

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.

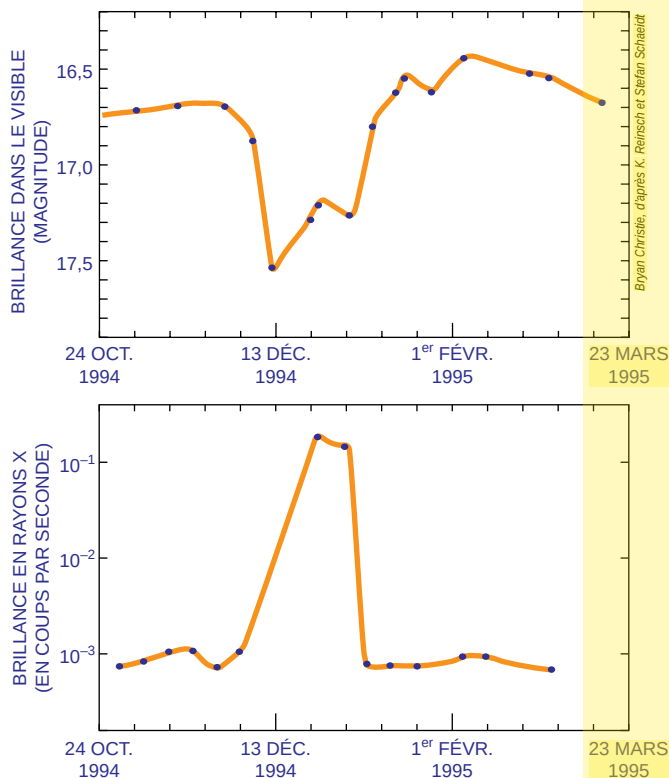
Tous les systèmes doubles n'échangent pas du gaz assez vite pour qu'ils émettent un rayonnement X mou. Si la masse de l'autre étoile est inférieure à celle de la naine blanche, ce que l'on observe dans la plupart des systèmes qui se transforment en novae, la vitesse d'accumulation est d'environ 0,0003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

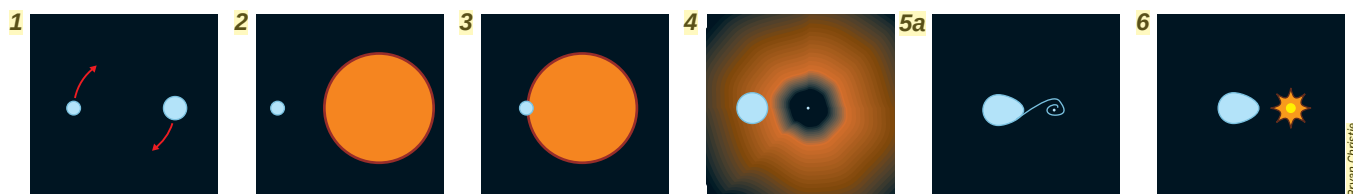
Lorsque la masse de l'étoile compagnon est supérieure à celle de la naine blanche, la conservation du moment cinétique du système double provoque un rétrécissement de l'orbite à mesure que de la matière est échangée : la naine blanche, qui grossit, se rapproche du centre de masse du système, situé près 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

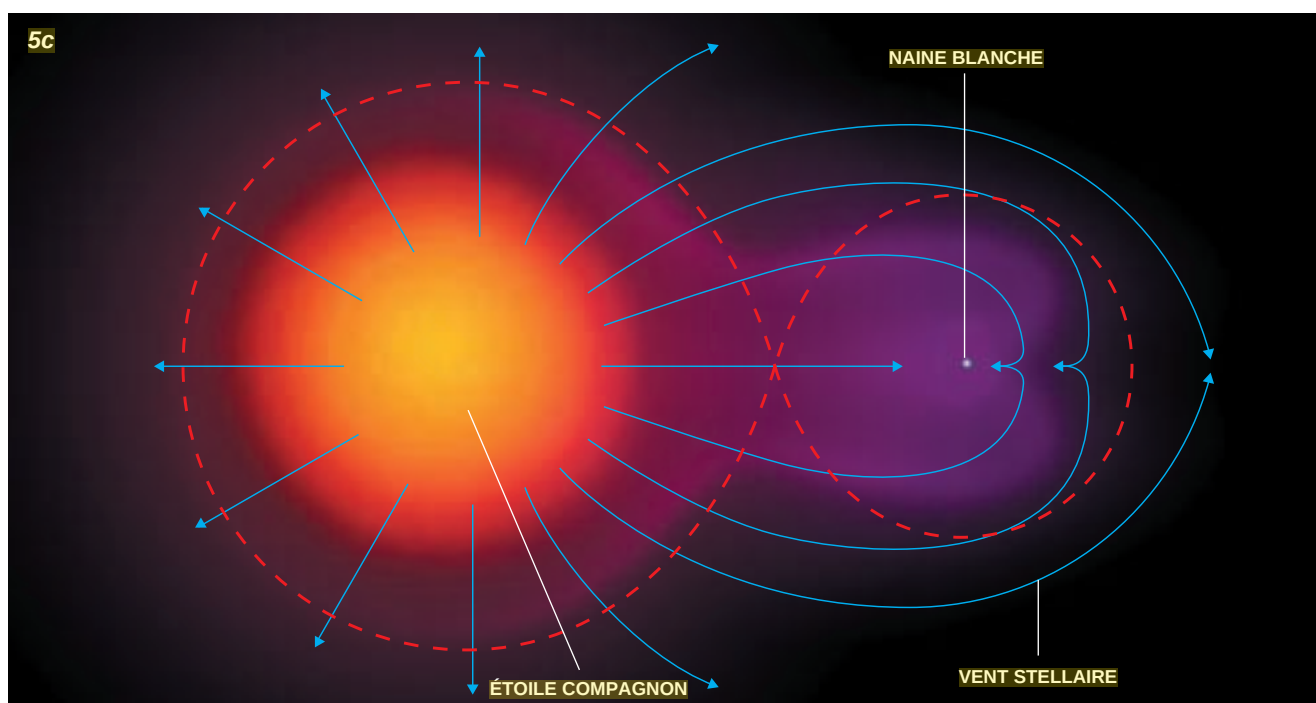
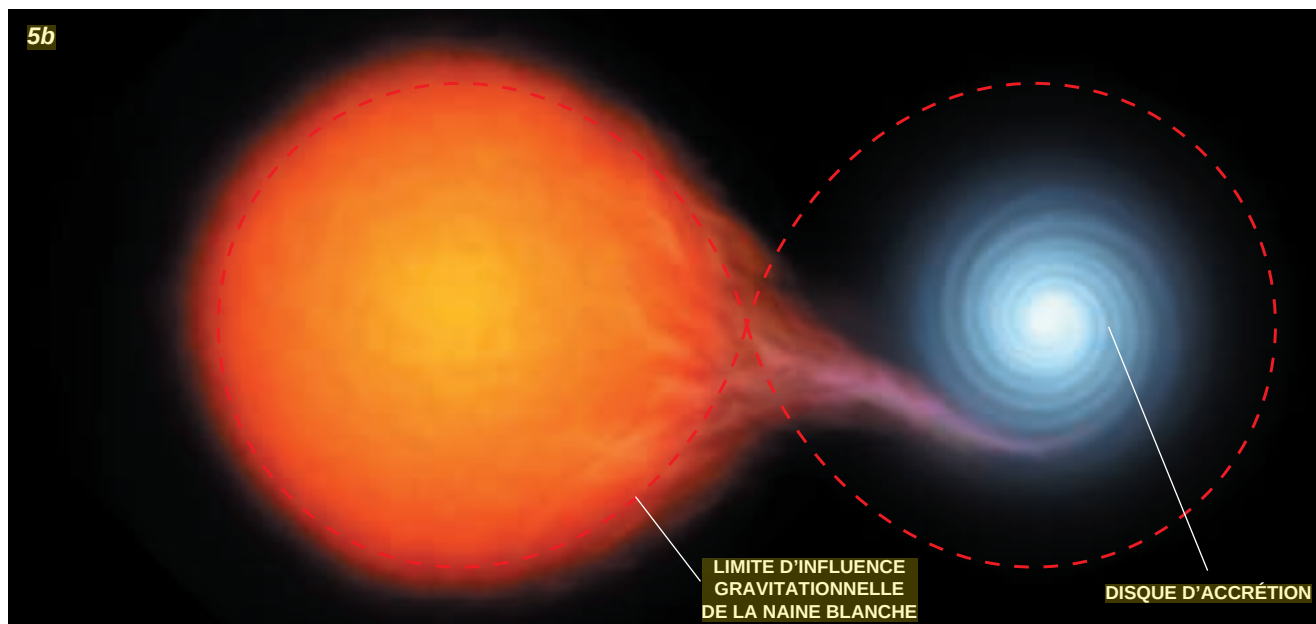
Le compagnon travaille à sa propre perte : bien qu'il perde de la masse en surface, la réaction de fusion qui a lieu dans son cœur continue à produire de l'énergie sous forme de rayonnement, et la pression de ce rayonnement sur les couches externes restantes les pousse en dehors du lobe de Roche, comme 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.



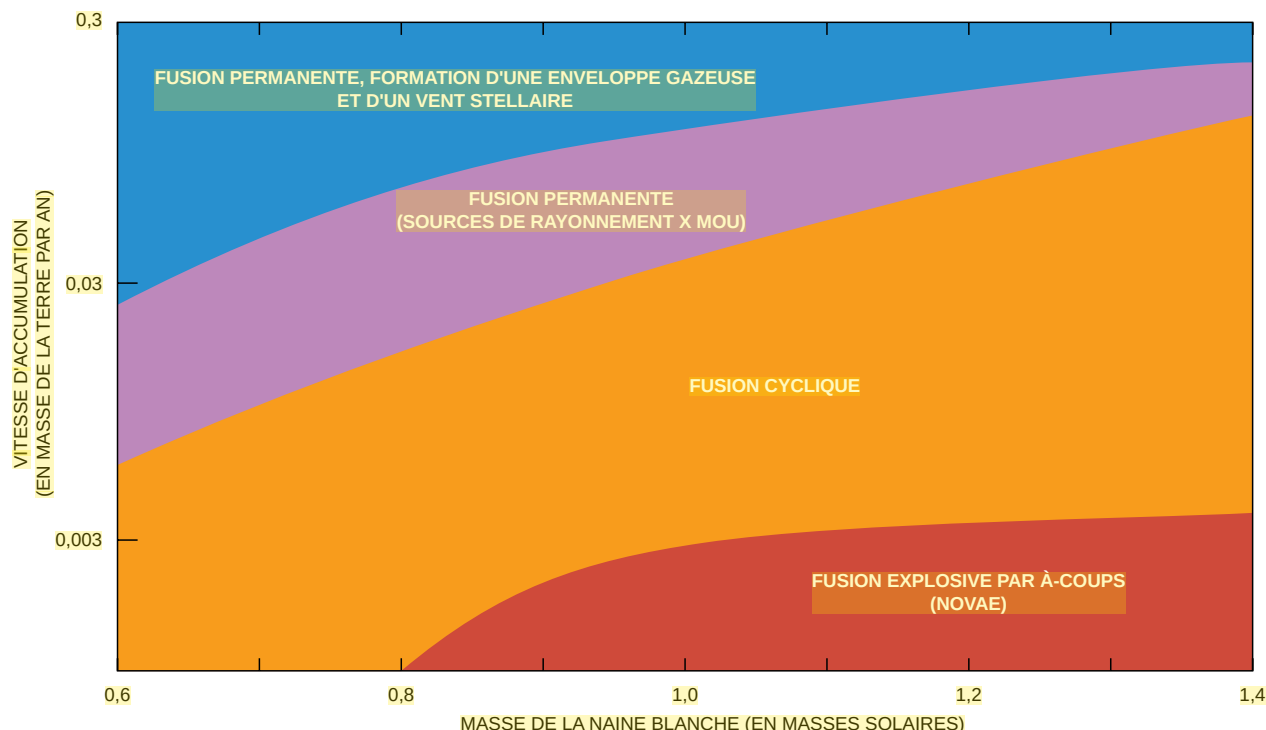
Bryan Christie



Alfred T. Komajian

6. LE CYCLE DE VIE d'une source de rayonnement X de faible énergie (*en haut*) commence avec un système de deux étoiles de masses différentes et se termine par une explosion de supernova de type Ia. La phase d'émission de rayonnement X de faible énergie peut prendre trois formes, selon la nature du compagnon stellaire. Si ce dernier est une étoile ordinaire en orbite serrée, il peut céder ses couches externes à la naine blanche (5a). Si c'est une géante rouge

assez grande, ses couches externes sont aussi attirées par la naine blanche (5b). Enfin une géante rouge trop petite ou sur une orbite de trop grand diamètre alimente la source de rayonnement X de basse énergie par l'intermédiaire de ses vents stellaires puissants (5c). Toutes les sources de rayonnement X de faible énergie n'explosent pas, mais leur nombre peut être suffisant pour expliquer la fréquence des supernovae de type Ia que nous observons.



Bryan Christie, d'après Edo Iben, University of Illinois

7. LE RÉGIME DE LA FUSION NUCLÉAIRE à la surface d'une naine blanche dépend de la masse de cette naine blanche (axe horizontal) et de la vitesse à laquelle elle capte les couches externes de son compagnon (axe vertical). Si la vitesse d'accumulation est faible, la

fusion se produit épisodiquement, de façon stable ou par explosions. Sinon, elle est permanente. Ce diagramme montre que des phénomènes autrefois considérés comme distincts, telles des novae et des supernovae, sont produits par des systèmes stellaires quasi identiques.

d'accumulation du gaz sur la naine blanche a été de 0,04 fois la masse de la Terre par an.

En utilisant ce modèle, nous avons prévu en 1991 que de nombreuses sources de rayonnement X de basse énergie sont des naines blanches en orbite serrée (avec des périodes inférieures à quelques jours) autour d'une étoile dont la masse était originellement de 1,2 à 2,5 masses solaires. CAL 83 et CAL 87 sont justement de tels systèmes. Les périodes orbitales de quatre autres sources de rayonnement X de basse énergie ont été mesurées depuis 1992 : toutes sont inférieures à quelques jours.

Le même mécanisme explique aussi le comportement d'une classe de systèmes doubles de type nova, les étoiles du type de V Sagittae, dont la brillance oscillante a intrigué les astronomes depuis le début du siècle. En 1998, deux équipes ont démontré que ces étoiles ont la masse et la période orbitale appropriées : l'échange de matière est très lent, et la fusion est explosive.

Une autre catégorie de systèmes stellaires pourrait produire un rayonnement X de basse énergie : les systèmes doubles symbiotiques, où une naine blanche est en orbite autour d'une géante rouge, étoile de type solaire qui a brûlé presque tout son hydrogène, et qui cède facilement de la matière. Les couches

externes d'une géante rouge sont peu denses et s'échappent sous forme de forts vents stellaires. En 1994, un système double symbiotique émetteur de rayonnement X de basse énergie a été découvert dans le Petit Nuage de Magellan, galaxie satellite de la Voie lactée. Une demi-douzaine d'autres sources analogues ont été découvertes depuis.

Certaines sources de rayonnement X de faible énergie sont plus difficiles à identifier parce que la vitesse d'accumulation du gaz y varie au cours du temps. Ainsi, grâce à des archives photographiques, on a découvert une source galactique dont l'émission alterne entre le domaine X et le domaine visible avec un cycle de 40 ans. Quelques astres, tels Nova Muscae 1983 et Nova Cygni 1992, ont alternativement le comportement d'une nova et celui d'un émetteur de rayonnement X de basse énergie, que l'on explique par une période de plusieurs années de « postcombustion » calme entre deux explosions.

Les masses des compagnons nécessaires pour que les systèmes binaires serrés émettent un rayonnement X de faible énergie impliquent que ces systèmes sont relativement jeunes (par rapport à l'âge de notre Galaxie) : le compagnon est rapidement dévoré, et la source arrête d'émettre. Ces systèmes vivent quelques milliards d'années tout au plus et sont

toujours situés dans le plan central de la Galaxie, zone de formation d'étoiles encore active, ou au voisinage de celui-ci. Cette région est riche en nuages interstellaires qui bloquent le rayonnement X de faible énergie. Nous ne pouvons donc observer qu'une toute petite partie de ces sources. Une extrapolation à partir de ces observations conduit à une estimation de plusieurs milliers d'objets dans la Galaxie. Sur une période de 1 000 ans, quelques nouvelles sources naissent et quelques autres meurent.

La mort des grosses naines

Que se passe-t-il quand un tel système meurt ? Cette mort survient quand la masse de la naine blanche a augmenté par l'accumulation de gaz. Elle peut atteindre la limite de Chandrasekhar, d'environ 1,4 fois la masse du Soleil. Au-delà de cette limite, les forces quantiques qui maintiennent la naine blanche sont vaincues. Deux issues sont alors possibles, selon la composition initiale et la masse de la naine blanche. Les naines blanches s'effondrent sur elles-mêmes et deviennent des étoiles à neutrons quand elles ne contiennent pas de carbone ou quand leur masse était supérieure à 1,1 fois la masse du Soleil avant qu'elles ne commencent à dévorer leur compagnon. Les naines blanches