

Les sources de rayonnement X mou

PETER KAHABKA • EDWARD VAN DEN HEUVEL • SAUL RAPPAPORT

Des systèmes d'étoiles doubles où une naine blanche arrache les couches externes de son compagnon sont à l'origine de phénomènes variés, de l'émission intense de rayonnements X de faible énergie à des explosions de supernovae.

Depuis les années 1930, les astronomes savent que la lumière des étoiles est produite par la fusion nucléaire qui se déroule dans leur cœur. Ainsi, au centre du Soleil, 600 millions de tonnes d'hydrogène se transforment chaque seconde en hélium. Cette réaction dégage de l'énergie sous forme de rayonnements X et gamma, qui diffusent vers la surface à travers d'épaisses couches de gaz, où ils sont partiellement transformés en lumière visible.

Récemment, on a découvert une nouvelle catégorie d'étoiles où la fusion nucléaire ne se déroule pas dans le cœur, mais dans les couches externes. Ces étoiles sont des naines blanches (des étoiles denses ayant épuisé leur carburant nucléaire) en orbite autour d'étoiles ordinaires : la naine blanche attire le gaz des couches externes de son compagnon, surtout de l'hydrogène, et, quand l'hydrogène accumulé en surface est suffisamment comprimé, la fusion commence. Il en résulte une émission de rayonnement X «mou», c'est-à-dire de relativement faible énergie. En prenant du poids, ces naines blanches deviennent parfois instables, se contractent en étoiles à neutrons, encore plus denses, ou explosent.

Par ailleurs, on supposait depuis longtemps que les supernovae de type Ia étaient des explosions de naines blanches. Les sources de rayonnement X mou sont les premiers systèmes stellaires dont on sache qu'ils engendrent de telles explosions. Comme la luminosité des

supernovae de type Ia est utilisée comme référence pour la mesure des distances des galaxies lointaines et, donc, de la vitesse de l'expansion cosmique, l'analyse des sources de rayons X mous devrait préciser l'âge et la vitesse d'expansion de l'Univers.

Un satellite pour les mous

L'histoire des sources de rayonnement X mou a commencé avec le lancement du satellite allemand *ROSAT*, en 1990. Cet observatoire en orbite autour de la Terre a dressé la première carte complète du ciel en rayonnement X mou, domaine du spectre électromagnétique compris entre le rayonnement ultraviolet et le rayonnement X «dur», où l'énergie des photons est comprise entre 100 et 2 500 électronvolts. Excepté l'Observatoire *Einstein* de la NASA et un instrument de l'Observatoire européen *EXOSAT*, qui couvraient la gamme d'énergies de 200 à 4 000 électronvolts, tous les satellites précédents équipés de détecteurs X observaient dans une gamme de rayonnement X dur, d'énergie supérieure.

L'équipe de *ROSAT* a rapidement remarqué quelques astres étranges dans le Grand Nuage de Magellan, petite galaxie satellite de la Voie lactée : ces astres émettaient un rayonnement X très intense (leur puissance était 5 000 à 20 000 fois supérieure à celle du Soleil), mais à des énergies anormalement basses. Les sources de rayonnement X brillantes ont, en général, des spectres durs, dont les intensités

maximales sont réparties entre 1 000 et 20 000 électronvolts. Ces rayons X sont produits par des gaz chauffés à des températures de 10 millions à 100 millions de kelvins. Elles correspondent à des systèmes doubles : une étoile à neutrons ou un trou noir arrachent les couches externes de l'autre étoile. Or, les spectres observés des nouvelles étoiles, à des énergies inférieures à celles des autres sources X brillantes, correspondaient à des températures de quelques centaines de milliers de kelvins seulement.

En fait, après les découvertes de *ROSAT*, des recherches dans les archives ont révélé que deux de ces sources de rayonnement X de basse énergie avaient été découvertes dix ans auparavant, à l'aide de l'Observatoire *Einstein*. Ces sources, nommées CAL 83 et CAL 87, avaient été classées avec les autres sources intenses du Grand Nuage de Magellan, malgré la mollesse inhabituelle de leurs spectres.

À l'époque, des astrophysiciens avaient supposé que CAL 83 et CAL 87 étaient des systèmes doubles où un trou noir



1. UNE NAINE BLANCHE en orbite autour d'une géante rouge forme un système double symbiotique. En raison de sa forte attraction gravitationnelle, la naine blanche attire les couches externes de la géante rouge. Le gaz ainsi capté forme un disque autour de la naine blanche et finit par tomber à sa surface, où il peut subir une fusion nucléaire. Il émet alors un rayonnement X de faible énergie, mais de grande intensité.

absorbait le gaz dont était constitué l'autre étoile : les trous noirs émettent généralement des rayons X de plus basse énergie que les étoiles à neutrons dans des systèmes doubles. Cette hypothèse fut corroborée dans les années 1980 par la découverte d'étoiles qui émettaient une faible lumière visible, à l'endroit des deux sources. L'éclat des étoiles oscillait, ce qui est caractéristique d'un système double : en orbite l'une autour de l'autre, les étoiles s'occultent périodiquement. Ces étoiles visibles pouvaient donc alimenter en gaz les trous noirs autour desquels elles auraient été en orbite. Les périodes d'oscillation de l'éclat de ces étoiles ont été mesurées en 1988 : un peu plus d'un jour pour CAL 83, et 11 heures pour CAL 87. Les diverses mesures indiquaient des masses de 1,2 à 2,5 fois celle du Soleil.

Les observations de ROSAT remettaient toutefois cette explication en question. Les sources de rayonnement X de faible énergie étaient beaucoup plus froides que n'importe quel système double à trou noir connu. En outre, comme les étoiles émettent une puissance proportionnelle à leur température à la puissance quatre, on peut calculer la surface d'une étoile (et, en supposant qu'elle est sphérique, son diamètre) en divisant l'émission totale de l'étoile par cette énergie : on a ainsi déterminé que CAL 83, CAL 87 et les autres sources de rayonnement X mou du Nuage de Magellan ont des diamètres de 10 000 à 20 000 kilomètres. Cette taille, qui est celle d'une naine blanche, est 500 à 1 000 fois supérieure à celle d'une étoile à neutrons ou à l'horizon d'un trou noir de la masse d'une étoile.

Des naines rayonnantes

Deux autres modèles ont alors été proposés. Certains ont supposé que ces sources de rayonnement X de faible énergie étaient des naines blanches qui arrachaient les couches externes d'une étoile compagne, et qui émettaient un rayonnement X quand ce gaz s'écrasait sur leur surface. D'autres pensaient que ces sources étaient des étoiles à neutrons entourées d'une

enveloppe gazeuse de 10 000 kilomètres d'épaisseur. Dans les deux cas, la gravité fournissait l'énergie nécessaire à l'émission du rayonnement X : le champ gravitationnel de la naine blanche ou de l'étoile à neutrons capte la matière du compagnon, et l'énergie cinétique de cette matière est transformée en chaleur et en rayonnement lors des collisions avec la surface ou au sein du gaz.

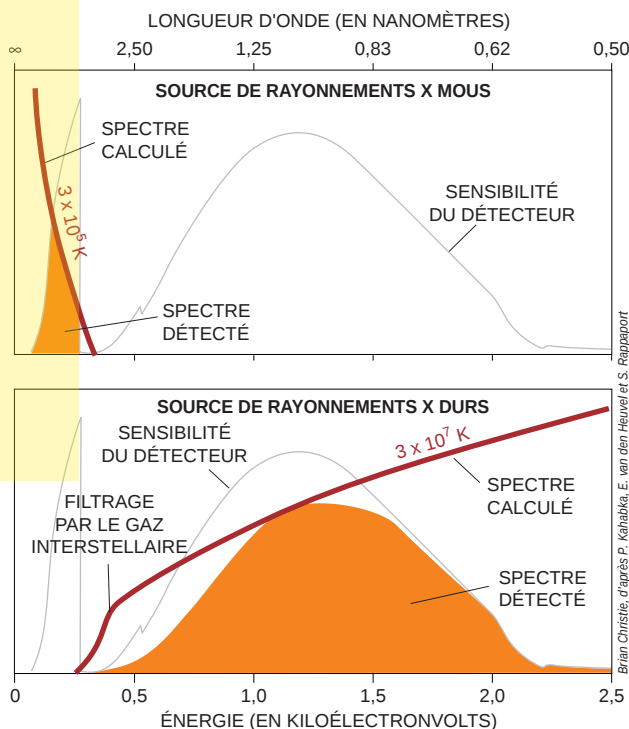
Toutefois, l'analyse détaillée montra qu'aucune de ces deux explications ne convenait. Les sources de rayonnement X de faible énergie émettent à peu près avec la même intensité que les étoiles à neutrons qui arrachent les couches externes d'une étoile compagne. Pourtant la collision d'un volume de gaz avec une étoile à neutrons dégage 500 à 1 000 fois plus d'énergie que la collision du même volume avec une naine blanche, à la surface de laquelle la gravité est inférieure (l'énergie potentielle de gravitation à la surface d'une étoile de masse donnée est inversement proportionnelle à son rayon). Donc, pour qu'une naine blanche émette avec la même intensité

qu'une étoile à neutrons, elle devrait arracher 500 à 1 000 fois plus de matière par unité de temps. Un tel flot de gaz, dont la masse serait plusieurs fois celle de la Terre par an, serait si dense qu'il absorberait tout le rayonnement X émis.

D'autre part, d'énormes enveloppes de gaz, de 10 000 kilomètres de diamètre, autour d'étoiles à neutrons d'une dizaine de kilomètres de diamètre seraient instables : elles s'effondreraient et, éventuellement, seraient expulsées par l'onde de choc engendrée par l'effondrement en quelques minutes, voire en quelques secondes. Or, on voit briller CAL 83 et CAL 87 depuis dix ans, et l'on a calculé que la nébuleuse de gaz ionisé qui entoure CAL 83 s'est formée en plusieurs dizaines de milliers d'années.

Les astrophysiciens ont alors compris que la chute de l'hydrogène sur une étoile à neutrons ou dans un trou noir diffère beaucoup de la chute sur une naine blanche. Dans le premier cas, la collision dégage plus d'énergie que la fusion nucléaire de la même quantité d'hydrogène, tandis que, dans le second cas, elle en dégage moins. La fusion libre en effet 0,7 pour cent de l'énergie contenue dans la masse (selon la célèbre relation $E = mc^2$, où E est l'énergie, m la masse et c la vitesse de la lumière). La chute sur une étoile à neutrons ou dans un trou noir en libère respectivement 10 et 46 pour cent, tandis que la chute d'hydrogène sur une naine blanche ne libère qu'environ 0,01 pour cent de l'énergie contenue dans la masse.

Si l'hydrogène fusionne après sa chute sur une naine blanche, l'énergie émise sous forme de rayonnement sera donc bien visible, tandis qu'elle passerait inaperçue dans le spectre d'une étoile à neutrons ou d'un trou noir. Si de l'hydrogène s'accumule à la surface d'une naine blanche et que la fusion nucléaire commence, une masse équivalente à 0,03 fois celle de la Terre par an seulement suffit à rendre compte de la luminosité du rayonnement X de faible énergie que l'on observe. Comme le flot de gaz incident est peu dense, le rayonnement X le traverse sans difficulté et parvient jusqu'à nous.



2. LES SOURCES DE RAYONNEMENT X MOUS ET DURS se distinguent par leur spectre. Les sources de rayonnements X mous (en haut) émettent des rayonnements X d'énergies relativement faibles, car leur température est basse : 300 000 kelvins. Les sources caractéristiques de rayonnements X durs (en bas) sont 100 fois plus chaudes ; elles émettent des rayonnements X d'énergie supérieure. Dans les deux cas, le spectre intrinsèque de la source (courbes rouges) est déformé par le détecteur du satellite ROSAT (courbes grises) et par l'absorption due au gaz interstellaire.