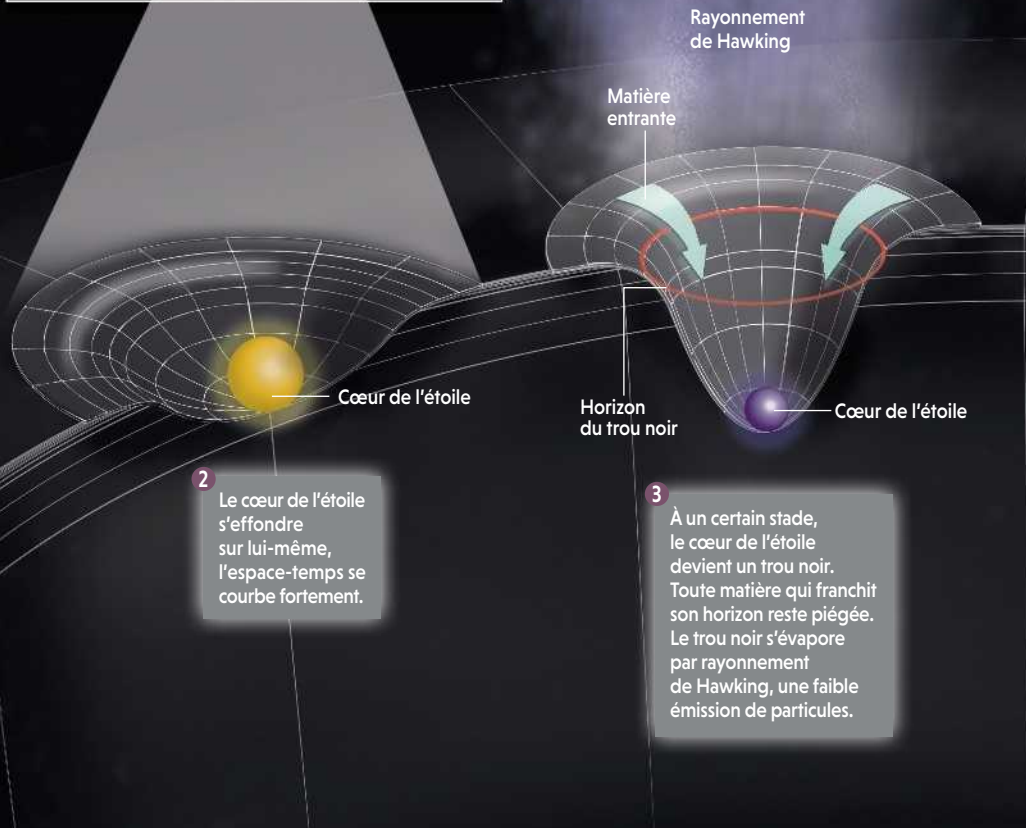
En 2018, grâce à des calculs quantiques détaillés, Marios Christodoulou,

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.



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.