

> derniers, ils correspondent à certaines solutions des équations de la relativité générale. Pour les décrire de façon très simple, 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 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. Même la lumière est incapable de fuir hors d'un trou noir, d'où son nom. 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'ÉTOILES EN FIN DE VIE

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. Comme Steven Weinberg pour les trous noirs, Robert Wald, de l'université de Chicago, éminent spécialiste de la relativité générale, a écrit en 1984 dans son livre *General Relativity* qu'il n'y avait pas d'arguments pour penser qu'il existe des trous blancs.

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.

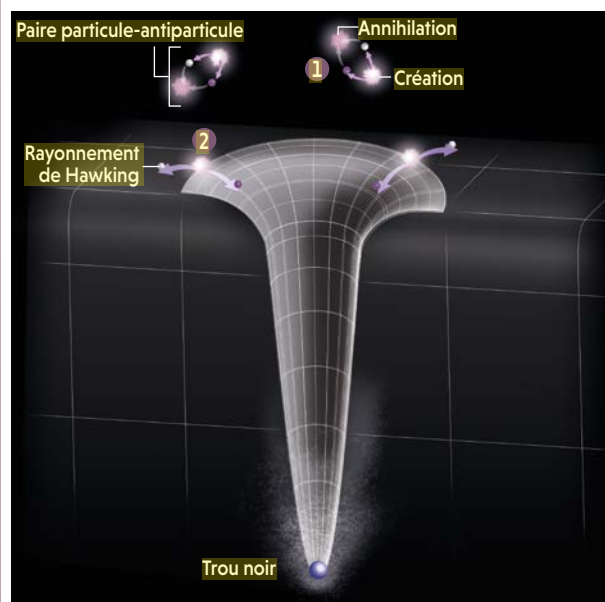
La première est: que se passe-t-il au centre d'un trou noir? Les observations astronomiques nous révèlent que de grandes quantités de matière tombent en spirale sur un trou noir. Toute cette matière continue sa chute vers le centre de l'astre. Mais après, peut-elle s'y accumuler à l'infini?

La deuxième question est: 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-dessous), 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

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.



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 peu à peu 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 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, grâce aux ondes gravitationnelles et à l'*Event Horizon Telescope*, nous avons accumulé de nombreuses preuves empiriques que la solution de Schwarzschild décrit bien la réalité.

UNE SINGULARITÉ GÊNANTE

La solution de Schwarzschild ne nous dit pas ce qui se passe au centre du trou noir, ni ce qui se passe 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 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, au début du xx^e siècle, la description classique de l'atome suggérait que l'électron en orbite autour du noyau devait perdre de

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.

l'énergie progressivement et finir sa trajectoire dans une spirale jusqu'à percuter le noyau atomique: cette instabilité n'aurait pas permis l'existence des atomes. La physique quantique a résolu le problème en indiquant que, dans l'atome, l'énergie de l'électron est discrétisée. Cette particule n'accède qu'à des valeurs particulières d'énergie en partant d'une valeur minimale seuil, ce qui l'empêche de tomber sur le noyau.

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 nous n'avons pas encore une telle théorie qui fasse 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, celle 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.

UN ESPACE-TEMPS QUI DEVIENT DISCRET

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