

**A**u cœur de la Voie lactée et de presque toutes les grandes galaxies spirales réside une énigme cosmique : un trou noir supermassif. Personne ne sait vraiment expliquer comment de tels objets, qui concentrent des millions, voire des milliards de fois la masse du Soleil dans une région plus petite que le Système solaire, ont pu se former. Mais en étudiant de près leur comportement et leur évolution, les astrophysiciens espèrent élucider les secrets de la naissance et de l'évolution des galaxies elles-mêmes.

L'obstacle majeur à l'étude des trous noirs est le fait que ces objets n'émettent pas de lumière. En effet, d'après la théorie de la relativité générale, ils courbent l'espace-temps à un tel point que rien ne peut s'en échapper, pas même la lumière. Les trous noirs passent donc l'essentiel de leur temps dans un état endormi, où ils sont invisibles à nos yeux. Mais parfois, ils prennent vie lorsqu'ils « s'alimentent ». Quand de la matière passe trop près du trou noir, elle est piégée et fortement accélérée par les forces gravitationnelles de celui-ci. Et si le mets est de taille non négligeable, les agapes qui s'ensuivent se voient de très loin. Mais ces repas sont très rares : la majeure partie du gaz, de la poussière et des étoiles qui tournent autour du trou noir supermassif occupe des orbites stables et ne sera jamais consommée.

Depuis cinquante ans, les astrophysiciens ont essentiellement observé un seul type de trous noirs en train de faire bombance : les quasars. Découverts par l'astronome néerlandais Maarten Schmidt en 1963, les quasars sont les centres ultraluminescents de galaxies actives, visibles depuis les confins de l'Univers, et brillant chacun davantage que des milliards de soleils. On pense qu'ils correspondent à des nuages massifs de gaz et de poussière qui plongent sur un trou noir supermassif : cette matière se comprime, chauffe et en luit tandis qu'elle décrit des spirales de plus en plus proches du trou noir, cette plongée pouvant durer des centaines de milliers ou des millions d'années.

Mais les quasars sont loin d'être des objets d'étude idéaux. Ces événements extrêmes sont rares et souvent lointains. Et ils ne sont représentatifs que d'une petite fraction de la vie d'un trou noir supermassif. Ils n'en livrent qu'un aperçu limité et laissent les astronomes dans l'inconnu quant à la façon dont les trous noirs supermassifs se comportent, se nourrissent et évoluent la plupart du temps.

Il existe cependant d'autres moyens d'étudier les trous noirs supermassifs. Une méthode consiste à chronométrer les étoiles en orbite rapprochées qui filent à toute vitesse autour de ces trous noirs. Mais, pour que les télescopes

actuels puissent distinguer des étoiles individuelles, ces mesures ne sont envisageables que pour des trous noirs supermassifs suffisamment proches (au cœur de la Voie lactée ou dans l'une des galaxies voisines).

En 1988, l'astronome britannique Martin Rees a proposé une troisième façon d'étudier les trous noirs supermassifs, qui a récemment commencé à porter ses fruits. Au lieu de traquer la lueur stable des quasars ou la vitesse des étoiles en orbite, les astronomes peuvent guetter de brefs et intenses sursauts de lumière au voisinage d'un trou noir. Ces « événements de destruction par effet de marée » ou TDE (pour *tidal disruption events*) se produisent lorsqu'un trou noir supermassif happe une étoile malchanceuse. Ces épisodes ne durent que quelques mois, et non de longs millénaires comme pour les quasars. Les chercheurs peuvent dans ce cas assister au repas du trou noir du début à la fin, et ces TDE sont suffisamment brillants pour être observés même dans des galaxies lointaines.

## COMMENT DÉTRUIRE UNE ÉTOILE

Un événement de destruction par effet de marée est infiniment plus brutal et spectaculaire que les sages marées qui animent le paysage de nos côtes, mais le principe n'en est pas si différent. Les marées de la Terre sont principalement dues à l'attraction gravitationnelle exercée par la Lune, qui tire plus fort du côté de la Terre le plus proche d'elle. La différence entre l'attraction gravitationnelle de la Lune du côté proche et du côté éloigné engendre ce qu'on nomme une force de marée. Laquelle soulève une bosse, ou marée haute, à la fois du côté de la Terre qui fait face à la Lune et, plus paradoxalement, du côté opposé aussi. Et dans les directions orientées à 90 degrés de l'axe Terre-Lune, on obtient des marées basses.

Quand une étoile arrive dans le voisinage d'un trou noir supermassif, peut-être poussée là par les chiquenaudes gravitationnelles d'une autre étoile, les très intenses forces de marée du trou noir peuvent la déchirer en lambeaux. Les détails du trépas de l'astre dépendent de sa taille et de celle du trou noir supermassif. Face aux forces de marée, un petit objet compact, une naine blanche par exemple, sera beaucoup plus résilient qu'une étoile plus grosse et diffuse de type solaire, de la même façon qu'une boule de bowling serait plus difficile à déchirer qu'une boule de barbe à papa.

Les plus gros des trous noirs supermassifs, contenant des milliards de masses solaires, sont trop gros pour créer des événements de destruction par effet de marée : ils auront tendance à avaler les étoiles tout entières avant que les forces de marée ne deviennent suffisamment intenses pour les dépecer. En

Tels des phares cosmiques, les quasars brillent fortement. Ces objets lointains sont produits par des trous noirs supermassifs qui accrètent de grandes quantités de gaz. Mais ces phases d'activité des trous noirs sont trop rares, trop lointaines et durent trop longtemps pour révéler pleinement comment se nourrissent les trous noirs géants. Des détails peuvent être obtenus en observant des trous noirs avaler une étoile entière.

revanche, les forces de marée dues à un trou noir de quelques millions de masses solaires déchireront la plupart des étoiles qui s'approchent à moins de 50 millions de kilomètres – à peu près la distance de Mercure au Soleil.

Le démembrement total de l'étoile n'est que le début du feu d'artifice. Après la destruction initiale, les débris stellaires se dispersent et dévient progressivement de la trajectoire initiale de l'étoile. Les lois de la mécanique indiquent que la moitié environ des débris seront expulsés sous forme de longs filaments de matière loin du voisinage du trou noir, tandis que l'autre moitié retombera vers le trou noir en formant un disque d'accrétion, une structure d'anneaux décrivant des spirales qui chutent lentement vers le trou noir.

Lors de ce processus, le matériau du disque est accéléré et atteint des vitesses proches de celle de la lumière. Les forces gravitationnelles et la friction compriment et chauffent ce disque à des températures approchant 250 000 degrés. Ce disque se met alors à briller intensément. En quelques semaines ou quelques mois, un événement de destruction par effet de marée typique se traduit par la transformation d'un trou noir auparavant dormant et invisible en un objet dont l'éclat éclipse toutes les étoiles de sa galaxie.

Bien que les théoriciens aient prédit les événements de destruction par effet de marée il y a plusieurs décennies, les astronomes ont dû attendre les années 1990 et le début des années 2000 pour en détecter. Ce délai est en partie dû à la rareté des TDE (on estime qu'il s'en produit un tous les 100 000 ans dans une

galaxie comme la Voie lactée). Par ailleurs, ces événements sont difficiles à voir. En effet, les modèles théoriques suggéraient que le rayonnement du disque d'accrétion d'un TDE devrait être maximal dans certaines portions du spectre électromagnétique, les rayons X dits mous et l'ultraviolet lointain. Or ces longueurs d'onde sont difficiles à étudier car les poussières interstellaires présentent des émissions similaires et elles sont efficacement absorbées par l'atmosphère terrestre.

## PESER LE TROU NOIR

Malgré ces obstacles observationnels, les astrophysiciens étaient motivés par la recherche des TDE, notamment parce qu'ils permettent d'estimer avec précision la masse du trou noir, une information cruciale pour étudier comment un trou noir évolue et comment il influe sur son environnement galactique. Pour mesurer la masse d'un trou noir, les astronomes doivent chronométrer le temps nécessaire au TDE pour atteindre sa brillance maximale (ce qui montre à quelle rapidité un disque d'accrétion se forme et nourrit le trou noir). Du fait de leur extraordinaire luminosité, les TDE permettent aux chercheurs de préciser les masses pour un éventail de trous noirs supermassifs plus large qu'avec n'importe quel autre phénomène connu.

Les premiers candidats TDE ont été trouvés dans les données des télescopes spatiaux *Rosat* (rayons X) et *Galex* (ultraviolet). Ils se présentaient sous la forme d'événements éruptifs durant quelques semaines à quelques mois et provenant du centre de galaxies jusque-là ➤



inactives. En tant que premières manifestations de ce phénomène prédit depuis longtemps, ces découvertes ont été particulièrement importantes et ont inauguré un nouveau champ d'étude. Mais parce que l'on trouvait ces candidats pour l'essentiel dans des données anciennes, les astronomes étaient dans l'impossibilité de les étudier à diverses longueurs d'onde en temps réel afin d'avoir une vue complète de ces événements. Pour prendre les TDE sur le vif, il fallait que les astronomes aient beaucoup de chance, ou qu'ils soient en mesure de surveiller en continu de gigantesques portions du ciel.

## LA TRAQUE DEVIENT POSSIBLE

Or, grâce aux progrès continus en termes de stockage de données et de sensibilité des détecteurs durant la dernière décennie, des relevés aussi ambitieux sont désormais possibles. Un détecteur optique haut de gamme peut aujourd'hui obtenir une image de un degré carré du ciel en une prise unique, ce qui revient plus ou moins à voir le ciel avec un objectif panoramique après des années passées à l'étudier en regardant à travers une paille. En surveillant régulièrement de vastes régions du ciel et en comparant numériquement les images résultantes afin d'y identifier des événements peu lumineux et éphémères, les astronomes sont maintenant en mesure de découvrir et d'étudier plus facilement les TDE et une foule d'autres phénomènes astrophysiques transitoires.

Ces nouveaux relevés à grand champ, tels *Pan-STARRS* (*Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System*, télescope de relevé panoramique et système de réponse rapide), *PTF* (*Palomar Transient Factory*, usines à sources transitoires du mont Palomar) et *ASAS-SN* (*All-Sky Automated Survey for Supernovae*, relevé automatisé sur tout le ciel des supernovæ), ont été conçus principalement pour identifier les supernovæ et les astéroïdes. Or, comme ils sont capables de capter l'image de millions de galaxies chaque nuit, ils sont aussi sensibles aux événements plus exotiques, tels que les TDE.

En 2010, peu de temps après la mise en service de *Pan-STARRS*, une équipe dirigée par Suvi Gezari, astrophysicienne à l'université du Maryland, a découvert un événement de destruction par effet de marée; nommé PS1-10jh, il s'est produit autour d'un trou noir d'à peu près 2 millions de masses solaires dans une galaxie située à quelque 2,7 milliards d'années-lumière de la Terre. Et comme ce TDE a été détecté peu de temps après l'enregistrement des données, Suvi Gezari et ses collègues ont pu, pour la première fois, suivre la quasi-totalité du processus en longueurs d'onde optiques et ultraviolettes. Mais ce qu'ils ont vu a constitué un véritable choc.

## UNE RENCONTRE RARE MAIS FATALE

En s'aventurant trop près des trous noirs supermassifs tapis au centre de la plupart des galaxies, les étoiles se déchirent sous l'effet de l'intense champ gravitationnel. Elles envoient un flot de gaz vers le trou noir; ce gaz se comprime, chauffe et luit pendant sa chute. Nommés événements de destruction par marée, ou TDE, ces explosions sont parmi les phénomènes les plus lumineux de l'Univers et éclairent le processus d'alimentation et de croissance des trous noirs supermassifs.

Étoile

### LE DÉBUT...

Un TDE démarre quand un trou noir supermassif exerce une attraction gravitationnelle plus forte du côté proche que du côté éloigné d'une étoile de passage. L'intensité de ces « forces de marée » dépend de la masse du trou noir et de la densité de l'étoile. Ici, une étoile de masse solaire commence à s'étirer comme de la barbe à papa en s'approchant d'un trou noir d'environ un million de masses solaires.

### UNE OCCASION UNIQUE

Un TDE est la seule situation qui permet aux astrophysiciens d'assister au spectacle d'un trou noir qui se réveille, prend son repas et retourne dormir. En fonction du temps que met un disque d'accrétion à se former (1), atteindre sa luminosité maximale (2) et disparaître (3), les chercheurs évaluent la taille de l'étoile engloutie ainsi que la masse du trou noir et sa vitesse de rotation. Pendant que le trou noir se nourrit, les chercheurs peuvent également suivre les ondes de choc dans son disque d'accrétion, ainsi que la formation de jets relativistes (des faisceaux de particules libérées à des vitesses proches de celle de la lumière, émanant des pôles du trou noir). Aucun autre événement cosmique n'offre une vision aussi détaillée des processus extrêmes régnant autour des trous noirs.

1