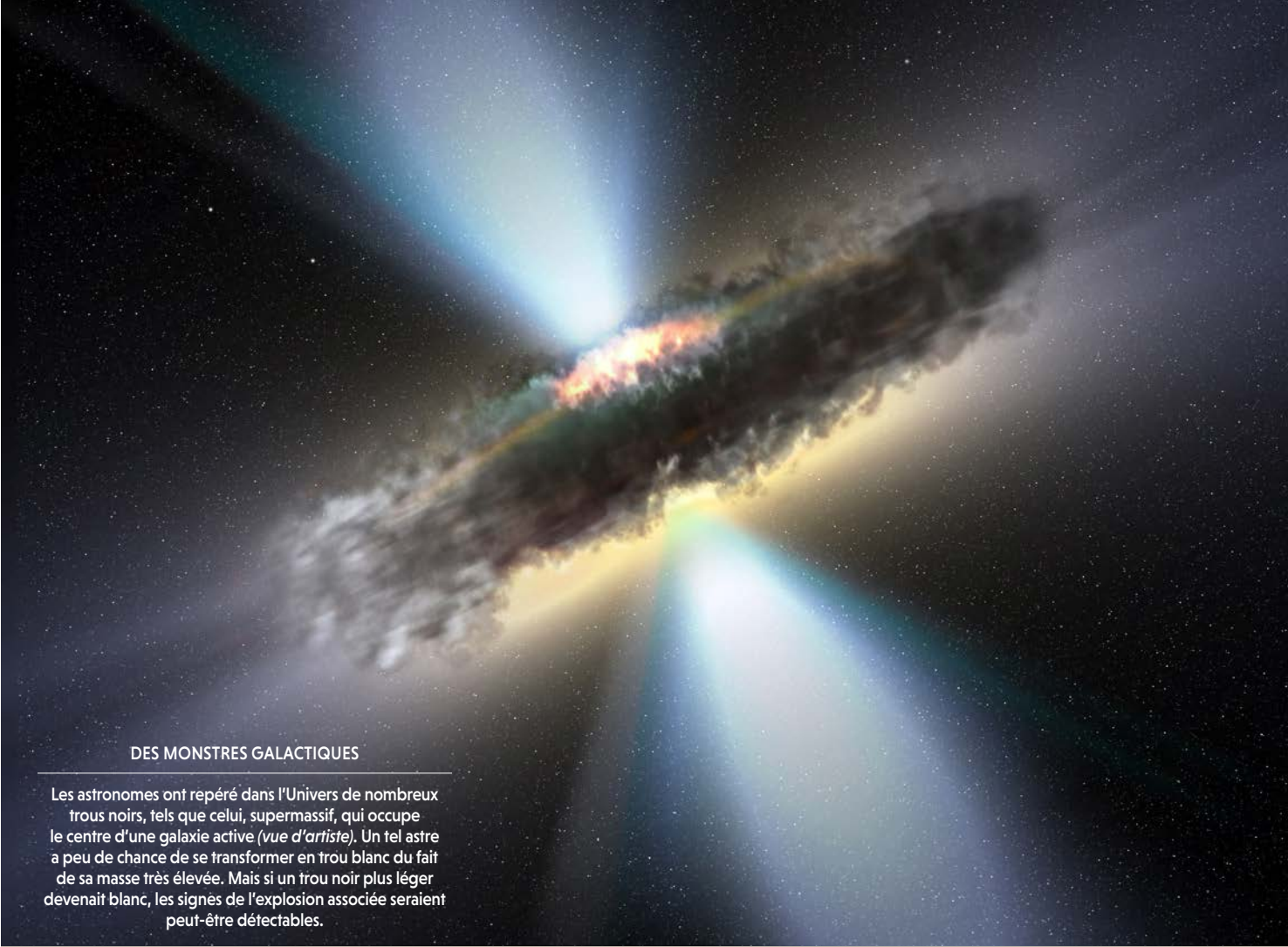




DES MONSTRES GALACTIQUES

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 ➤

UN UNIVERS REBONDISSANT

Dans l'Univers, les galaxies s'éloignent les unes des autres, entraînées par l'expansion de l'espace-temps. Dès lors, si l'on remonte le temps, ces structures se rapprochent les unes des autres, la matière s'accumule et la densité augmente jusqu'à devenir infinie il y a 13,7 milliards d'années, ce qui marque le début de l'Univers. Mais on atteint là les limites de la relativité générale. Pour décrire correctement l'Univers à cette époque, il est nécessaire de prendre en compte les effets quantiques de l'espace-temps, ce qui nécessite une théorie quantique de la gravitation.

La théorie dite de gravité quantique à boucles est l'une des pistes explorées. Une conséquence de cette approche est que l'espace-temps est discret : il prend

la forme d'un maillage discontinu avec des quanta d'espace-temps, analogues aux quanta d'énergie que s'échangent les particules en physique quantique. La taille de ces quanta est de l'ordre de la longueur de Planck, soit environ 10^{-35} mètre.

La structure discrète de l'espace-temps modifie le comportement de la gravitation. Les quanta d'espace-temps ne peuvent accumuler qu'une quantité finie d'énergie. Dès lors, quand la densité d'énergie devient trop élevée, comme au cœur d'un trou noir ou au début de l'Univers, la gravitation devient répulsive.

Dans ce cadre, il n'est plus possible qu'une singularité se forme, ni dans un trou noir ni au début de l'Univers. La conséquence est aussi que l'Univers dans lequel nous vivons n'est pas apparu

Dans le cadre de la gravité quantique à boucles, l'Univers serait né d'un pré-Univers qui se serait contracté puis aurait rebondi.

de rien. En 2007, Martin Bojowald, à l'université d'État de Pennsylvanie, a proposé qu'un pré-Univers se serait effondré sur lui-même. Sa densité aurait atteint la valeur critique où la gravitation devient répulsive. Le pré-Univers aurait alors rebondi pour donner naissance à notre Univers. Le Big Bang serait l'instant de ce rebond.

Cette idée de rebond se retrouve dans d'autres approches quantiques de la gravitation, comme la théorie des cordes. Il est cependant très difficile de la tester, car le rebond a effacé toute trace du pré-Univers. Mais selon Carlo Rovelli et ses collègues, certains trous blancs seraient nés dans le pré-Univers et auraient traversé le rebond. Une idée très spéculative, mais qui offre une piste intéressante pour comprendre l'Univers.

➤ aussi un parallèle intéressant avec le scénario de l'Univers en rebond également proposé dans le cadre de la gravité quantique à boucles (voir l'encadré ci-dessus). 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 aux antennes gravitationnelles *Ligo* et *Virgo* : ces corps ont des masses supérieures à celles des étoiles (plusieurs dizaines de fois celles du Soleil), et leur origine n'est pas encore claire. Ils auraient connu une croissance accélérée durant les millions d'années de leur existence ou ils seraient plus anciens, c'est-à-dire qu'ils seraient 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 avoir une chance de se transformer en trou blanc 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 de temps 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.

UNE DURÉE DE VIE À GÉOMÉTRIE VARIABLE

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