

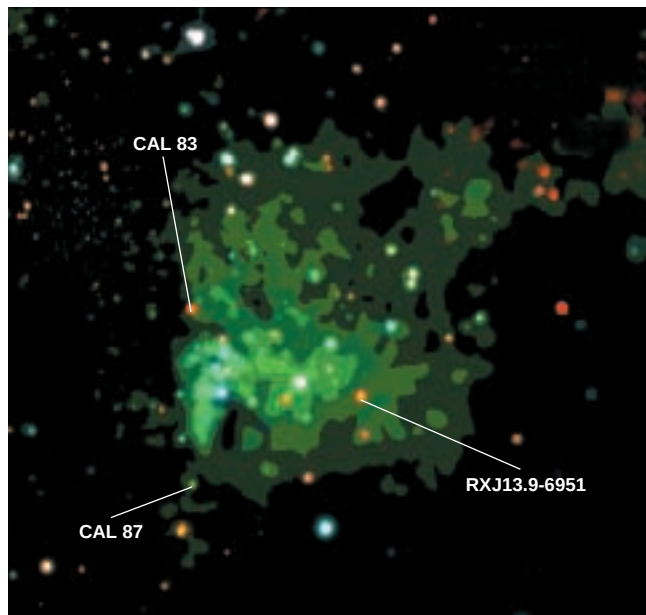
## Des naines explosives?

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.

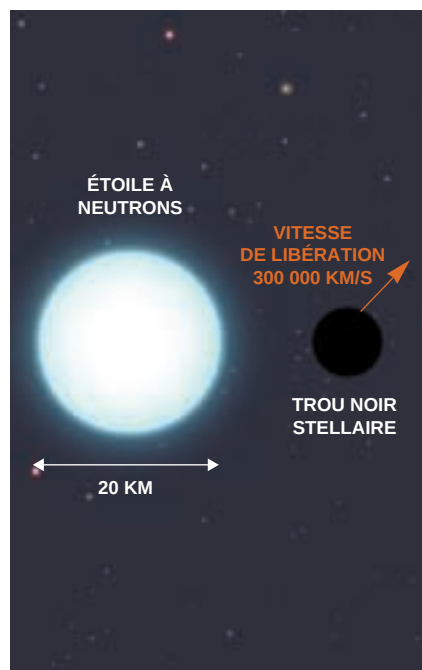
Depuis plus de dix ans, K. Nomoto et d'autres perfectionnaient des simulations de la fusion de l'hydrogène



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



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

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).

accumulé à la surface d'une naine blanche. Le mode de combustion dépend de la vitesse d'accumulation du gaz. Quand elle est inférieure à 0,003 fois la masse de la Terre par an, la fusion a lieu par à-coups : l'hydrogène reste inerte et s'accumule, souvent pendant des milliers d'années, jusqu'à ce que sa masse atteigne une valeur critique ; la fusion commence alors à la base de la couche. L'énergie libérée expulse les couches externes : cette explosion est une nova.

Quand la vitesse d'accumulation est un peu supérieure, la fusion devient cyclique et elle n'est plus explosive. Puis, plus l'accrétion est rapide, plus les cycles de combustion sont rapprochés. Au-dessus d'une vitesse limite, la fusion est permanente (pour des naines blanches de la masse du Soleil, la limite est d'environ 0,03 fois la masse de la Terre par an). Dans les simulations, la fusion engendre exactement la luminosité observée pour les sources de rayonnement X mou.

Si la vitesse d'accumulation du gaz est supérieure à 0,12 fois la masse de la Terre par an, le gaz ne s'accumule pas à la surface de la naine blanche : il l'entoure d'une enveloppe étendue. À la surface de l'étoile, une réaction de fusion stationnaire se poursuit, mais l'enveloppe épaisse dégrade le rayonnement X en rayonnement ultraviolet et visible. Le rayonnement est par ailleurs si intense que sa pression souffle une partie du gaz de l'enveloppe dans un vent stellaire.

Si la vitesse d'accumulation fluctue autour de 0,12 fois la masse de la Terre par an, le système peut alterner entre des phases d'émission de rayonnement X et des phases de rayonnement visible. Un tel comportement a été observé dans la source de rayonnement X supermou RXJ0513.9-6951, dont les épisodes d'émission X durent plusieurs semaines et sont entrecoupés d'arrêts de plusieurs mois. Ces allumages et ces extinctions ont intrigué les astronomes jusqu'à ce qu'ils remarquent que la luminosité de cette étoile fluctue

aussi aux longueurs d'onde visibles. Quand la luminosité est faible aux longueurs d'onde visibles, elle est forte aux longueurs d'ondes X, et réciproquement (voir la figure 5).

Cette étoile émet aussi deux jets de matière (à une vitesse comprise entre 4 000 et 6 000 kilomètres par seconde), dans des directions opposées. De tels jets sont fréquents pour les étoiles entourées d'un disque de matière : ils jaillissent dans une direction perpendiculaire au disque, où il n'y a pas de matière incidente pour le bloquer, à une vitesse proche de la vitesse de libération à la surface de l'étoile. La vitesse de la matière dans les jets de RXJ0513.9-6951 est effectivement proche de la vitesse de libération d'une naine blanche : c'est une confirmation supplémentaire que les sources de rayonnement X de faible énergie sont des naines blanches.

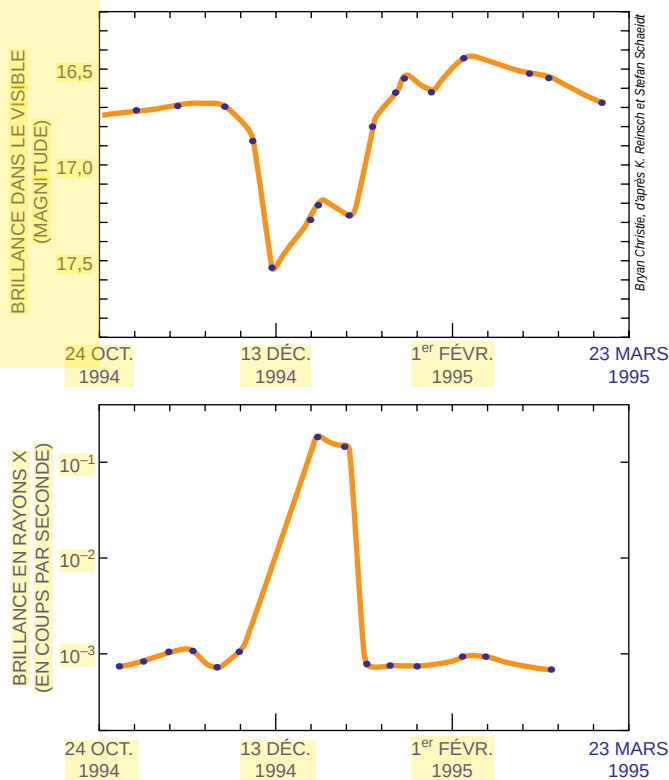
Tous les systèmes doubles n'échangent pas du gaz assez vite pour qu'ils émettent un rayonnement X mou. Si la masse de l'autre étoile est inférieure à celle de la naine blanche, ce que l'on observe dans la plupart des systèmes qui se transforment en novae, la vitesse d'accumulation est d'environ 0,0003 fois

la masse de la Terre par an seulement (pour un compagnon de la masse du Soleil). Cette vitesse est réglée par le transfert de moment cinétique qui accompagne le transfert de masse à l'intérieur du système double (ce phénomène est celui qui permet à un patineur d'accroître sa vitesse de rotation : il rapproche les bras du corps).

Lorsque la masse de l'étoile compagnon est supérieure à celle de la naine blanche, la conservation du moment cinétique du système double provoque un rétrécissement de l'orbite à mesure que de la matière est échangée : la naine blanche, qui grossit, se rapproche du centre de masse du système, situé près du compagnon. À l'intérieur d'un volume nommé « lobe de Roche », les couches externes du compagnon restent attirées par la gravité de celui-ci (la surface du lobe de Roche est l'ensemble des points où la gravité des deux étoiles se compense exactement). En revanche, le gaz situé au-dehors du lobe de Roche est attiré par la naine blanche.

## Une étoile autodestructrice

Le compagnon travaille à sa propre perte : bien qu'il perde de la masse en surface, la réaction de fusion qui a lieu dans son cœur continue à produire de l'énergie sous forme de rayonnement, et la pression de ce rayonnement sur les couches externes restantes les pousse en dehors du lobe de Roche, comme une casserole de soupe bouillante continue de déborder si l'on n'arrête pas d'en chauffer le fond. La situation ne se stabilise que lorsque la perte de masse fait suffisamment baisser la pression au cœur de l'étoile pour que la fusion ralentisse, puis s'arrête. Pour une étoile dont la masse est initialement deux fois celle du Soleil, le retour à l'équilibre – et l'arrêt de l'émission de rayonnement X de faible énergie – se produit après sept millions d'années. L'étoile ne contient alors plus qu'un cinquième de sa masse initiale ; elle est alors la moins massive du système double. Dans un tel système, la vitesse moyenne



**5. LES EXTINCTIONS PÉRIODIQUES de l'étoile RXJ0513.9-6951** indiquent qu'elle oscille entre deux comportements. Quand elle brille en lumière visible (à gauche), son rayonnement X (à droite) est faible, et réciproquement. L'étoile est alternativement une source de rayonnements X de faible énergie et de rayonnement visible. Les changements de régime sont dus à de légères variations de la vitesse d'accumulation du gaz pris par la naine blanche à l'étoile compagnon.