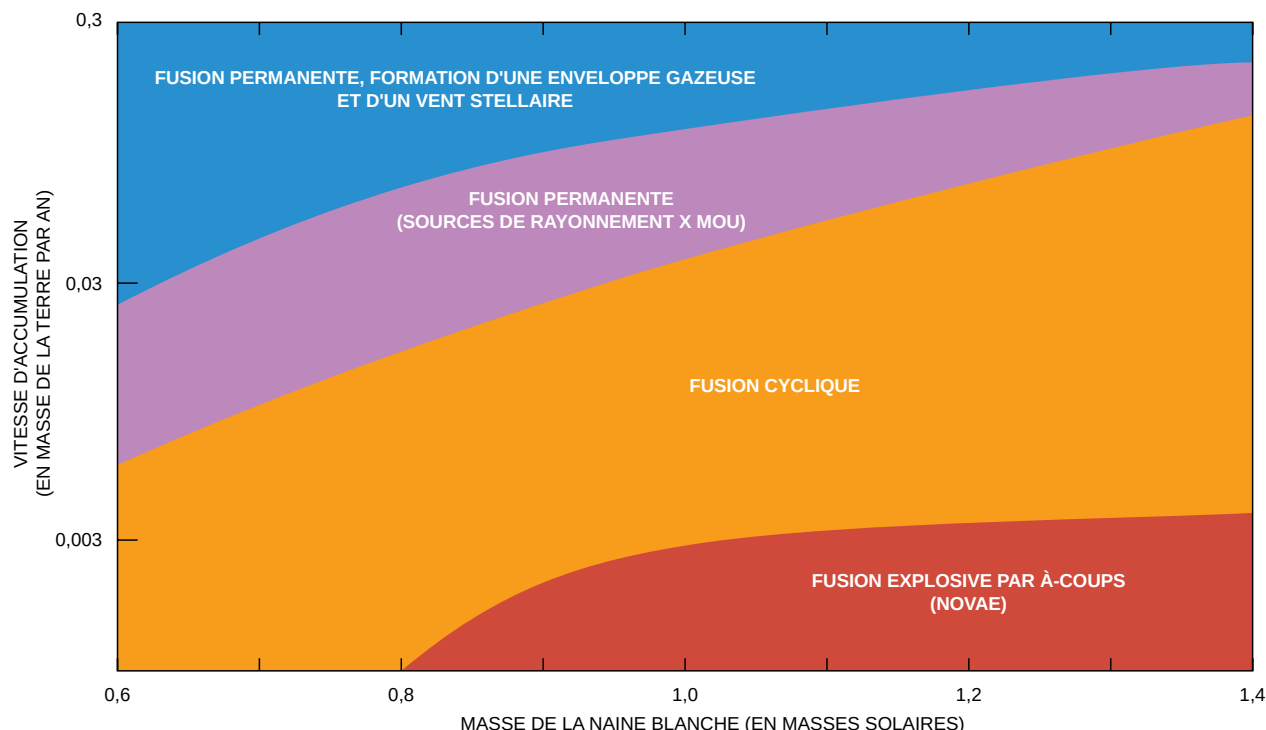




Bryan Christie, d'après Edo Iben, University of Illinois

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

qui ne satisfont pas à ces critères explosent. Elles peuvent amasser lentement de l'hélium, produit par la fusion de l'hydrogène, jusqu'à atteindre la limite de Chandrasekhar et exploser. La couche d'hélium peut aussi atteindre, avant la limite de Chandrasekhar, une masse critique et s'allumer de manière explosive. Dans ce dernier cas, des ondes de choc secouent violemment l'étoile et déclenchent la fusion du carbone dans son cœur. La fusion s'emballe et, en quelques secondes, l'étoile est transformée en nickel et en d'autres éléments de masse comprise entre celle du silicium et celle du fer. Le nickel, dispersé dans l'espace, se désintègre radioactivement en cobalt, puis en fer, en quelques centaines de jours.

Les astronomes avaient déjà attribué les supernovae de type Ia à l'explosion de naines blanches riches en carbone. Le spectre d'émission d'une telle supernova ne révèle aucune trace d'hydrogène ni d'hélium, contrairement à ceux des autres supernovae produites par l'explosion d'étoiles massives. Les supernovae de type Ia seraient une source importante de fer et d'éléments lourds dans l'Univers. En moyenne, quatre supernovae de type Ia explosent tous les 1 000 ans dans une galaxie telle que la Voie lactée.

Avant la découverte des sources de rayonnement X de basse énergie, les astronomes n'étaient pas certains du déroulement des événements qui conduisent à une supernova de type Ia. Les explications invoquaient soit des systèmes doubles symbiotiques, en particulier les novae récurrentes (qui ont été observées au moins deux fois), rares, soit la coalescence de deux naines

blanches riches en carbone. Cependant, cette dernière hypothèse est aujourd'hui contestée : on n'a jamais observé de système de deux naines blanches de masses et de périodes orbitales adéquates, et des calculs ont montré qu'une telle fusion ne serait pas assez violente pour produire une explosion thermonucléaire. Les sources de rayonnement X de faible énergie et les autres systèmes où la fusion se produit sur des naines blanches sont les candidats les plus crédibles : leur fréquence de disparition est proche de la fréquence observée des supernovae. Ces sources binaires lumineuses de rayonnement X de faible énergie sont ainsi la première classe d'objets identifiés qui peuvent achever leur existence en supernovae de type Ia.

Ce résultat peut améliorer la précision des mesures des distances dans l'Univers. De faibles variations de brillance peuvent faire la différence entre des hypothèses contradictoires sur l'origine et le destin de l'Univers. Les cosmologistes ont toujours craint que de petites erreurs systématiques, dues à la connaissance incomplète que les astronomes ont de l'évolution des étoiles qui deviennent supernovae, ne soient prises pour des variations réelles. Quand les sources de rayonnement X furent découvertes pour la première fois, personne ne s'attendait à ce que les recherches qu'elles susciteraient rassemblent tant de phénomènes en une seule théorie cohérente. Nous savons aujourd'hui que plusieurs classes d'étoiles variables, de novae et de supernovae ne sont que des variantes d'un même système : une étoile ordinaire en orbite autour d'une naine blanche à la surface de laquelle de l'hydrogène fusionne.

Peter KAHABKA dirige l'Institut d'astronomie de l'Université d'Amsterdam, où travaille aussi Edward VAN DEN HEUVEL. Saul RAPPAPORT est professeur de physique à l'Institut de technologie du Massachusetts.

Edward VAN DEN HEUVEL et Jan VAN PARADIJS, *Les étoiles binaires émettrices de rayons X*, in *Pour la Science*, janvier 1994.

Sumner STARRFIELD et Steven SHORE, *Vie et mort de la nova V1974 Cygni*, in *Pour la Science*, mars 1995.

Rosanne DI STEFANO, *Luminous Supersoft X-ray Sources as Progenitors of Type Ia Supernovae*, in *Supersoft X-ray Sources*, sous la direction de Jochen Greiner, Springer-Verlag, 1996.

P. KAHABKA et E.P.J. VAN DEN HEUVEL, *Luminous Supersoft X-ray Sources*, in *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 35, pp. 69-100, 1997.

Pilar RUIZ-LAPUENTE, Ramon CANAL et Andreas BURKERT, *SNeIa : On the Binary Progenitors and Expected Statistics*, in *Thermonuclear Supernovae*, sous la direction de Ramon Canal, Pilar Ruiz-Lapuente et Jordi Isern, Kluwer, 1997.

Ken'ichi NOMOTO, Koichi IWAMOTO et Nobuhiro KISHIMOTO, *Type Ia Supernovae : Their Origin and Possible Applications in Cosmology*, in *Science*, vol. 276, pp. 1378-1382, 30 mai 1997.

Nicolas PRANTOS et Thierry MONTMERLE, *Naissance, vie et mort des étoiles*, Presses Universitaires de France, 1998.