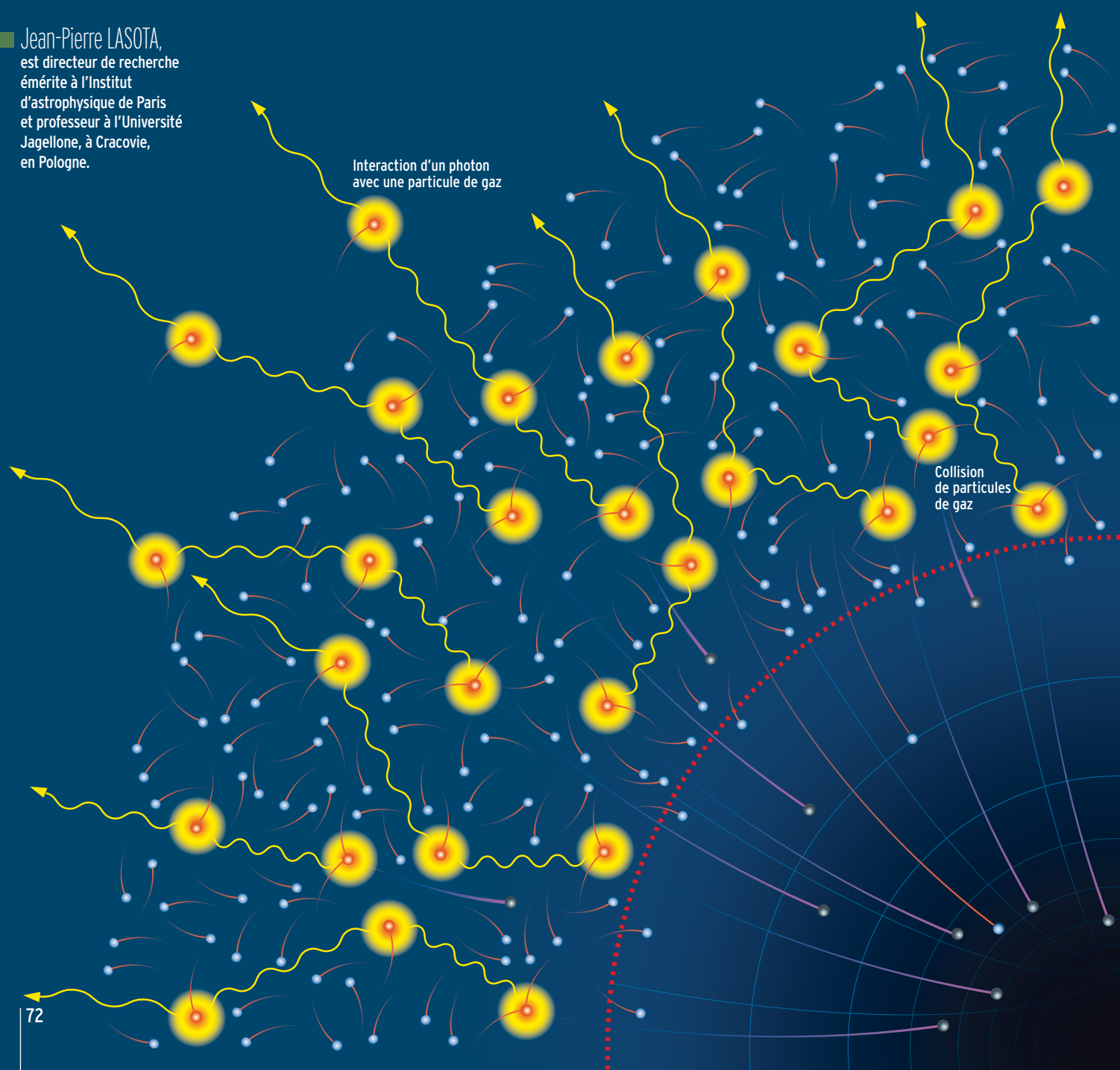


Les trous noirs dévoilés

Jusqu'à récemment, nous n'avions que des indices indirects de la présence de trous noirs. Désormais, les astronomes pourraient en avoir la preuve directe : dans certaines portions d'espace, de l'énergie disparaît sans laisser de traces.

Jean-Pierre LASOTA, est directeur de recherche émérite à l'Institut d'astrophysique de Paris et professeur à l'Université Jagellone, à Cracovie, en Pologne.



Partout dans l'Univers, les astronomes devinent la présence de trous noirs. Ces objets fascinants se cachent pour certains au centre de nombreuses galaxies (dont la Voie lactée), d'autres sont appariés avec des étoiles normales dans des systèmes binaires, et d'autres encore pourraient même errer seuls dans le milieu interstellaire. Objets les plus compacts de l'Univers, ils contiennent la forme de matière la plus extrême que l'on connaisse : la concentration d'une masse arbitrairement grande dans un volume proche de celui d'un point. De tels objets constituent un défi aux observateurs. En effet, ils sont vraiment noirs : ils n'émettent aucun rayonnement électromagnétique, en tout cas jamais à un niveau suffisant pour que les astronomes puissent espérer le détecter un jour.

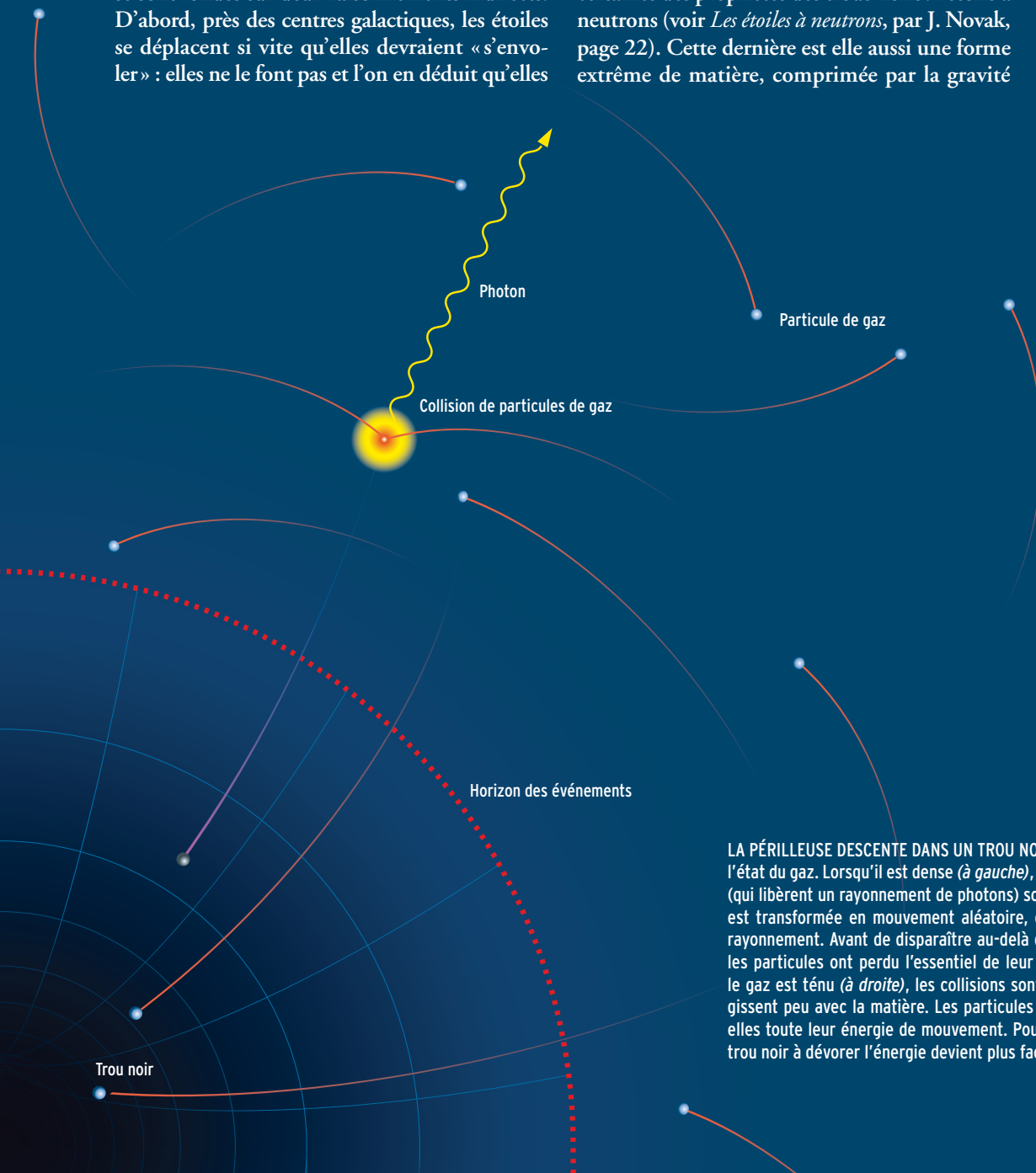
Pour déduire leur existence, les chercheurs se sont fondés sur deux raisonnements indirects. D'abord, près des centres galactiques, les étoiles se déplacent si vite qu'elles devraient « s'envoler » : elles ne le font pas et l'on en déduit qu'elles

sont retenues par la gravité d'une masse énorme (jusqu'à un milliard de masses solaires). Un corps aussi massif est nécessairement très dense, et les théoriciens ne connaissent pas d'alternative au trou noir. Deuxième indice, de nombreux centres galactiques et systèmes d'étoiles binaires émettent du rayonnement et de la matière à des taux tels qu'ils doivent nécessairement receler un mécanisme extraordinairement efficace pour générer de l'énergie. En théorie, le moteur le plus efficace possible est le trou noir.

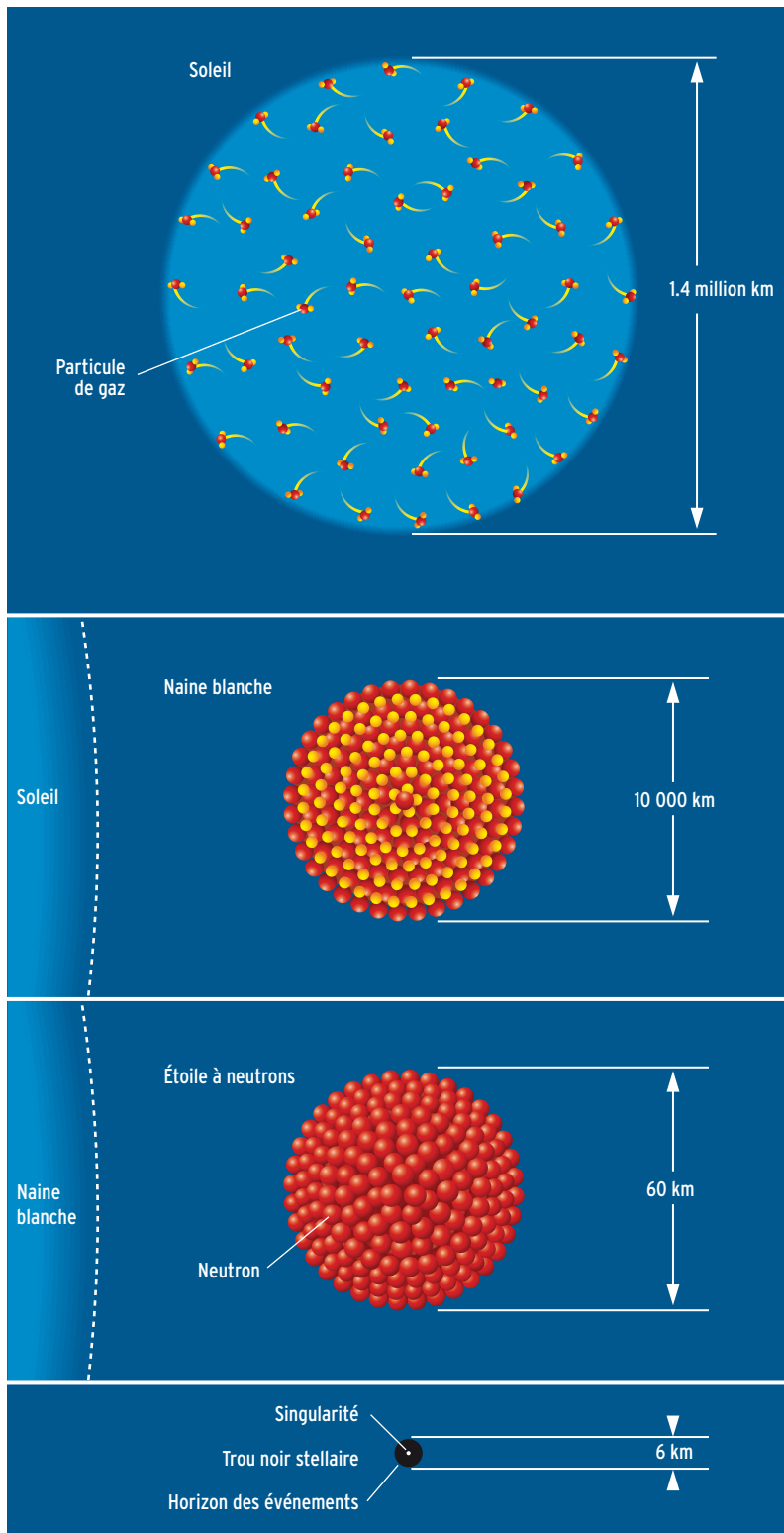
Cependant, toutes ces observations ne font que prouver l'existence d'un corps compact, quel qu'il soit. Elles n'identifient pas formellement les trous noirs dont la présence est déduite par défaut. Dans les systèmes binaires, l'identification est particulièrement ambiguë, car les astronomes connaissent un autre corps compact partageant certaines des propriétés des trous noirs : l'étoile à neutrons (voir *Les étoiles à neutrons*, par J. Novak, page 22). Cette dernière est elle aussi une forme extrême de matière, comprimée par la gravité

L'ESSENTIEL

- ➔ Comment distinguer un trou noir d'une étoile à neutrons ?
- ➔ D'abord, les étoiles à neutrons ont nécessairement une masse inférieure à trois masses solaires.
- ➔ Les deux astres se distinguent également par leur brillance.
- ➔ Ensuite, dans les sources transitoires de rayons X, certaines observations ne s'expliquent que par la présence d'un trou noir.



LA PÉRILLEUSE DESCENTE DANS UN TROU NOIR se fait différemment selon l'état du gaz. Lorsqu'il est dense (*à gauche*), les collisions entre particules (qui libèrent un rayonnement de photons) sont fréquentes. Ainsi, la chute est transformée en mouvement aléatoire, c'est-à-dire en chaleur et en rayonnement. Avant de disparaître au-delà de l'horizon des événements, les particules ont perdu l'essentiel de leur énergie. En revanche, quand le gaz est ténu (*à droite*), les collisions sont rares et les photons interagissent peu avec la matière. Les particules qui tombent emportent avec elles toute leur énergie de mouvement. Pour un tel gaz, la capacité d'un trou noir à dévorer l'énergie devient plus facile à observer.



LES ÉTOILES, VIVANTES OU MORTES, sont le théâtre d'une lutte entre la gravité tournée vers l'intérieur et une pression dirigée vers l'extérieur. L'équilibre des forces détermine la taille de l'étoile (les objets présentés ont la même masse, celle du Soleil). Dans une étoile vivante ordinaire, tel le Soleil, la pression est gazeuse, et alimentée par des réactions nucléaires dans le cœur. Dans une naine blanche (le cadavre dense et incandescent d'une étoile de type solaire), la pression est la « dégénérescence » quantique, due à l'entassement des électrons. Dans une étoile à neutrons, vestige de l'explosion d'une étoile massive, les noyaux atomiques sont brisés et empilés. Dans un trou noir, aucune pression vers l'extérieur n'affronte la gravité, et l'étoile s'effondre pour ne plus former qu'un point mathématique (une singularité) à l'intérieur d'une surface de non-retour nommée horizon des événements.

jusqu'à des densités énormes. Une étoile à neutrons est essentiellement un noyau atomique de la taille d'une grande ville, et c'est ainsi que de nombreuses étoiles massives finissent leur vie. Une étoile à neutrons d'une masse solaire a le même rayon (environ 30 kilomètres) que l'« horizon des événements » qui délimite un trou noir de dix masses solaires. Rappelons que l'horizon des événements est une surface dont rien ne peut s'échapper, même en avançant à la vitesse de la lumière. Comment distinguer les étoiles à neutrons des trous noirs ? C'est un problème clef de l'étude des trous noirs.

Toutefois, ces dernières années, les astronomes ont peut-être trouvé un moyen, fondé sur la principale différence entre les étoiles à neutrons et les trous noirs : les premières ont des surfaces dures sur lesquelles de la matière peut s'accumuler, alors que la matière qui tombe sur les seconds est avalée et disparaît à jamais. Or cette différence modifie subtilement le rayonnement émis au voisinage des deux types de corps...

Épais contre mince

La gravité intense des trous noirs est ce qui en fait des moteurs si efficaces. Les objets sont attirés vers l'horizon, et en chemin ils peuvent entrer en collision avec d'autres objets et se fracasser. Parce que ces divers objets se déplacent à une vitesse proche de celle de la lumière, l'énergie cinétique disponible pour la transformation en chaleur est comparable à celle correspondant à leur masse au repos ($E = mc^2$). Pour qu'un objet revienne à son point de départ loin du trou noir, il devrait perdre une fraction importante de sa masse et la convertir en énergie pure. En ce sens, les trous noirs transforment la masse au repos en énergie thermique.

L'efficacité de cette conversion dépend de la vitesse de rotation du trou noir. Le moment angulaire est l'un des attributs que la matière ne perd pas quand elle est incorporée à un trou noir. Bien que la rotation ne puisse pas être vue directement, elle déforme l'espace-temps à proximité de l'horizon. Mais un trou noir ne peut pas tourner à une vitesse arbitrairement grande. Au-dessus d'un certain taux de rotation, la surface du trou noir cesserait d'exister. Un trou noir tournant à une vitesse proche du maximum possible convertirait en énergie 42 pour cent de la masse qui tombe dessus, mais seulement six pour cent s'il est statique. Par comparaison, l'efficacité de la fusion thermonucléaire dans les étoiles ordinaires est de 0,7 pour cent et celle de la fission de l'uranium est de 0,1 pour cent.

Quand les particules autour du trou noir partagent leur énergie (par exemple en cas de collisions), la matière qui tombe est extraordinairement chaude. La température typique d'un proton juste à l'extérieur de l'horizon correspond à la conversion d'une grande partie de sa masse en énergie pure, soit environ 10^{13} degrés. À une telle température,

Sim films

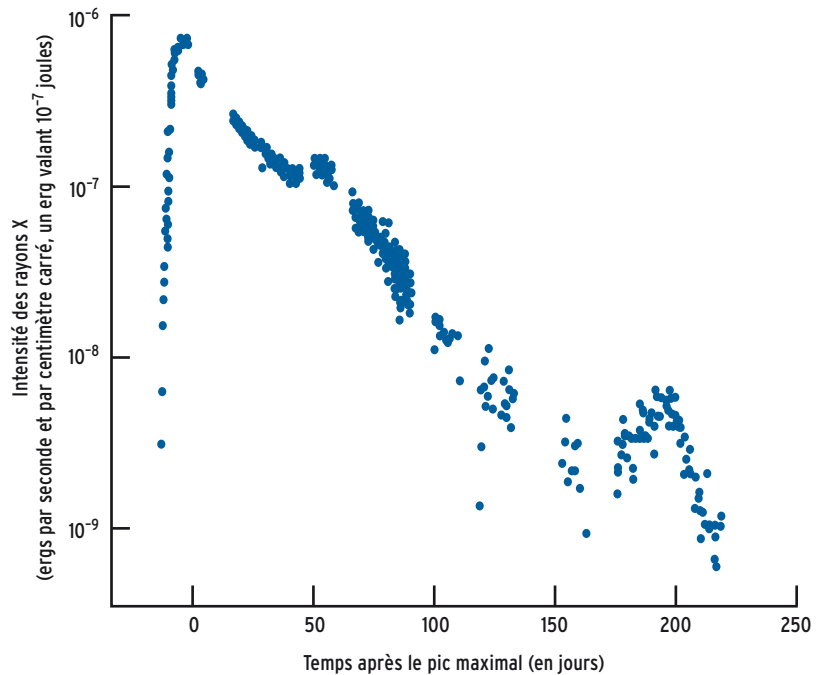
la matière devrait émettre des rayons gamma. Mais les protons (et les ions en général) ont beau chauffer facilement, ils ne rayonnent pas bien l'énergie. Ils transfèreraient plutôt leur énergie, par collision, à de meilleurs émetteurs, en particulier les électrons, qui émettent des photons de plus basse énergie, tels les rayons X. Les astronomes s'attendent donc à voir un flux intense de rayons X venant d'une région à forte densité d'électrons.

De fait, c'est bien le cas dans certains systèmes de binaires X. Le premier de ces systèmes a été découvert en 1962 et, depuis, les astronomes en ont identifié plusieurs centaines. On pense que ces sources de rayons X les plus brillantes du ciel sont constituées d'une étoile ordinaire en orbite autour d'un objet invisible. Certaines émettent du rayonnement en continu, alors que d'autres (des sources transitoires de rayons X) ne se détectent que de temps en temps, pendant quelques mois, avant de retrouver un état dans lequel elles n'émettent que peu, ou pas du tout, de rayons X. La plupart de ces systèmes n'ont été vus qu'une seule fois. Lors des bouffées, ils émettent 10^{30} à 10^{31} watts sous forme de rayons X, soit jusqu'à 100 000 fois la puissance totale du Soleil.

La distribution énergétique de ce rayonnement a presque la même forme qu'un « spectre de corps noir ». Même s'il est beaucoup plus intense, il ressemble au spectre émis par des objets aussi divers que le Soleil, du charbon incandescent ou le corps humain. Un spectre de corps noir est produit par un milieu « optiquement épais », si dense que les photons ne peuvent pas le quitter sans subir de multiples collisions avec des électrons. Les collisions dispersent, détruisent et créent des photons, ce qui obscurcit la source de départ et moyenne les détails de chaque interaction. Le spectre résultant ne dépend que de la température et de la taille de la surface émettrice. À l'inverse, dans un gaz « optiquement mince », les photons ne subissent quasiment aucune interaction avant de s'échapper : le spectre dépend des propriétés détaillées de la matière.

La température déduite des binaires à rayons X est de 10^7 degrés, ce qui est cohérent avec ce qu'on attend pour un trou noir. Pour créer l'émission observée, un trou noir devrait « avaler » 10^{-9} à 10^{-8} masses solaires par an, ce qui est en accord avec les estimations du taux auquel l'étoile ordinaire perd de la masse au profit de son compagnon. Ainsi, les binaires X pourraient être la meilleure preuve qu'il existe des trous noirs de masse stellaire.

Cependant, on pourrait appliquer les mêmes arguments à une étoile à neutrons. Elle n'est pas tout à fait aussi puissante qu'un trou noir, mais elle n'en est pas moins un moteur impressionnant. De la matière peut impacter sa surface à la moitié de la vitesse de la lumière, se convertissant en énergie avec une efficacité d'environ dix pour cent, soit de l'ordre de celle d'un trou noir typique.



UNE ÉRUPTION EN RAYONS X de la source transitoire nommée A0620-00, située dans la constellation de la Licorne, a été détectée. En quelques semaines, l'intensité (axe vertical) a augmenté au moins d'un facteur 10 000 et a atteint son maximum le 13 août 1975. Cette source de rayons X est la plus brillante jamais détectée. Les astronomes avaient déjà observé une bouffée de lumière visible dans la même région 58 ans plus tôt, mais à l'époque ils n'avaient pas de détecteurs de rayons X.

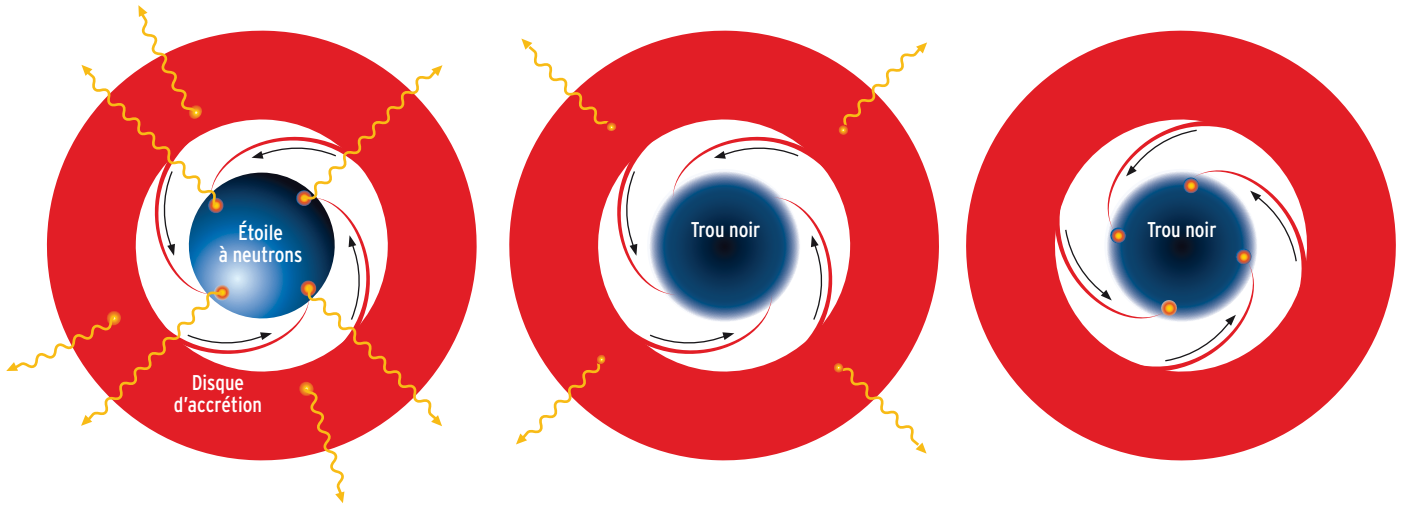
D'ailleurs, les astronomes savent que, dans bien des cas, l'objet qui se trouve au centre de la binaire n'est pas un trou noir. On pense que les pulsars radio qui se trouvent dans les binaires sont, comme les pulsars simples, des étoiles à neutrons magnétisées en rotation rapide. Les trous noirs astronomiques ne peuvent pas avoir de champ magnétique. Ce sont des objets presque sans structure, qui ne peuvent pas créer les impulsions régulières observées dans les pulsars.

Prendre le pouls

De même, les pulsars à rayons X ne peuvent pas être des trous noirs. Toute pulsation régulière stable exclut la présence d'un trou noir. Même les sursauts irréguliers de rayons X supposent l'existence d'une étoile à neutrons, à la surface de laquelle la matière peut s'accumuler et parfois exploser.

Malheureusement, la réciproque n'est pas vraie : l'absence d'impulsions ou de bouffées ne trahit pas nécessairement un trou noir. Par exemple, une étoile à neutrons qui accrète de la matière à un taux très élevé ne devrait pas produire de sursauts de rayons X. Parce que les taux d'accrétion varient dans le temps, des surprises sont possibles. Par exemple, on soupçonnait le système Circinus X-1, dans la constellation du Compas, d'abriter un trou noir jusqu'au jour où il a commencé à produire des sursauts de rayons X.

Les trous noirs ont deux propriétés qui peuvent être utilisées pour révéler leur présence dans des systèmes binaires : l'absence de surface dure et une



TROIS TYPES D'ACCRETION se distinguent par l'émission de rayonnement. Quand du gaz tombe en spirale sur une étoile à neutrons, il libère une grande partie de son énergie lors de l'impact (à gauche). En revanche, le gaz qui spirale vers un trou noir ne subit pas d'impact : il disparaît de l'autre côté de l'horizon. Soit le gaz libère

une grande partie de son énergie avant d'atteindre l'horizon (au centre) : c'est le cas lorsque le gaz est dense, et donc les atomes du gaz entrent en collision. Soit le gaz emporte l'énergie avec lui dans le trou noir (à droite). Les astronomes peuvent utiliser ces différences pour déduire la nature de l'objet auquel ils ont affaire.

masse non bornée. La masse d'un trou noir dépend de la façon dont il s'est formé, en particulier de la masse de l'étoile qui lui a donné naissance, et par la quantité de matière qu'il a avalée. Aucun principe de la physique ne détermine jusqu'où peut aller la masse d'un trou noir. En revanche, d'autres objets compacts, telles les étoiles à neutrons, ne peuvent pas avoir des masses arbitrairement grandes.

La masse de tout objet, sauf un trou noir, est limitée par sa capacité à résister à son propre poids. Dans les étoiles ordinaires, les mouvements thermiques des particules (alimentés par la fusion thermonucléaire) créent une pression qui empêche l'effondrement. Mais les étoiles mortes, notamment les étoiles à neutrons et les naines blanches, ne produisent pas d'énergie. Dans ce cas, la pression, dite de dégénérescence, qui s'oppose à la gravité résulte d'interactions quantiques aux densités extrêmes.

Ces interactions sont fondées sur le principe d'exclusion de Pauli qui interdit aux particules de spin demi-entier (des fermions, tels les électrons) de se trouver sur le même état quantique (voir *Les étoiles à neutrons*, par J. Novak, page 22). Ainsi, comme l'a montré Subrahmanyan Chandrasekhar en 1930, la masse d'une naine blanche est nécessairement inférieure à 1,4 masse solaire.

Résister à la pesanteur

Dans les étoiles à neutrons, les densités sont telles que même la dégénérescence des électrons ne peut pas lutter contre la gravité. Les atomes s'effondrent sur eux-mêmes, les protons et les électrons se compressent pour former des neutrons, et les noyaux atomiques se fissionnent. Le tout forme une boule de neutrons. Les particules ne peuvent pas toutes occuper le même niveau d'énergie, et elles s'entassent, créant une pression vers l'extérieur.

Les propriétés de la matière nucléaire dégénérée sont mal connues parce que les interactions fortes entre les neutrons (et les quarks qui les constituent)

doivent être prises en compte. Pour cette raison, les astrophysiciens ignorent la masse maximale d'une étoile à neutrons, même si un argument simple permet d'estimer le maximum absolu.

Dans une étoile dégénérée, l'attraction gravitationnelle augmente avec la masse. Pour résister à cette attraction qui augmente, la matière doit se « raidir ». Au-dessus d'une masse critique, elle deviendrait si raide que le son se propagerait à des vitesses supérieures à celle de la lumière, ce qui est contraire aux principes fondamentaux de la relativité. Cette masse critique est d'environ six masses solaires. Un calcul plus détaillé, effectué par des groupes américains,

Par élimination, les trous noirs, ou les « candidats trous noirs », sont des objets compacts dont la masse est supérieure à trois masses solaires.

français et japonais, donne une masse maximale inférieure à trois masses solaires. Les étoiles à neutrons connues ne dépassent jamais deux masses solaires.

Par élimination, les astronomes nomment trous noirs (ou par prudence, « candidats trous noirs ») des objets compacts dont la masse est supérieure à trois masses solaires. Dans les systèmes binaires, les mesures des vitesses des étoiles, combinées aux lois du mouvement orbital de Kepler, posent une limite inférieure sur les masses stellaires. Aujourd'hui, on connaît une vingtaine de binaires sources transitoires de rayons X dont l'objet compact remplit ce critère de trou noir. Avec quelques hypothèses supplémentaires, on a estimé que la masse de ces trous noirs est en fait comprise entre 4 et 12 masses solaires.

L'identification de ces objets en tant que trous noirs serait plus fiable si l'on pouvait montrer qu'ils sont dépourvus de surface dure, à l'inverse des étoiles

Un trou noir pris sur le vif

Pour les astronomes qui essaient d'observer des trous noirs en train d'avaloir de l'énergie, le meilleur endroit où chercher est une source transitoire de rayons X. En une semaine, cet objet céleste multiplie par 100 000 son émission de rayons X et par 100 sa luminosité dans le visible. Il reste brillant pendant une année environ avant de s'éteindre doucement et de sombrer à nouveau dans l'oubli, où il pourra alors rester une décennie ou un siècle avant un nouveau coup d'éclat. D'autres sources variables de rayons X, comme les sursauteurs X et les pulsars X, ne présentent pas ces augmentations de luminosité intenses, longues et rares.

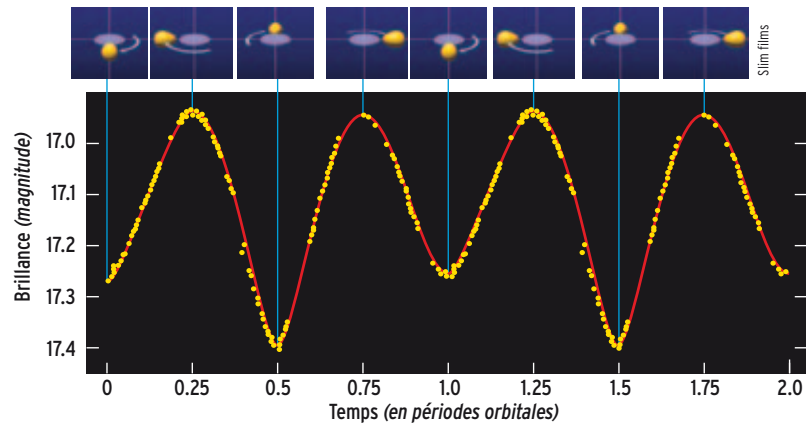
Les astronomes estiment que notre Galaxie recèle quelques milliers de sources transitoires de rayons X dormantes qui restent à découvrir. Une vingtaine de ces objets ont été pris sur le vif. Il s'agit à chaque fois d'un objet compact (un trou noir ou une étoile à neutrons) en train d'arracher et d'accréter du gaz de leur malheureux compagnon.

De tous ces systèmes, aucun n'a livré autant de trésors que le système transitoire à trou noir GRO J1655-40, découvert en 1994 par Shuang Nan Zhang, du Centre Marshall de vol spatial de la NASA, et ses collaborateurs à l'aide du satellite CGRO (*Compton Gamma-Ray Observatory*, soit Observatoire Compton de rayons gamma). Depuis, les astronomes ont observé plusieurs choses. D'abord, des variations de vitesse orbitale de son étoile compagnon nous ont renseignés précisément sur la masse de l'objet compact. Puis des signes ont indiqué que le trou noir est en rotation rapide. Une oscillation avait son origine près du trou noir. Enfin, des jets de matériau jaillissaient à une vitesse proche de la lumière.

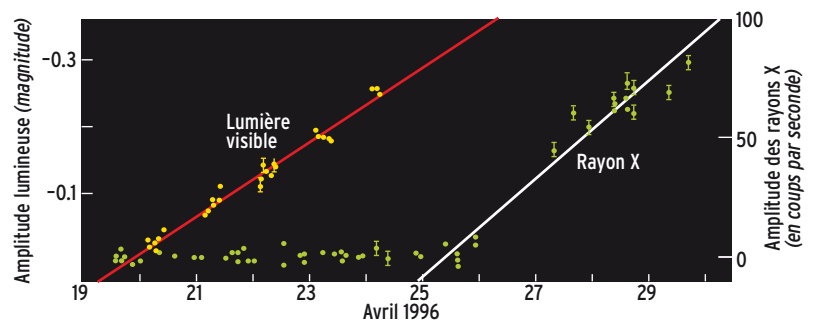
La vitesse du compagnon a fixé une limite inférieure pour la masse de l'objet compact : 3,2 fois celle du Soleil. Il fut difficile d'améliorer l'estimation de la masse, car elle dépendait de la valeur de deux quantités supplémentaires : la masse de l'étoile et l'inclinaison de l'orbite par rapport à notre ligne de visée. Celles-ci ont été déterminées à partir de changements d'intensité lumineuse de l'étoile pendant sa révolution autour du trou noir (voir la figure ci-contre en haut). L'intensité maximum correspondait à l'étoile (qui était étirée par la gravité du trou noir) vue par le travers. Le minimum suivait un quart d'orbite plus loin quand l'étoile était vue quand son grand axe est aligné avec la ligne de visée. Par un coup de chance, le plan orbital et le disque d'accrétion étaient presque dans l'axe de notre ligne de visée. De plus, la surface de l'étoile compagnon était dépourvue d'imperfections, comme les taches stellaires. Grâce à ces informations, nous avons obtenu la mesure la plus précise jamais faite pour un candidat trou noir : 7,0 masses solaires.

Affichant un comportement sans précédent pour une source transitoire de rayons X, GRO J1655-40 a connu deux éruptions rapprochées en 1994 et en 1996. L'augmentation régulière de luminosité dans le visible a commencé six jours avant le début de l'éruption en rayons X le 25 avril 1996 (voir la figure ci-contre, en bas). Ce délai correspondait au temps dont la matière a besoin pour diffuser vers l'intérieur et épaissir le gaz près du trou noir. La forme du spectre des rayons X suggère que le trou noir tourne à près de 90 pour cent du taux maximum possible.

Quatre mois plus tard, Ronald Remillard, de l'Institut de technologie du Massachusetts, et ses collaborateurs, utilisant le satellite *RXTE* (*Rossi X-ray Timing Explorer*), ont détecté des oscillations occasionnelles des rayons X. Avec près de 300 occurrences par seconde, ces vibrations étaient les plus rapides jamais vues dans un système à trou noir. D'après la théorie, la fréquence de vibration dépend du rayon de l'horizon des événements du trou noir, qui à son tour dépend de la masse et de la vitesse de rotation du trou noir. En utilisant la masse mesurée pour ce système, les astronomes tentent aujourd'hui de déterminer, pour la première fois de façon fiable, la vitesse de rotation d'un trou noir.



LES OSCILLATIONS DE LUMINOSITÉ de l'étoile compagnon ont permis aux astronomes de « peser » le trou noir du système binaire GRO J1655-40. Une étoile ne devrait pas s'illuminer et s'assombrir de la sorte, mais celle-ci a été déformée par la gravité du trou noir. À l'instar d'une poire, elle est plus grosse quand on la voit par le côté et semble donc émettre davantage de lumière. La période orbitale renseigne sur la masse du trou noir.

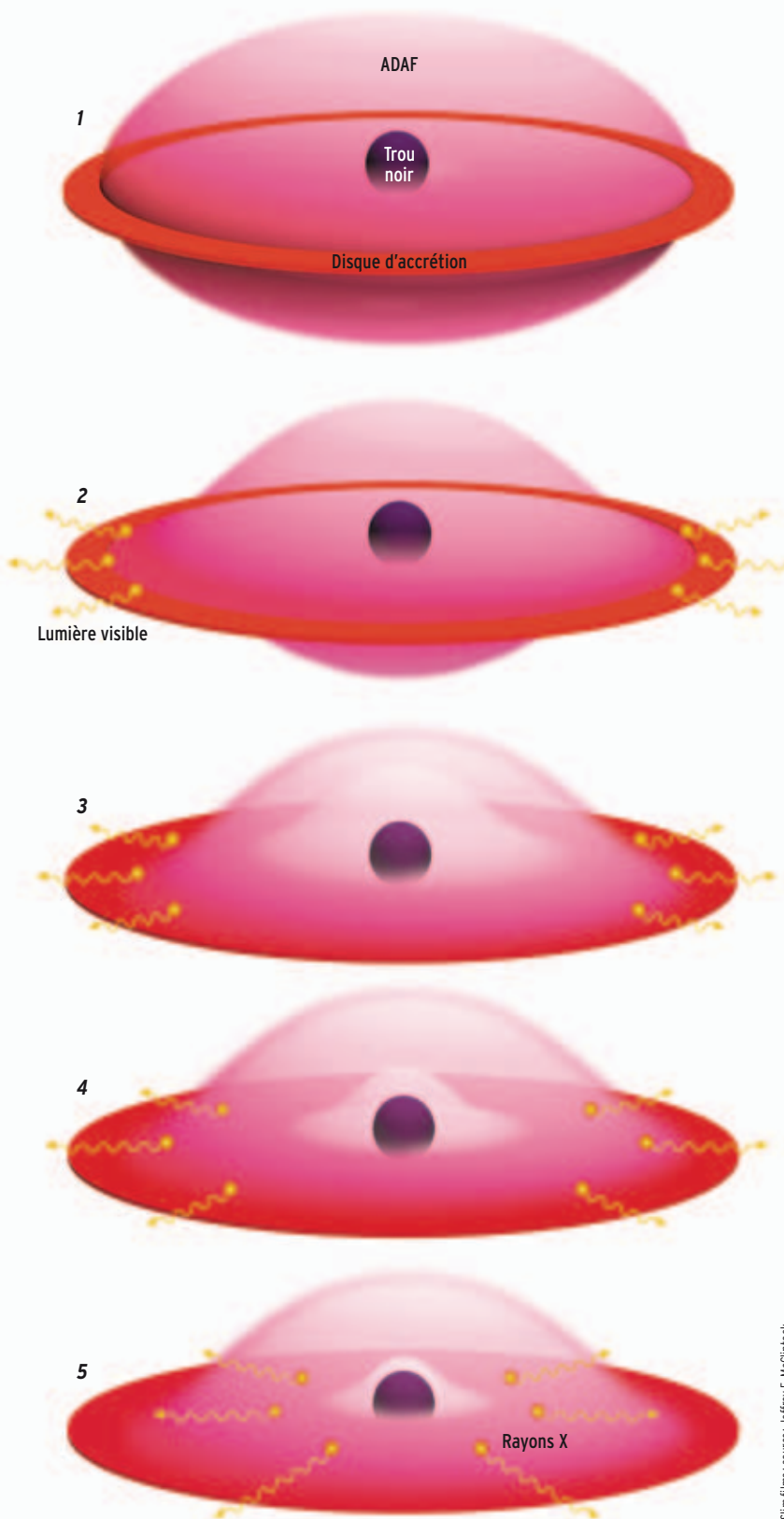


SIX JOURS après avoir briller en lumière visible (à gauche), le système binaire GRO J1655-40 a également émis un flot de rayons X (à droite).

Pendant plusieurs mois après le sursaut, deux jets de matière, de part et d'autre de la source, ont été éjectés du système à 92 pour cent de la vitesse de la lumière. L'accélération de cette matière a probablement eu lieu au niveau du bord interne du disque d'accrétion, où le gaz est nécessairement en orbite autour du trou noir à une vitesse proche de celle de la lumière.

Le système a maintenant retrouvé son état de quiescence. Au lieu de décrire une spirale vers l'intérieur tout en déversant des rayons X, le gaz situé autour du trou noir plonge directement sans avoir le temps de rayonner avant d'être avalé. Dans le processus, les atomes du gaz et quelque 99,9 pour cent de leur énergie sont siphonnés : ils disparaissent de notre Univers et ne seront jamais revus !

Jeffrey McClintock
est astrophysicien
au Centre Harvard-Smithsonian d'astrophysique



Slim films; source: Jeffrey E. McClintock

L'ÉCOULEMENT D'ACCRETION dans un système à source transitoire de rayons X est constitué d'un gaz sphéroïdal ténu et brûlant (*en rose*) entouré d'un disque d'accrétion plat, dense et froid (*en rouge*). Dans son état habituel au repos (1), le gaz chaud tombe vers le trou noir en n'émettant qu'une petite quantité de rayonnement. Les astronomes nomment ce phénomène ADAF (*Advection-Dominated Accretion Flow*, soit Écoulement d'accrétion dominé par l'advection). Toutefois, pendant une éruption, le disque instable chauffe et commence à briller en lumière visible (2). Le bord interne du disque s'avance vers le trou noir (3, 4 et 5), remplaçant l'ADAF jusqu'à ce qu'il commence à émettre des rayons X. Ce modèle explique le décalage de six jours entre les bouffées de lumière visible et de rayons X que les astronomes ont observé sur GRO J1655-40.

à neutrons. L'horizon d'un trou noir est simplement une surface de non-retour : tout ce qui la traverse est irrémédiablement perdu pour l'Univers.

Quand une boule de plasma chaud qui tombe dans un trou noir n'a pas suffisamment de temps pour rayonner son énergie thermique, la chaleur sera capturée en même temps que la matière. Son énergie ne sera jamais détectée, on dit qu'elle est « advectée » à travers l'horizon, et disparaît. Cette fuite ne viole pas le principe de conservation de l'énergie de masse, car l'énergie thermique est incorporée dans la masse du trou. Mais ce phénomène diminue de beaucoup l'efficacité apparente du moteur qu'est le trou noir. En revanche, lorsque du plasma chaud tombe sur une étoile à neutrons, toute son énergie thermique finit par être rayonnée vers l'extérieur, soit par le plasma lui-même, soit par la surface de l'étoile à neutrons.

Par conséquent, les trous noirs et les étoiles à neutrons devraient être plus faciles à distinguer lorsque la matière qu'ils accrètent n'arrive pas, pour une raison ou une autre, à se débarrasser de sa chaleur avant de rencontrer l'horizon ou la surface. En 1995 à Kyoto, j'ai nommé ces écoulements ADAF (*Advection-Dominated Accretion Flows*, soit Écoulements d'accrétion dominés par l'advection). Les plasmas très chauds et très ténus sont des exemples de mauvais radiateurs. Pour cette raison, les astronomes ont cherché des sources de rayons gamma et X qui semblent plus faibles qu'elles ne devraient l'être si leur efficacité radiative était d'une dizaine de pour cent.

À vau-l'eau

La matière qui chute vers un objet compact ne tombe pas directement. À cause de la conservation du moment angulaire, elle se fixe sur des orbites à peu près circulaires. De là, elle ne peut tomber davantage que si une friction lui soustrait du moment angulaire. La friction a également pour effet de chauffer le gaz qui accrète. Le gaz qui se refroidit efficacement perd de l'énergie orbitale et forme une surface plate et fine, un disque d'accrétion. On a observé de tels disques d'accrétion dans de nombreux systèmes binaires. À l'inverse, quand le refroidissement est inefficace, comme avec les ADAF, la matière prend une forme presque sphérique.

Dès 1977, Setsuo Ichimaru, de l'Université de Tokyo, a utilisé ce modèle d'ADAF pour expliquer certaines propriétés de la binaire massive Cygnus X-1, qui contient le premier candidat trou noir reconnu. Mais ses travaux sont passés inaperçus. L'intérêt pour les ADAF est revenu en 1994 avec des modèles théoriques simples d'ADAF optiquement fins proposés par Ramesh Narayan et Insu Yi, de l'Université Harvard, et par une équipe composée de Marek Abramowicz et Ximing Chen, de l'Université de Göteborg, de Shoji Kato, de l'Université

de Kyoto, et de Oded Regev, de l'Institut *Technion*, et de moi-même. Grâce à nous, ainsi qu'à Ann Esin, Rohan Mahadevan et Jeffrey McClintock, du Centre Harvard-Smithsonian d'astrophysique (le CfA), et Fumio Honma, de l'Université de Kyoto, les modèles d'ADAF ont eu plusieurs succès. Par exemple, ils expliquent le spectre de notre Centre galactique, confirmant une suggestion faite par Martin Rees, de l'Université de Cambridge, en 1982.

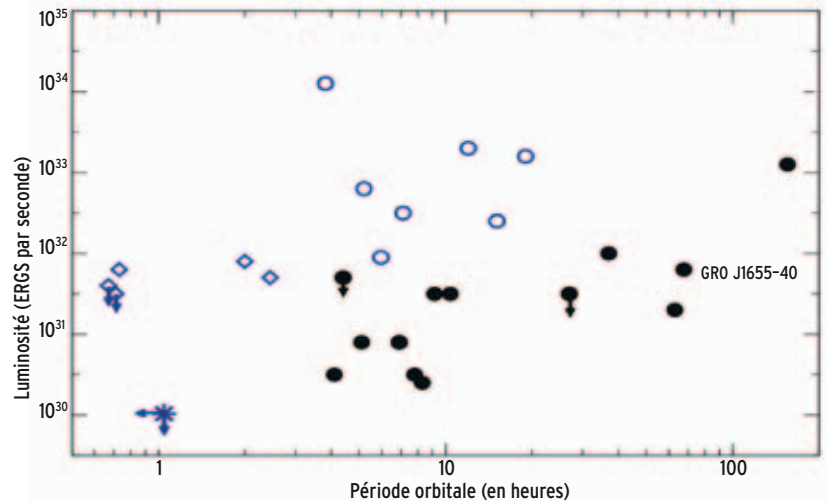
Un type de système binaire, nommé source transitoire de rayons X au repos, semble impliquer un écoulement d'accrétion à deux composantes. La partie interne est un ADAF; la partie externe forme un disque d'accrétion plat. Ces systèmes sont le plus souvent en quiescence : la majeure partie du faible rayonnement observé est alors émise par l'ADAF. Occasionnellement, ils émettent une intense bouffée de rayonnement. Parce que les ADAF sont par nature stables, ces éruptions doivent être déclenchées dans le disque externe.

Le 20 avril 1996, J. McClintock, Ronald Remillard, de l'Institut de technologie du Massachusetts, Jerome Orosz, de l'Université de l'État de Pennsylvanie, et Charles Bailyn, de l'Université Yale, observaient la source transitoire de rayons X GRO J1655-40. Ce qu'ils détectaient les laissait perplexes, mais ils se sont rendus compte que, par un coup de chance, ils étaient tombés sur un événement très rare : une éruption. Pendant cinq jours, le système était devenu très brillant en lumière visible, sans être détecté en rayons X (*voir l'encadré page 77*).

À l'aube du sixième jour

Puis, le sixième jour, le système a commencé à émettre fortement en rayons X. Comme nous l'avions montré avec Jean-Marie Hameury, de l'Observatoire de Strasbourg, J. McClintock et R. Narayan, le délai était conforme aux modèles d'écoulement d'accrétion à deux composantes. Le disque externe, loin du trou noir, émet de la lumière, mais pas de rayons X. Ainsi, quand une bouffée commence, elle n'est vue que dans les longueurs d'onde visibles. Ensuite, de la matière diffuse vers le trou noir plus rapidement, et la région ADAF ténue se remplit jusqu'à ce qu'elle commence à émettre des rayons X. Les observations étaient une confirmation aussi belle qu'inattendue de cette théorie (*voir la figure page ci-contre*).

En utilisant les sources transitoires de rayons X au repos, R. Narayan, J. McClintock et Michael Garcia du CfA ont été les premiers à avancer un critère quantitatif pour distinguer les objets à surface dure (les étoiles à neutrons) et les autres (des trous noirs). Plus tard, nous avons proposé un critère différent fondé sur le fait que les sources transitoires à étoiles à neutrons au repos devraient être plus brillantes que les trous noirs qui accrètent



LA PREUVE DE L'EXISTENCE DES TROUS NOIRS est venue d'une comparaison de la brillance (axe vertical) d'objets de masse supérieure à trois masses solaires (les cercles noirs) et ceux de masse inférieure (les cercles et losanges blancs, ces derniers représentant les pulsars milliseconde). Les corps les plus lourds sont moins brillants que les plus légers même s'ils ont la même période orbitale (axe horizontal). Pourtant deux objets de même période orbitale ont le même taux d'accrétion de matière et devraient donc émettre approximativement la même quantité de rayonnement. La divergence s'explique par la disparition de matière et d'énergie, ce que seul un trou noir peut accomplir. Les flèches indiquent les limites supérieures d'une mesure tandis que l'astérisque correspond à une étoile à neutrons qui a complètement disparu du ciel X. Elle est probablement membre d'une binaire ultracompacte dont la période est de l'ordre d'une dizaine de minutes. On ne connaît pas de trous noirs inclus dans de tels systèmes, ce qui interdit la comparaison des luminosités.

de la matière à la même vitesse. Bien que le taux d'accrétion ne puisse pas être mesuré directement, la période orbitale peut servir d'intermédiaire, parce que deux objets de même période devraient avaler la matière à peu près au même rythme. En rassemblant tous ces éléments, on s'attend à ce que les systèmes à trou noir soient moins brillants que les systèmes à étoile à neutrons de même période orbitale. Parce qu'on ne connaît la période que pour une poignée de ces systèmes, la différence attendue n'est pas encore bien établie. Néanmoins, les trous noirs confirmés sont en effet plus pâles que les étoiles à neutrons (*voir la figure ci-dessus*).

Bien que des travaux récents aient mis en doute le modèle ADAF simple parce qu'il ne prend pas en compte la perte de masse par vents, les modèles plus généraux nécessitent encore la présence d'un trou noir pour reproduire les observations. La modélisation des écoulements vers les trous noirs reste un domaine de recherche actif. En tous les cas, les corps trop massifs pour être des étoiles à neutrons peuvent désormais être promus de la catégorie « candidats trous noirs » à celle de « trous noirs confirmés. » Seul un objet avec un horizon des événements peut faire disparaître l'énergie de la façon que les astronomes infèrent pour ces systèmes. Les observations à venir par les observatoires en orbite de rayons X comme *Chandra* et XMM devraient allonger la liste. Les trous noirs sont toujours noirs, mais ils ne peuvent plus se cacher derrière leur camouflage. Nous sommes en train d'apprendre à les démasquer. ■

livres

- R. WALD (Ed.), *Black Holes and Relativistic Stars*, University of Chicago Press, 1998.
- M. BEGELMAN et M. REES, *Gravity's Fatal Attraction: Black Holes in the Universe*, W. Freeman & Co, 1998.
- S. SHAPIRO et S. TEUKOLSKY, *Black Holes, White Dwarfs, and Neutron Stars: The Physics of Compact Objects*, John Wiley & Sons, 1983.

articles

- J. MCCLINTOCK, *Probing strong gravitational fields in X-ray novae*, in *Accretion Processes in Astrophysical Systems: Some Like It Hot!* S. Holt et T. Kallman, American Institute of Physics, 1998. xxx.lanl.gov/abs/astro-ph/9802080
- J.-P. LASOTA, *ADAFs: Models, observations and problems*, in *Physics Reports*, vol. 311(3-5), pp. 247-258, 1999. xxx.lanl.gov/abs/astro-ph/9806064