

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.

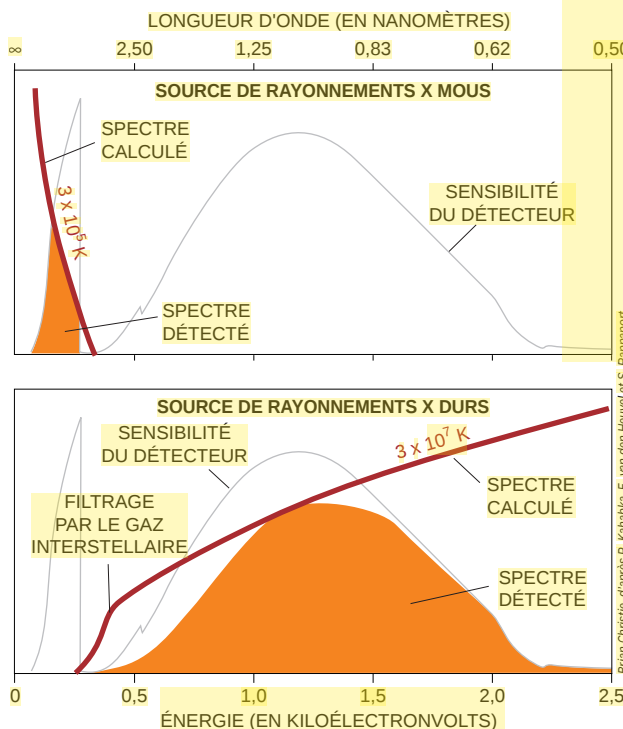
Toutefois, l'analyse détaillée montra qu'aucune de ces deux explications ne convenait. Les sources de rayonnement X de faible énergie émettent à peu près avec la même intensité que les étoiles à neutrons qui arrachent les couches externes d'une étoile compagne. Pourtant la collision d'un volume de gaz 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.

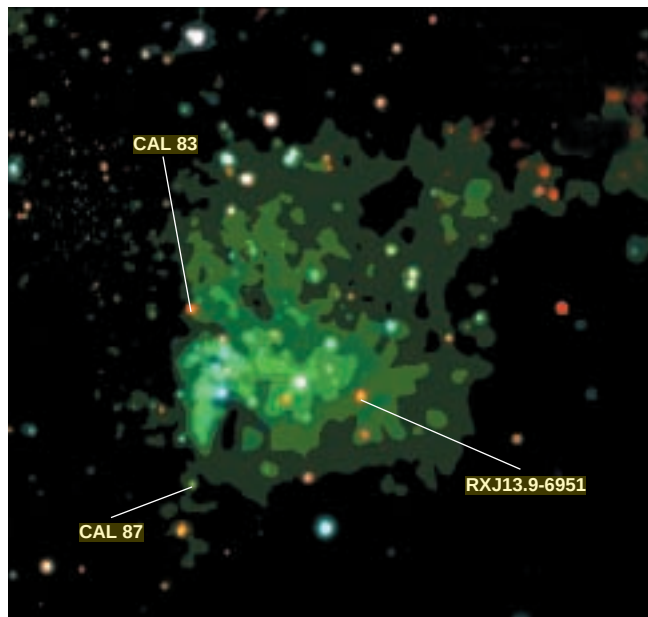
Des naines explosives?

La fusion nucléaire stable du gaz arraché par une naine blanche à une étoile compagnon pouvait donc expliquer la brillance des sources de rayonnement X mou. Était-ce la bonne explication? Ken'ichi Nomoto, de l'Université de

Tokyo, se posait la même question à propos d'un autre phénomène, les novae, au cours duquel la luminosité d'une étoile est brusquement multipliée par 10 000 sans que l'étoile soit détruite. Les novae apparaissent toujours dans des systèmes doubles serrés, constitués d'une naine blanche et d'une étoile de

type solaire. Ces systèmes binaires serrés étaient les seuls connus pour faire éventuellement des novae jusqu'à la découverte des sources de rayonnement X de basse énergie.

Depuis plus de dix ans, K. Nomoto et d'autres perfectionnaient des simulations de la fusion de l'hydrogène



3. LE GRAND NUAGE DE MAGELLAN, une galaxie satellite de la nôtre, contient des sources de rayonnement X (à gauche, en fausses couleurs, l'énergie du rayonnement augmente lorsque l'on passe du rouge au bleu). Les sources de rayonnement X de faible énergie sont des points rouges ou orange, tandis que les sources de rayonnements X durs sont bleues. La source de rayonnements X

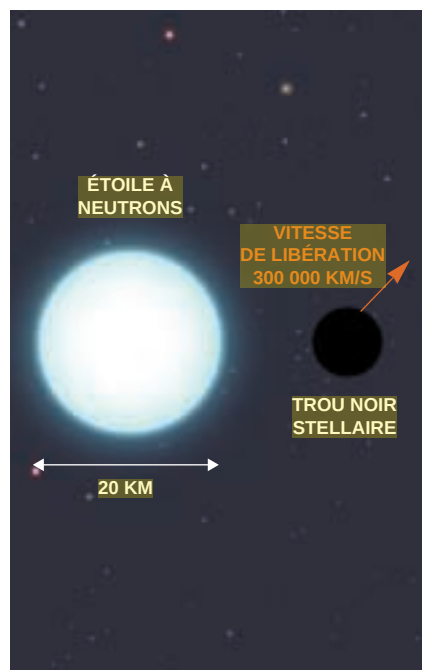


Sen Kofe, Université de Bonn

de faible énergie CAL 87 apparaît en vert, parce qu'un nuage d'hydrogène placé dans la ligne de visée modifie son émission. Certains points rouges sont en fait des étoiles de type solaire situées entre le Grand Nuage de Magellan et la Terre. L'image en rayonnement X est différente d'une photographie de la même région en lumière visible (à droite).



4. LES ÉTOILES DENSES ont des vitesses de libération considérables. Pour échapper à l'attraction gravitationnelle d'une naine blanche qui aurait la masse du Soleil dans le volume de la Terre (à gauche), un objet doit voyager à environ 6 000 kilomètres par seconde. Un objet qui tombe sur la naine blanche a environ cette même vitesse



Alfred T. Kamajian

au moment de l'impact. Les étoiles plus denses, telles les étoiles à neutrons (au centre), exercent une attraction encore plus forte. L'étoile la plus dense possible, un trou noir, est définie par une surface, un «horizon», où la vitesse de libération est égale à la vitesse de la lumière (à droite).