

- 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.

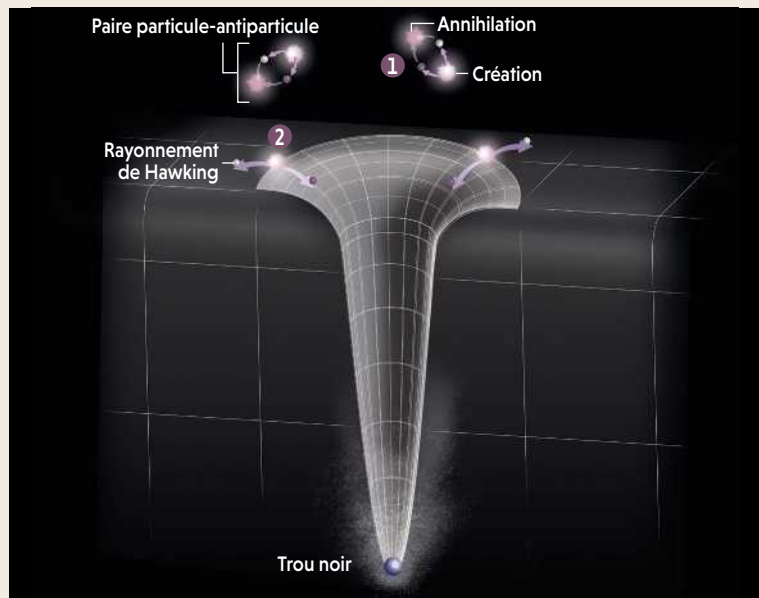
Einstein a écrit les équations finales de sa théorie en 1915. Quelques mois plus tard, à sa grande surprise, le physicien et mathématicien allemand Karl Schwarzschild a trouvé une solution exacte de ces équations. Cette solution décrit la géométrie de l'espace-temps autour d'un corps sphérique, comme 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'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. ➤