

constitué de la fréquence fondamentale, les harmoniques s'étant évanouies. Transposé aux trous noirs, le comportement est similaire : alors que le mode fondamental perdure, des harmoniques peuvent avoir une contribution non négligeable au début de la phase de vibration du trou noir final, c'est-à-dire juste après la fusion. C'est bien ce qu'ont montré les chercheurs : un signal comportant un mode fondamental et des harmoniques peut tout à fait décrire le signal tel qu'il est prédit par les simulations numériques dès la fusion. En d'autres termes, soit les effets non linéaires sont négligeables, soit ils sont aussi bien décrits par des modes quasi normaux. Quoi qu'il en soit, plus besoin de se donner un laps de temps arbitraire entre la fusion et le début du signal pris en compte dans l'analyse spectroscopique.

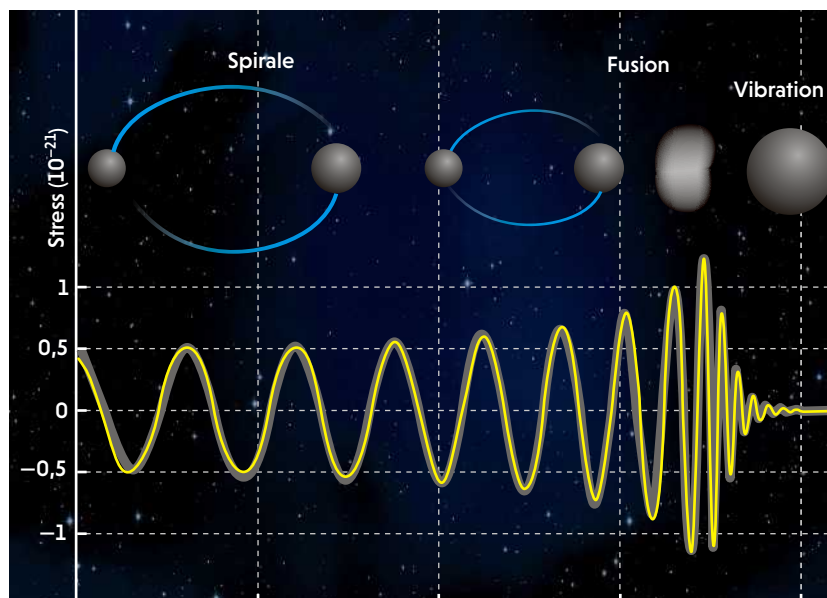
L'équipe de Matthew Giesler a notamment simulé le signal lié à la vibration du trou noir final en y ajoutant le type de bruit qui est attendu pour un signal réel, tel qu'il serait détecté par les interféromètres *Ligo* et *Virgo*. Ils ont ensuite appliqué leur méthode pour déduire du signal la masse et le moment angulaire du trou noir final, et dont la valeur était donnée par ailleurs par leur simulation numérique. Les deux coïncidaient. Il ne restait donc plus qu'à appliquer la méthode à de vraies données.

UN CHEVEU DANS LA SOUPE ?

C'est ce qu'ils ont fait dans une deuxième étude, cette fois coordonnée par Max Isi, de l'institut de technologie du Massachusetts (MIT). Ils ont appliqué leur méthode au signal du premier événement GW150914 et obtenu des résultats sur les valeurs de la masse et du moment angulaire du trou noir final en accord avec les premières analyses de la collaboration *Ligo-Virgo*, mais avec une incertitude réduite. Ils obtiennent surtout, et pour la première fois, des indices confirmant la présence d'harmoniques du mode fondamental dans le spectre de la phase de vibration de GW150914, ce qui est considéré par beaucoup comme un prérequis pour réellement parler de spectroscopie des trous noirs. En ce sens, leur analyse acterait la première étude spectroscopique d'un trou noir concluante.

Alors, est-il bien chauve ? Dans le cadre de la relativité générale, il est possible d'estimer les paramètres du trou noir final à partir de ceux des trous noirs originels. Or, avant la fusion, lorsque les deux trous noirs orbitent toujours l'un autour de l'autre, le signal gravitationnel détecté renseigne sur les paramètres de ces derniers. On peut alors comparer les estimations des paramètres du trou noir final obtenues à partir soit du signal avant la fusion, soit de celui produit après, lors de la vibration du trou noir final.

Si la théorie de la relativité générale est correcte, les résultats devraient être similaires.



La fusion de deux trous noirs se déroule en trois étapes : la phase spirale, durant laquelle les deux trous noirs originels orbitent l'un autour de l'autre, la phase de fusion et la phase de vibration (ou de désexcitation) du trou noir final. Les ondes gravitationnelles varient au cours de l'événement. Pour la première onde gravitationnelle, nommée GW150914, détectée par les deux interféromètres *Ligo* le 15 septembre 2014, la figure montre un signal reconstruit (en gris) à partir des données comparé à une simulation numérique fondée sur la relativité générale (en jaune).

Plus précisément, puisque l'analyse de la phase de vibration du trou noir final fait l'hypothèse, par construction, que l'objet final est un trou noir « chauve », la cohérence des résultats obtenus séparément à partir des données avant et après la fusion serait une preuve que l'objet final serait, non seulement un trou noir, mais un trou noir chauve. La spectroscopie des trous noirs a donc l'avantage d'offrir aux astronomes un nouveau type de tests de la relativité générale dans des régimes jusque-là inaccessibles.

Les résultats de Max Isi et de ses collègues sur GW150914 sont encore modestes, mais vont dans le bon sens : le spectre du trou noir final est en accord avec l'hypothèse de calvitie à 20% près. Cette valeur, encore assez peu concluante, résulte de la faible intensité du signal pendant la phase de vibration pour l'événement GW150914. Mais ce chiffre devrait s'améliorer avec de nouvelles détections. À moins que la relativité générale ne soit finalement pas la meilleure description de la nature géométrique de l'espace-temps. Par exemple, Aurélien Barrau et ses collègues ont récemment suggéré que l'étude du spectre des trous noirs pourrait, peut-être, un jour être utilisée pour tester certains aspects, pour le moment hypothétiques, de la gravitation quantique. La spectroscopie des trous noirs aidera à trancher. Tout écart à la calvitie des trous noirs serait un indice d'une nouvelle physique, un cheveu dans la soupe du modèle standard. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. ISI ET AL., Testing the no-hair theorem with GW150914, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 123, art. 111102, 2019.

R. RUFFINI ET J. WHEELER, Introducing the black hole, *Physics Today*, vol. 24(1), pp. 30-41, 1971.

L'ESSENTIEL

● Comme les trous noirs, les trous blancs sont des solutions des équations de la relativité générale. Alors que rien ne s'échappe d'un trou noir, rien ne pénètre dans un trou blanc.

● Selon la théorie de la gravité quantique à boucles, les trous blancs seraient le destin ultime des trous noirs.

● La matière qui s'est effondrée dans un trou noir ressort de l'astre lorsque celui-ci se transforme en trou blanc.

● S'il n'y a pour l'instant aucune preuve de l'existence des trous blancs, différentes pistes sont explorées en lien avec la matière noire et les rayons cosmiques.

L'AUTEUR



CARLO ROVELLI
professeur à l'université
d'Aix-Marseille, chercheur
au Centre de physique
théorique de Luminy

Troublants trous blancs

Les trous blancs ? Des sosies inversés des trous noirs qui expulsent la matière sans jamais en absorber et seraient le destin ultime de ces astres ultracompacts. Leur détection ouvrirait une voie inédite sur la gravitation quantique.

L

e 10 avril 2019, l'humanité a admiré pour la première fois une image réelle d'un trou noir : une tache noire entourée d'un anneau brillant. Grâce à ce « cliché » (voir *L'épopée d'une image historique*, par A. Riazuelo, page 16) nous avons maintenant une preuve visible et directe de l'existence de ces objets exotiques et extrêmes.

Si l'existence des trous noirs ne fait aujourd'hui guère de doute, de nombreuses décennies ont été nécessaires pour que les physiciens en soient persuadés. Les trous noirs étaient une sorte de curiosité mathématique, une des solutions possibles des équations de la relativité générale d'Einstein, mais sans

existence réelle dans l'Univers. En 1972, Steven Weinberg, de l'université du Texas à Austin, futur Prix Nobel, qualifiait encore ces objets de « très hypothétiques ».

Les indices de leur réalité physique ont cependant fini par s'accumuler. Parmi les derniers, les interféromètres *Ligo* et *Virgo* ont détecté des ondes gravitationnelles, des vibrations de l'espace-temps, dont la forme correspond exactement à celle produite quand deux trous noirs tombent l'un sur l'autre en spiralant jusqu'à fusionner.

Cette histoire de la reconnaissance des trous noirs comme constituants de l'Univers pourrait bien se répéter avec d'autres objets tout aussi surprenants et exotiques que les trous noirs : les trous blancs. Comme leurs homologues sombres, ces astres correspondent à certaines solutions des équations de la relativité générale. Pour les décrire simplement, ce sont des trous noirs évoluant à l'envers : des trous noirs dont le film de la vie serait projeté en partant de la fin. Malgré cette différence, pour un observateur extérieur à un tel astre, il est difficile de distinguer un trou blanc d'un trou noir. Les deux sont massifs et dotés d'un champ gravitationnel attractif. Ils peuvent donc >



La transformation explosive
de trous noirs en trous blancs
pourrait expliquer certaines
observations astrophysiques.

- tous deux soutenir un disque d'accrétion et être entourés d'objets en orbite. Mais si l'on voyait le «trou» expulser une gerbe de matière, on saurait aussitôt qu'il s'agit d'un trou blanc.

La différence serait tout aussi évidente si, d'aventure, un vaisseau spatial s'approchait du bord d'un tel astre. Dans le cas du trou noir, il pourrait y pénétrer, mais il serait alors piégé par le champ gravitationnel intense, incapable d'en ressortir. À l'inverse, avec un trou blanc, le vaisseau serait incapable de pénétrer dans l'astre. Lors de son approche, il rencontrerait un flot de matière sortante et il lui faudrait une énergie infinie pour pénétrer dans le trou blanc.

NÉS D'UN TROU NOIR

Nous savons comment des trous noirs peuvent naître. Par exemple, lorsqu'une étoile très massive arrive en fin de vie, son «carburant» s'épuise et elle s'effondre sous son propre poids. Dans une explosion gigantesque, une supernova, les couches externes de l'astre sont projetées dans le milieu interstellaire, tandis que son cœur se comprime et devient si dense qu'il forme un trou noir. Ce dernier est délimité par un «horizon» qui marque la frontière à partir de laquelle il est impossible de ressortir.

Quant aux trous blancs, à l'inverse, on imaginait difficilement comment de tels objets pouvaient se former. D'où les doutes sur leur existence. Cependant, un certain nombre de physiciens, dont je fais partie, commencent à prendre au sérieux la possibilité que les trous blancs existent réellement: ils se formeraient à la fin de la vie d'un trou noir. Ce dernier pourrait mourir et se transformer en trou blanc. La matière et l'énergie tombées dans le trou noir réémergeraient alors en sortant du trou blanc.

Cette idée vient naturellement dans le cadre de la théorie sur laquelle je travaille, la «gravitation quantique à boucles». Et elle apporte une réponse à deux questions ouvertes que les physiciens tentent de résoudre depuis des décennies.

La première: que se passe-t-il au centre d'un trou noir? Les observations astronomiques nous révèlent que de grandes quantités de matière tombent en spirale sur un trou noir. Toute cette matière continue sa chute vers le centre de l'astre. Mais après, peut-elle s'y accumuler à l'infini?

Deuxième question: que se passe-t-il quand un trou noir termine sa vie? Dans les années 1970, Stephen Hawking a montré que les trous noirs émettent un rayonnement, dit de Hawking (*voir l'encadré ci-contre*), ce qui les conduit à perdre lentement leur masse jusqu'à devenir très petits. Que se passe-t-il ensuite? Nul ne le sait.

La relativité générale d'Einstein explique très bien le comportement observé des trous noirs, mais elle est insuffisante pour répondre à ces deux questions. Cette théorie décrit la dynamique de la matière et de l'espace-temps: la matière se déplace en fonction de la géométrie de l'espace-temps, tandis que l'espace-temps se déforme en présence de matière. L'espace-temps n'est donc plus un cadre passif où s'inscrit la réalité: sa géométrie, variable, détermine les mouvements de la matière d'une telle façon qu'on les interprète comme étant dus à une «force gravitationnelle». Par exemple, la géométrie de l'espace-temps autour de nous est courbée par la Terre, et c'est ce qui nous fait tomber vers le bas.

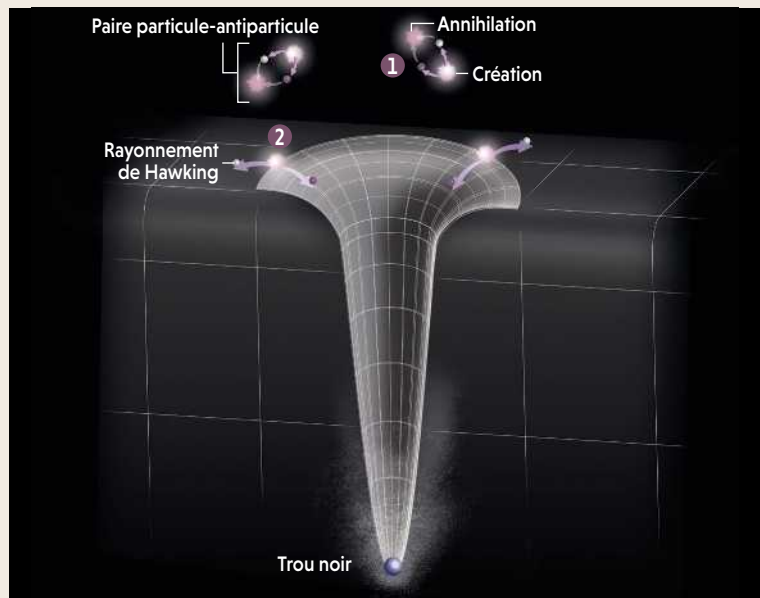
Einstein a écrit les équations finales de sa théorie en 1915. Quelques mois plus tard, à sa grande surprise, le physicien et mathématicien allemand Karl Schwarzschild a trouvé une solution exacte de ces équations. Cette solution décrit la géométrie de l'espace-temps autour d'un corps sphérique, comme une étoile ou la Terre. Mais il a fallu des décennies pour donner une interprétation physique complète de cette solution mathématique. Parce que si la masse du corps est concentrée dans un volume dont le rayon est plus petit qu'une valeur particulière, nommée aujourd'hui rayon de Schwarzschild, des choses très étranges se passent.

La situation s'est clarifiée, notamment grâce au Britannique Arthur Eddington et surtout à l'Américain David Finkelstein: lorsque la masse est concentrée dans le volume défini par le rayon

RAYONNEMENT DE HAWKING

La physique quantique implique que le vide est en fait le siège d'une formidable activité: des paires particule-antiparticule apparaissent spontanément et s'annihilent très vite ①. C'est le principe d'incertitude de Heisenberg qui autorise cette violation temporaire de la conservation de l'énergie. En 1974, Stephen

Hawking a remarqué que si une paire est créée juste au-dessus de l'horizon d'un trou noir, une particule tombe dans le trou noir tandis que l'autre s'échappe; elles ne peuvent donc plus s'annihiler ②. Pour un observateur lointain, le trou noir semble émettre un rayonnement. Le trou noir perd ainsi de la masse: il s'évapore.



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'écroule 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

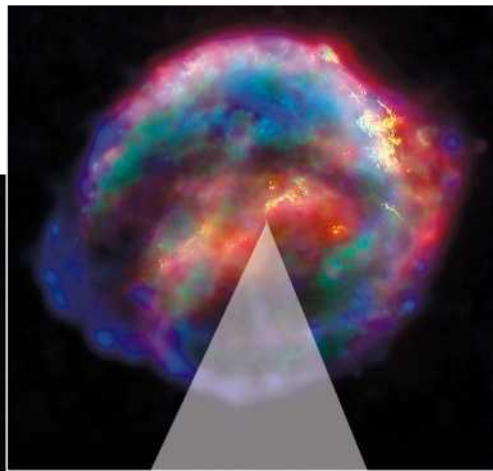
dedans sans pouvoir s'en échapper; puis, dans la seconde partie, après la transition quantique, il est blanc et la matière ne peut qu'en sortir.

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). Connu 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.

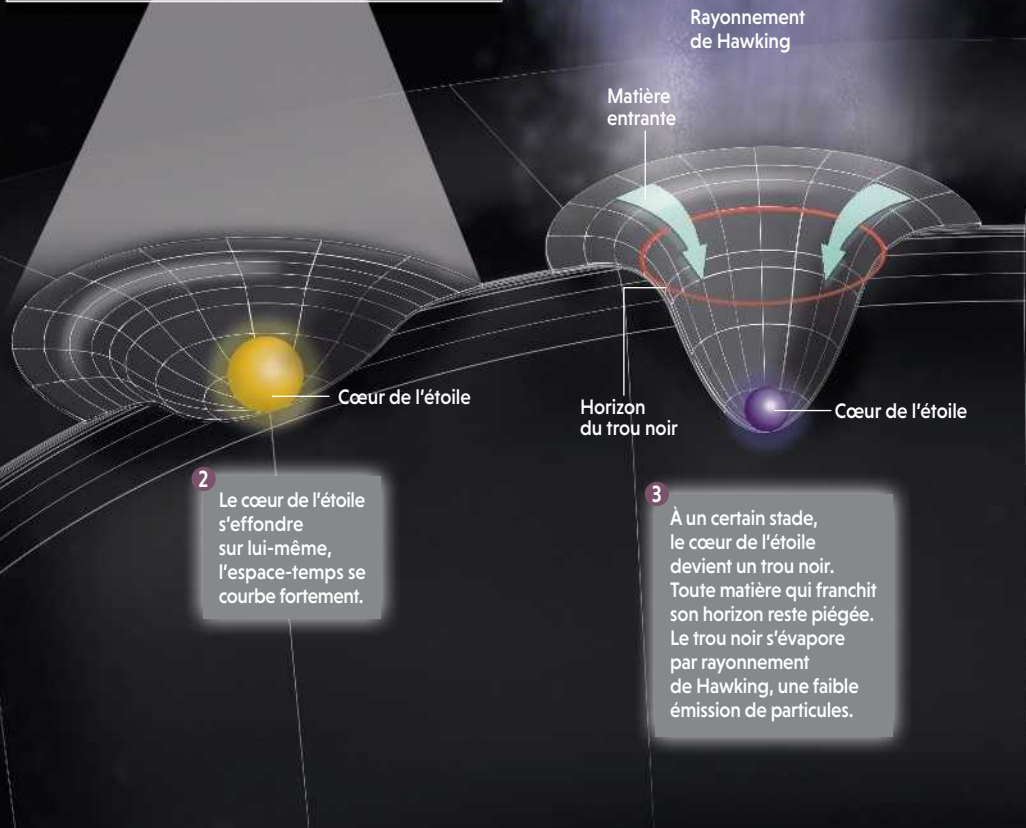
En 2018, grâce à des calculs quantiques détaillés, Marios Christodoulou,

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.

Fabio D'Ambrosio, Simone Speziale et moi, à Marseille, en collaboration avec Ilya Vilenky, de l'université Florida Atlantic, Eugenio Bianchi, à l'université d'État de Pennsylvanie, et Hal Haggard avons 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.

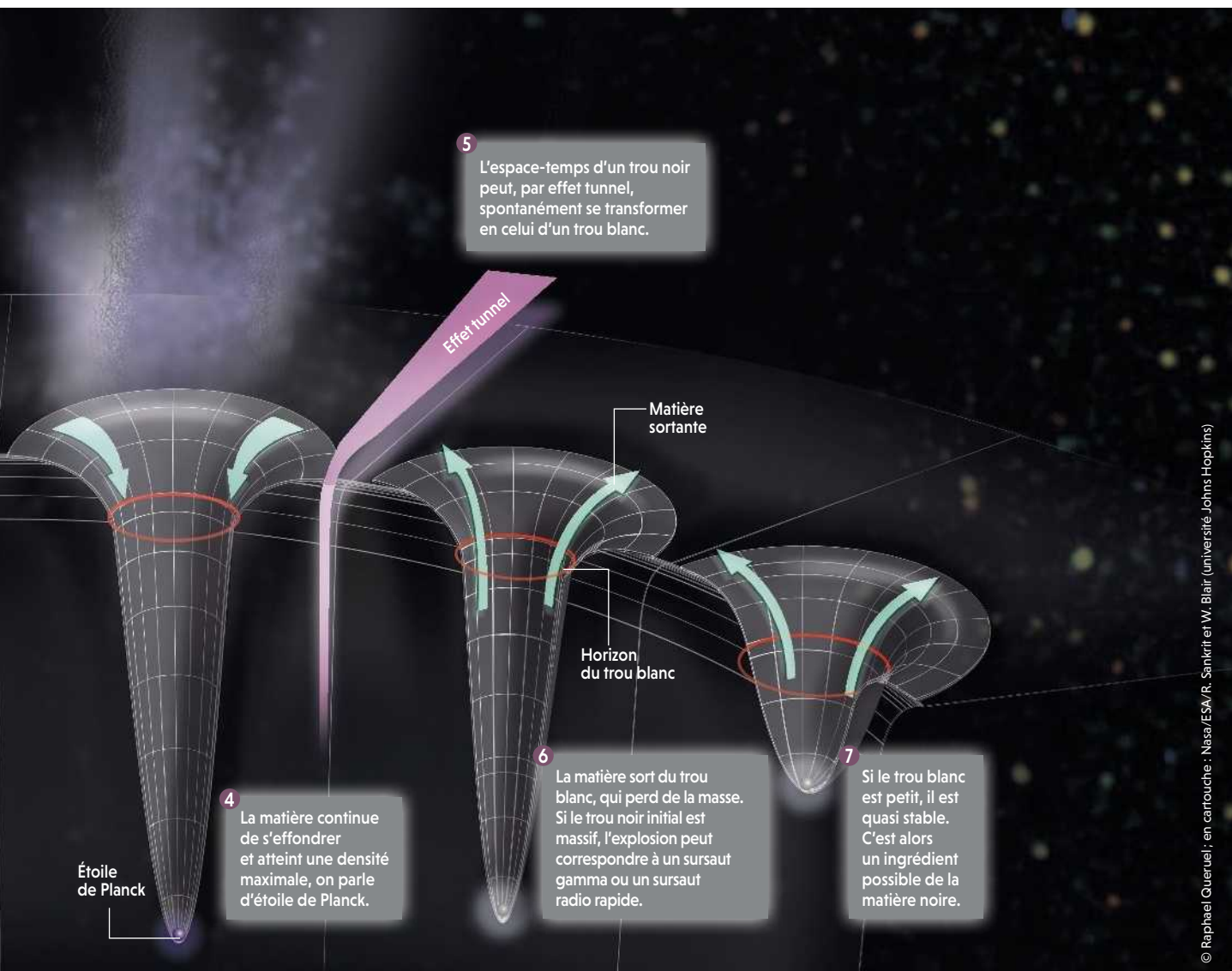
Un phénomène qui dépend de l'effet tunnel prend du temps à se réaliser, car la probabilité

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.

AU BOUT DU TUNNEL, DU BLANC

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

Plus le trou noir diminue de taille par évaporation, plus la probabilité qu'il devienne 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 dans ce cas infime, 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 par exemple 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 précédente*). Mais cette théorie implique-t-elle que le ciel est truffé de trous blancs et, si oui, peut-on les voir ?

La réponse est : peut-être. Parmi les trous noirs que l'on a détectés, on distingue plusieurs catégories. La première est formée des trous noirs supermassifs (de l'ordre de 1 million de masses solaires) qui se nichent au centre des galaxies spirales. La deuxième est représentée par plusieurs trous noirs détectés grâce à *Ligo* et *Virgo* : ces corps ont une masse supérieure à celle

DANS LE SECRET D'UN TROU NOIR

L'existence des trous noirs, désormais incontestable, pose 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. 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. Mais est-ce vraiment le cas ? Les physiciens ont longtemps débattu 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 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 est trop petit pour conserver l'information présente à l'intérieur. Il y aurait alors nécessairement une perte d'information.



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...

Mais il y a peut-être une erreur dans ce raisonnement, qui confond deux notions 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 étoiles (plusieurs dizaines de fois celle du Soleil), et leur origine n'est pas encore claire. Ils sont peut-être des trous noirs «primordiaux», nés dans les débuts tumultueux de l'Univers. La troisième catégorie de trous noirs est constituée des restes de l'effondrement d'une étoile massive en fin de vie. Dans les trois cas, les trous noirs sont trop massifs pour se transformer en trous blancs par effet tunnel aujourd'hui.

Seuls des trous noirs vraiment petits ont une chance non négligeable de subir cette transformation quantique. Or de tels astres pourraient bien eux aussi peupler le cosmos. Ils seraient nés peu après le Big Bang, quand l'Univers était très dense, chaud et en expansion rapide. Des fluctuations de densité auraient provoqué des accumulations localisées de matière amenant à la formation de trous noirs de masses très variées. Nous n'avons pas une idée précise du nombre de ces trous noirs apparus dans les premiers instants de l'Univers, d'où la difficulté de faire des prédictions sur les populations de trous blancs.

Autre obstacle: dans le cadre de la gravité quantique à boucles, la durée de vie d'un trou noir dépend du rayonnement de Hawking et de la probabilité de transformation en trou blanc par effet tunnel. Elle n'est pas encore déterminée avec précision. Les calculs sont complexes et nécessitent des approximations pour être menés à leur terme. En l'état, nous pouvons extraire des calculs une borne supérieure sur la durée de vie quand nous prenons juste en compte l'évaporation de Hawking (le trou noir perd alors toute sa masse par cet effet) et une borne inférieure, si l'on prend seulement en compte la probabilité de transformation par l'effet tunnel. Il est alors possible de tirer quelques conclusions.

Si la durée de vie est longue, seuls les plus petits trous noirs primordiaux, de masses comprises entre 10^4 et 10^9 tonnes, sont devenus blancs et seraient observables aujourd'hui. Dans ce cas, la plupart des trous blancs dans le ciel sont de taille minimale (de l'ordre de la longueur de Planck, environ 10^{-35} mètre).

TROUS BLANCS POUR MATIÈRE NOIRE ?

Ce résultat est une possibilité intéressante, dans la mesure où de tels trous blancs sont assez stables: grâce à des effets quantiques qui les empêchent de perdre toute la matière qu'ils contiennent, leur durée de vie est comparable à celle de l'Univers. Ils contribueraient alors à la matière noire, cette composante majeure de l'Univers dont la nature reste à déterminer. La plupart des hypothèses envisagées, les «candidats» à la matière noire, impliquent des modifications des lois de la physique bien établies.

Le scénario de petits trous blancs (et noirs) constituant la matière noire est relativement peu contraint par les observations. Dans la

région entourant le Système solaire, la densité de matière noire serait de 0,01 masse solaire par parsec cube (Proxima du Centaure, l'étoile la plus proche du Soleil, se trouve à 1,3 parsec). Pour satisfaire à cette valeur, il suffirait d'un trou blanc par 10000 kilomètres cubes.

Si, à l'inverse, la durée de vie des trous noirs est courte, les corps d'origine primordiale se transformant par effet tunnel actuellement auraient une masse comparable à celle d'une petite planète et exploseraient violemment, en expulsant une grande partie de leur masse sous forme de rayonnement. Un tel événement émettrait de grandes quantités de rayons cosmiques, des signaux très brefs dans la gamme des microondes ou des ondes radio. Or plusieurs types de phénomènes astrophysiques transitoires restent mal compris, parmi lesquels les sursauts gamma ou les sursauts radio rapides. Diverses explications ont été proposées, mais il n'est pas impossible qu'une fraction de ces événements proviennent de la transformation d'un trou noir en trou blanc.

Une signature nous permettrait de reconnaître les signaux venant des trous blancs: un décalage vers le rouge «aplatis». Deux phénomènes contribuent à décaler les longueurs d'onde de la lumière d'un astre lointain vers le rouge: l'expansion de l'Univers et le décalage gravitationnel (plus l'astre qui émet le rayonnement est massif, plus sa lumière subit un décalage vers le rouge). Or les premiers trous noirs à devenir blancs étaient plus légers que ceux qui se sont transformés plus tard. En conséquence, leur décalage vers le rouge gravitationnel est moindre, mais l'effet de l'expansion est plus fort. En fin de compte, on observerait un «redshift aplati» que l'on pourra peut-être mettre en évidence grâce à des analyses statistiques, en accumulant de grandes quantités de données sur les rayons cosmiques ou les sursauts radio rapides.

La découverte d'une preuve de l'existence des trous blancs serait une avancée spectaculaire dans notre compréhension du monde. Observer la naissance de trous blancs serait une façon de voir la gravité quantique en action. On ouvrirait ainsi une fenêtre sur l'un des problèmes les plus importants de la physique théorique: comprendre les aspects quantiques de l'espace-temps.

Les idées récentes sur les trous blancs éclairent sous un nouveau jour de nombreux aspects de la physique théorique et de la cosmologie. Pour l'instant, l'hypothèse de la transformation de trous noirs en trous blancs n'a été que peu explorée et de nombreuses questions associées restent ouvertes. Et elles le resteront tant que nous n'aurons pas réussi à identifier un trou blanc. Espérons que cela prendra moins de temps que celui qui a été nécessaire pour nous convaincre de l'existence des trous noirs! ■

BIBLIOGRAPHIE

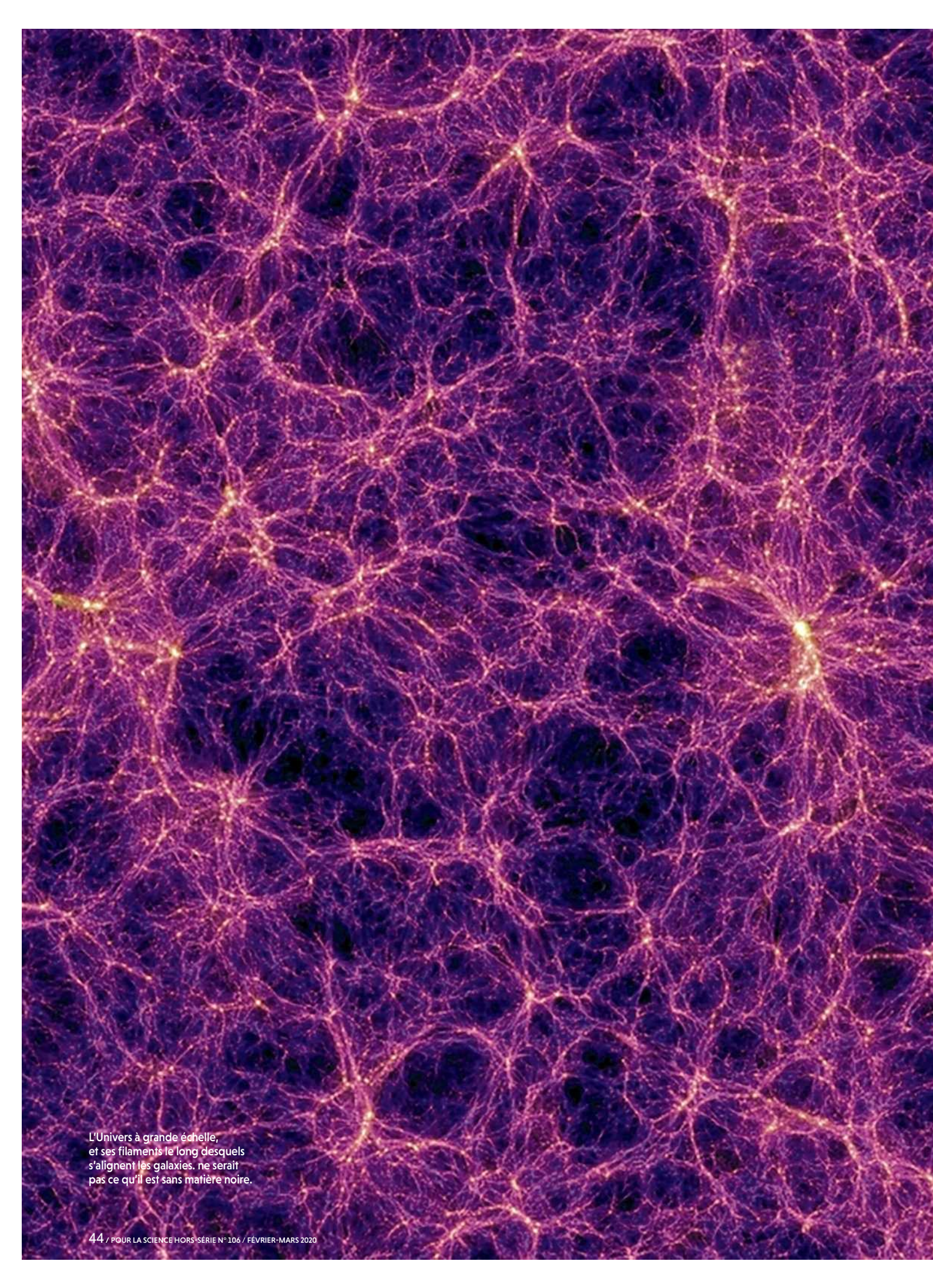
A. ASHTEKAR ET AL., Quantum transfiguration of Kruskal black holes, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 121, art. 241301, 2018.

C. ROVELLI ET F. VIDOTTO, Small black/white hole stability and dark matter, *Universe*, vol. 4, art. 127, 2018.

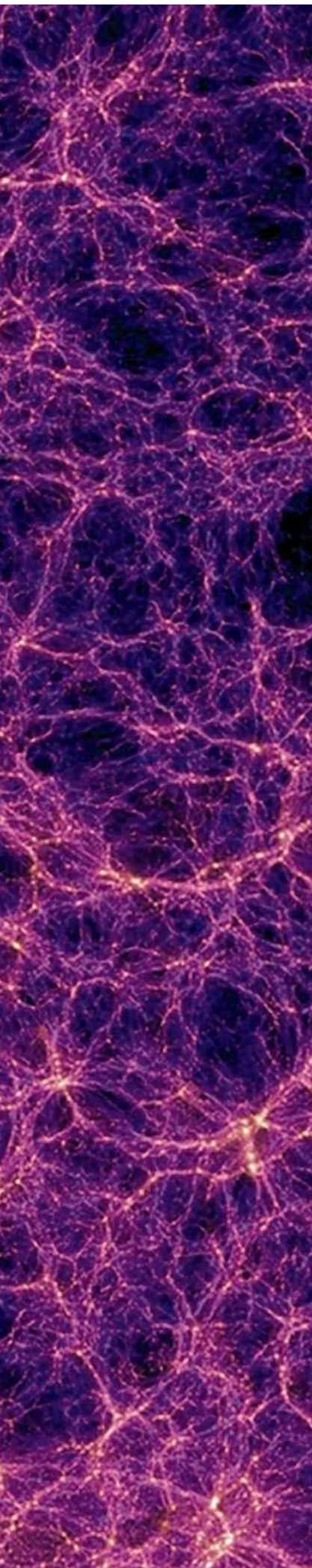
H. M. HAGGARD ET C. ROVELLI, Quantum-gravity effects outside the horizon spark black to white hole tunneling, *Phys. Rev. D*, vol. 92, art. 104020, 2015.

C. ROVELLI ET F. VIDOTTO, Planck stars, *Int. J. Mod. Phys. D*, vol. 23, art. 1442026, 2014.

M. BOJOWALD, L'Univers rebondissant, *Pour la Science*, n° 375, janvier 2009.



L'Univers à grande échelle,
et ses filaments le long desquels
s'alignent les galaxies. ne serait
pas ce qu'il est sans matière noire.



© Shutterstock.com/Nasa images

INSAISSABLE MATIÈRE NOIRE

Mais de quoi est-elle donc constituée ? Axions ? Wimps ? Neutralinos ? Neutrinos stériles ? Trous noirs primordiaux ? Les physiciens rivalisent d'imagination pour proposer des candidats à la matière noire, cette entité inconnue, mais nécessaire pour expliquer la dynamique observée des étoiles dans les galaxies, et celle des galaxies dans les grandes structures de l'Univers. Pour trancher, plusieurs options : produire cette matière noire dans des accélérateurs de particules, la détecter directement ou bien en déduire l'existence à travers des phénomènes astrophysiques. À ce jour, aucun résultat, quelle que soit la piste suivie. Mais il en faut plus pour décourager les cosmologistes qui, sans cesse, repoussent les limites de leurs théories. Ne serait-ce alors pas l'occasion de changer de modèle standard, en cosmologie ou en physique des particules ?