

> En étudiant cette question, les physiciens ont découvert que la simple existence des trous noirs est en contradiction avec les lois de la physique quantique, qui décrivent jusqu'à présent avec succès tout le reste de l'Univers. Pour résoudre ce paradoxe, il sera peut-être nécessaire d'opérer une révolution conceptuelle aussi profonde que celle qui a conduit à l'avènement de la mécanique quantique.

Les théoriciens ont exploré de nombreuses pistes, mais ils disposent de très peu d'indices directs pour les aider à résoudre ce problème. Cependant, la première image d'un trou noir marque le début d'une période captivante, qui voit arriver des données réelles pour guider nos idées. Les observations futures de l'EHT, en particulier celles susceptibles de montrer l'évolution des trous noirs au fil du temps, et les détections récentes de collisions de trous noirs grâce aux observatoires d'ondes gravitationnelles *Ligo* et *Virgo*, apporteront certainement des éclairages déterminants et ouvriront la voie à une nouvelle ère de la physique.

## INFORMATION PERDUE OU CONSERVÉE ?

Les observations de l'EHT et les détections d'ondes gravitationnelles sont les preuves les plus récentes et les plus directes de l'existence des trous noirs. Cependant, ces objets sont en conflit avec les fondements actuels de la physique. Les principes de la physique quantique sont censés s'appliquer à tous les objets de la nature, mais quand on les utilise pour décrire les trous noirs, on se heurte à des contradictions, qui mettent en évidence un défaut de la forme actuelle de ces lois.

Le problème découle d'une des questions les plus simples que l'on puisse poser sur les trous noirs : qu'arrive-t-il à la matière qui tombe dedans ? Nous savons, d'après les lois actuelles de la physique quantique, que la matière et l'énergie peuvent changer de forme. Les particules peuvent, par exemple, se transformer en d'autres particules. Mais une chose est sacrée et n'est jamais détruite : l'information quantique, c'est-à-dire l'information sur l'état d'un système quantique. Si nous connaissons complètement l'état quantique d'un tel système, nous devrions toujours être en mesure de déterminer exactement son état passé ou futur sans perte d'information. Une question plus précise est donc : qu'arrive-t-il à l'information quantique qui tombe dans un trou noir ?

Notre compréhension des trous noirs vient de la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein, qui décrit la gravité comme une manifestation de la courbure de l'espace-temps ; on visualise souvent cette idée avec une balle déformant la surface d'un trampoline. La trajectoire des corps massifs et de la lumière s'incurve en suivant la déformation de

l'espace-temps, et c'est cela qu'on nomme la « gravité ». Et si, dans un espace assez petit, on accumule assez de masse, la déformation de l'espace environnant est tellement forte que même la lumière ne peut pas s'échapper.

La région d'où il n'est plus possible, même pour la lumière, de fuir constitue un « trou noir ». Elle est délimitée par ce qu'on nomme l'« horizon des événements ». Si rien ne peut

# Le réseau Event Horizon Telescope a construit la première image d'un trou noir réel

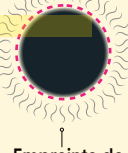
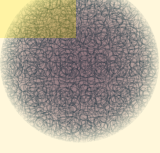
voyager plus vite que la lumière (y compris l'information), tout doit donc rester piégé à l'intérieur de cette frontière. Les trous noirs sont alors des gouffres cosmiques emprisonnant l'information au même titre que la lumière et la matière.

La situation s'est compliquée en 1974 quand le physicien britannique Stephen Hawking a prédit le phénomène d'évaporation des trous noirs. D'après la physique quantique, partout et tout le temps, il se crée des paires de « particules virtuelles », constituées d'une particule et de son antiparticule et qui, en général, s'annihilent très rapidement. Hawking a étudié les conséquences de ce phénomène près de l'horizon des événements : l'une des particules de la paire peut apparaître à l'intérieur de cette frontière, et l'autre à l'extérieur. La particule à l'extérieur peut s'éloigner du trou noir en emportant de l'énergie.

Pour un observateur à distance, le trou noir semble alors émettre un rayonnement, nommé « rayonnement de Hawking », et perdre de l'énergie. Il s'évapore progressivement suivant ce processus jusqu'à disparaître complètement. Or le rayonnement de Hawking ne contient aucune information liée à la matière qui a pénétré dans le trou noir. La conséquence problématique des travaux de Hawking revient à comprendre que l'information quantique qui tombe dans un trou noir ne s'en échappe pas et que, le trou noir finissant pourtant par disparaître, l'information est détruite. Un résultat en contradiction directe avec les principes de la physique quantique.

## UN PROBLÈME POSÉ IL Y A PLUS DE QUARANTE ANS

**L**a relativité générale prévoit l'existence des trous noirs, et de nombreuses observations tendent à confirmer la présence de ces objets dans l'Univers. Mais, en 1974, Stephen Hawking a avancé que ces objets s'évaporent. Si c'est le cas, tout ce qui tombe dedans est détruit, en particulier l'information rattachée à la matière engloutie. C'est un problème, car la physique quantique et la conservation de l'énergie interdisent toute destruction de l'information. Les physiciens ont proposé diverses solutions en modifiant notre vision du trou noir.

|                             | HYPOTHÈSE                                                                                                                                     | DESCRIPTION                                                                                                                                                                                          | PROBLÈME                                                                                                                                                                                                     |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| L'information est détruite  | <b>TROU NOIR « CLASSIQUE »</b><br><br>Horizon des événements | Le trou noir a un horizon des événements; l'information qui pénètre dans le trou noir est détruite quand le trou noir s'évapore.                                                                     | Cette piste contredit la physique quantique et la conservation de l'énergie, qui impliquent que l'information ne peut être détruite.                                                                         |
|                             | <b>CHEVEUX SOUPLES</b><br><br>Empreinte de l'information    | L'information ne pénètre pas complètement dans le trou noir mais laisse une « empreinte » juste à l'extérieur de l'horizon des événements.                                                           | La plupart des spécialistes ne considèrent pas cette description comme une solution convaincante.                                                                                                            |
| L'information est conservée | <b>PELOTE DUVETEUSE</b><br>                                | Dans ce type de vestige massif, l'horizon des événements est remplacé par des cordes dans une géométrie à grand nombre de dimensions.                                                                | Les trois scénarios ci-contre exigent une modification de la notion conventionnelle de localité, c'est-à-dire l'idée selon laquelle rien, y compris l'information, ne peut voyager plus vite que la lumière. |
|                             | <b>MUR DE FEU</b><br><br>Mur de particules                 | Ce type de vestige massif présente un « mur » de particules de haute énergie qui remplace l'horizon; il n'y a pas d'intérieur du trou noir.                                                          |                                                                                                                                                                                                              |
|                             | <b>HALO QUANTIQUE</b><br>                                  | Un trou noir quantique interagit avec son environnement par le biais de petites fluctuations de l'espace-temps. Ce mécanisme permet à l'information d'être transférée vers l'extérieur du trou noir. |                                                                                                                                                                                                              |

Cette conclusion a déclenché une crise profonde en physique théorique. Or de telles crises ont souvent servi d'impulsion pour de grandes avancées. Par exemple, au début du <sup>xx</sup> siècle, la physique classique semblait prédire une inévitable instabilité des atomes, en contradiction évidente avec l'existence de la matière. Plus précisément, les électrons en orbite au sein des atomes, changeant constamment de direction, auraient dû émettre continuellement de la lumière, ce qui aurait entraîné une perte d'énergie et leur chute en spirale sur le noyau. Ce problème a joué un rôle clé dans la révolution quantique. En 1913, Niels Bohr a suggéré que les électrons ne peuvent occuper que des orbites particulières et ne peuvent donc pas tomber en spirale. Cette idée radicale a contribué à poser les fondements de la mécanique quantique, à partir desquelles les physiciens ont réécrit les lois de la nature.

## ALTERNATIVES QUANTIQUES

La crise des trous noirs conduit de la même façon à un nouveau changement de paradigme en physique. Quand Hawking a découvert que les trous noirs s'évaporent, il a initialement conclu que la mécanique quantique devait être erronée et que la destruction de l'information était autorisée. Mais les physiciens ont rapidement compris que ce changement conduirait à une violation majeure du principe de conservation de l'énergie, ce qui invaliderait notre description actuelle de l'Univers. Il fallait clairement chercher la solution ailleurs. Et d'autres arguments théoriques ont renforcé la conviction que l'information est toujours conservée.

Une autre idée, au début, était que les trous noirs ne s'évaporent pas complètement, mais cessent de rétrécir quand ils atteignent une taille minuscule, laissant derrière eux des vestiges microscopiques contenant l'information d'origine. Mais les scientifiques ont remarqué que dans ce cas, d'après la physique quantique, la matière ordinaire deviendrait très instable et exploserait en vestiges de ce type, là encore en contradiction avec notre expérience quotidienne.

Il est tentant de penser que la conclusion initiale de Hawking est probablement fausse et que l'information conservée s'échappe bien du trou noir. Mais cette solution naïve se heurte au principe de localité selon lequel aucune information ne peut se déplacer d'un point à un autre plus vite que la lumière. Or pour échapper à un trou noir, il faudrait voyager plus vite que la lumière. Un excès de vitesse clairement problématique. Depuis la découverte de Hawking, les physiciens ont tenté de trouver une porte de sortie à ce paradoxe tout en restant dans le cadre de la physique conventionnelle. Sans succès jusqu'à présent.

En 2016, Hawking lui-même, Malcolm Perry, de l'université Queen Mary, à Londres, >

> et Andrew Strominger, de l'université Harvard, ont fait une proposition qui a retenu l'attention des spécialistes. Ils ont suggéré qu'une erreur s'était glissée dans l'analyse initiale: l'information n'entrerait en fait jamais vraiment dans le trou noir, mais laisserait une sorte d'empreinte à l'extérieur, sous la forme de «cheveux souples» (cette expression fait référence au théorème affirmant qu'un trou noir n'a pas de cheveux», un tel objet étant défini par seulement trois grandeurs: sa masse, sa charge électrique et son moment cinétique). Mais une analyse plus approfondie de cette idée montre qu'elle est problématique et la plupart des chercheurs n'y croient plus. Pour résumer, une nouvelle approche plus radicale semble nécessaire.

Une autre piste consiste à envisager que des lois physiques inconnues empêchent la formation de véritables trous noirs. Ces derniers résultent en général de l'effondrement de très grosses étoiles en fin de vie qui ont épuisé leur combustible. Sous l'effet de sa propre gravité, la masse stellaire se concentre en son cœur et donne naissance à un trou noir. Et si cependant ce stade n'était jamais atteint et la mort d'une étoile produisait d'autres objets ayant un «meilleur» comportement?

Par exemple, des étoiles plus légères, comme le Soleil, finissent leur vie sous la forme de vestiges denses tels que des naines blanches ou des étoiles à neutrons, mais jamais en trous noirs. Il se pourrait qu'un phénomène inconnu empêche aussi les étoiles plus grosses de former

## LA PREMIÈRE IMAGE D'UN TROU NOIR

**E**n 2019, l'équipe de l'*Event Horizon Telescope* (une installation virtuelle reposant sur plusieurs radiotélescopes à travers le monde qui synchronisent leurs observations) a réalisé l'image du trou noir supermassif au centre de la galaxie M87 (à gauche). Il s'agit plus précisément de son ombre, la lumière étant celle émise par

la matière très chaude de son disque d'accrétion. Les équations de la relativité générale permettent de prédire la forme précise de cette ombre. On peut donc utiliser cette image pour tester cette théorie et peut-être mettre en évidence certaines anomalies. L'image s'est révélée compatible avec la relativité générale. Dans une nouvelle étude, l'équipe a

adopté la stratégie inverse: elle a considéré une grande variété de théories modifiant la relativité générale et a regardé si les prédictions simulées (à droite) sont compatibles avec l'image réelle. Cette étude met des contraintes 500 fois plus sévères sur ces modèles que les précédents travaux utilisant des observations portant sur le Système solaire.