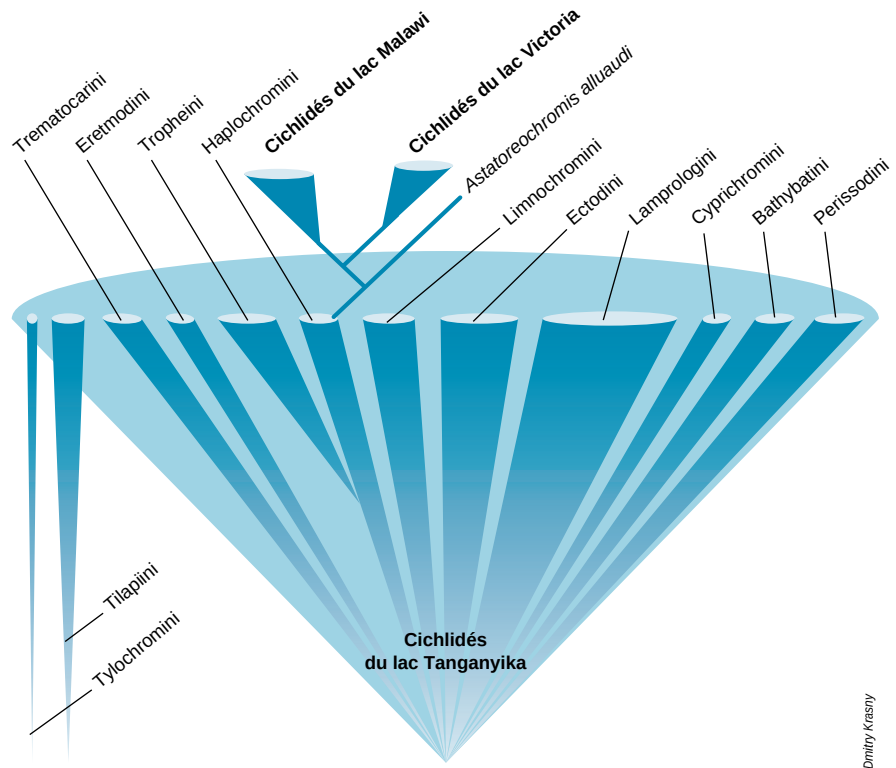


quand les contraintes écologiques étaient identiques.

De surcroît, on observe que certaines caractéristiques morphologiques ont évolué à un rythme très irrégulier, et parfois indépendamment des modifications génétiques. Quelques espèces du lac Tanganyika se sont très peu transformées et ressemblent encore beaucoup aux cichlidés fossilisés, en particulier aux tilapias. Par exemple, la morphologie des *Tropheus*, à l'exception des couleurs, n'a presque pas changé. En revanche, les cichlidés du lac Victoria, présentant une grande diversité de tailles, de motifs et de formes, ont évolué en un temps très court. Il y a plus de variations génétiques au sein de la seule espèce *Homo sapiens* qu'il n'y en a entre les 400 espèces de cichlidés du lac. Les analyses génétiques indiquent que les différents cichlidés du lac Victoria sont apparus pendant ces derniers 200 000 ans.

De récentes études paléoclimatologiques restreignent encore l'origine des cichlidés du lac Victoria : le lac semble s'être asséché presque complètement il y a moins de 14 000 ans. Seuls quelques individus ont survécu : les cichlidés de ce lac présentent un taux de spéciation inégalé chez les autres vertébrés. De plus, le lac Nabugabo, séparé au Nord-Ouest du lac Victoria par un banc de sable et âgé au maximum de 4 000 ans, contient cinq espèces de cichlidés endémiques. Ces poissons sont probablement apparentés à ceux du lac Victoria, mais les mâles présentent des livrées nuptiales différentes. Sec il y a seulement 200 ans, le Sud du lac Malawi est cependant habité par de nombreuses espèces et formes colorées que l'on ne rencontre nulle part ailleurs.

Les résultats des récentes analyses d'ADN des poissons provenant du lac Tanganyika corroborent ces exemples et indiquent que les isolements répétés sont à l'origine de la spéciation des cichlidés. Les baisses successives du niveau du lac Tanganyika, qui ont parfois atteint 600 mètres, ont favorisé l'apparition des formes colorées de *Tropheus* et de tous les autres cichlidés vivant dans les rochers. Les populations habituées à échanger des gènes ont alors été isolées dans de petites poches d'eau. Elles ont évolué indépendamment et, lorsque le niveau d'eau est remonté, les populations sont à nouveau entrées en contact, mais elles n'étaient alors plus interfécondes.



7. CET ARBRE PHYLOGÉNIQUE montre que les cichlidés des lacs Malawi et Victoria descendent probablement d'une seule lignée d'incubateurs buccaux (*Haplochromini*) qui s'est échappée du lac Tanganyika. Les cichlidés de ce dernier, le plus ancien, montrent la plus grande diversité génétique. La section des cônes est approximativement proportionnelle au nombre d'espèces par groupe.

Un record plus sombre

La vitesse des extinctions d'espèces dans le lac Victoria est également très importante. Il y a 50 ans, les cichlidés constituaient plus de 99 pour cent de la biomasse ichtyologique du lac. Aujourd'hui, ils représentent moins de un pour cent. La plupart des espèces sont déjà éteintes, et beaucoup d'autres ont des populations si réduites que leurs chances de se rétablir sont très faibles. Ces extinctions massives sont la conséquence de la destruction de l'habitat, de l'introduction de nouvelles espèces, de la pollution, de la croissance démographique et de la surexploitation.

Par exemple, dans les années 1950, l'introduction de la perche du Nil, afin d'augmenter les rendements de la pêche a divisé, en 30 ans, la population de

cichlidés d'un facteur 10 000. Un grand nombre des cichlidés que les perches chassaient se nourrissaient d'algues. En leur absence, les algues mortes se sont accumulées et se sont décomposées : l'oxygène s'est raréfié dans l'eau, et la plus grande partie du lac est devenue anoxique. De plus, des perches d'environ deux mètres ne sèchent pas de la même manière que les petits cichlidés ; elles doivent être fumées. La déforestation nécessaire au fumage a provoqué l'entraînement du sol dans le lac, par l'eau de pluie, ce qui a augmenté la turbidité et des conditions anoxiques.

Une communauté autrefois prospère est aujourd'hui extrêmement réduite. L'extraordinaire théâtre évolutif des cichlidés du lac Victoria est en passe de se fermer plus vite qu'il ne s'est ouvert.

Melanie STIASSNY dirige le département d'ichtyologie du Muséum américain d'histoire naturelle. Axel MEYER est professeur de biologie à l'Université de Constance.

Michio HORI, *Frequency-Dependent Natural Selection in the Handedness of Scale-Eating Cichlid Fish*, in *Science*, vol. 260, pp. 216-219, 9 avril 1993.

A. MEYER, *Phylogenetic Relationships and Evolutionary Processes in East African*

Cichlid Fishes, in *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 8, n° 8, pp. 279-284, août 1993.

Tijs GOLDSCHMIDT, *Darwin's Dreampond : Drama in Lake Victoria*, traduction de Sherry Marx-Macdonald, MIT Press, 1996.

Melanie L.J. STIASSNY, *An Overview of Freshwater Biodiversity : With Some Lessons from African Fishes*, in *Fisheries*, vol. 21, n° 9, pp. 7-13, septembre 1996.

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 compagne, 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.

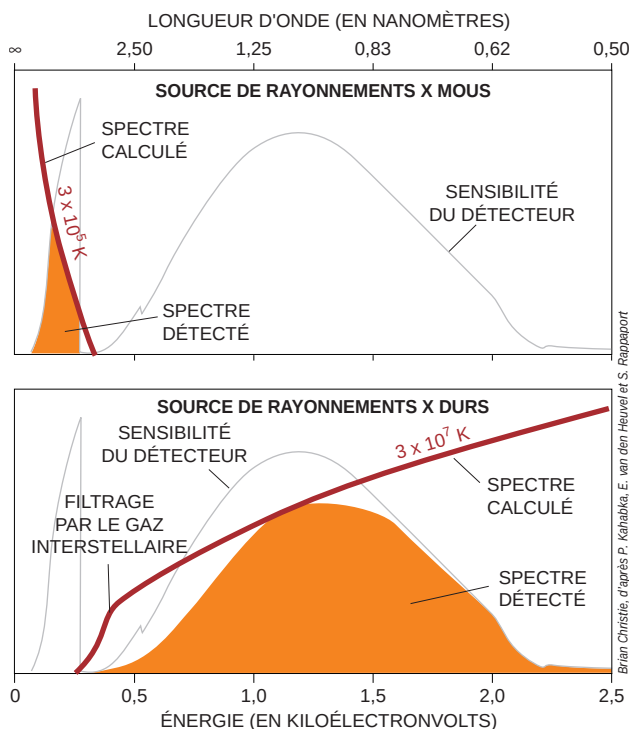
Toutefois, l'analyse détaillée montra qu'aucune de ces deux explications ne convenait. Les sources de rayonnement X de faible énergie émettent à peu près avec la même intensité que les étoiles à neutrons qui arrachent les couches externes d'une étoile compagne. Pourtant la collision d'un volume de gaz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

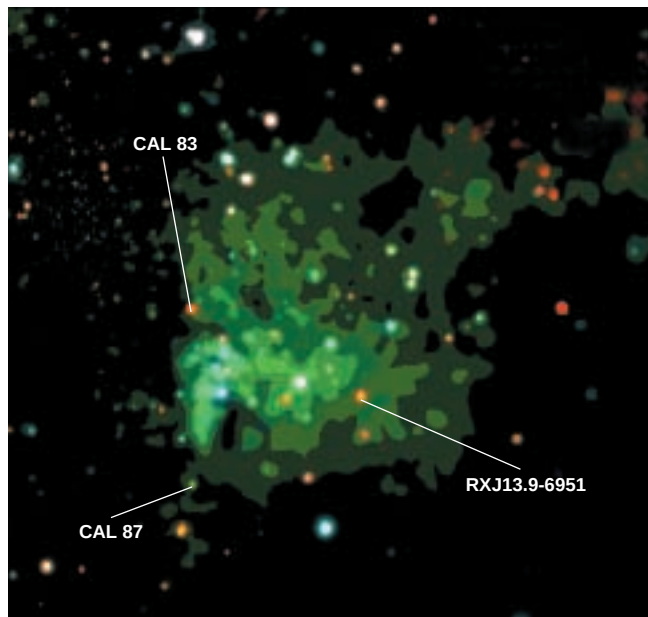
Des naines explosives?

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

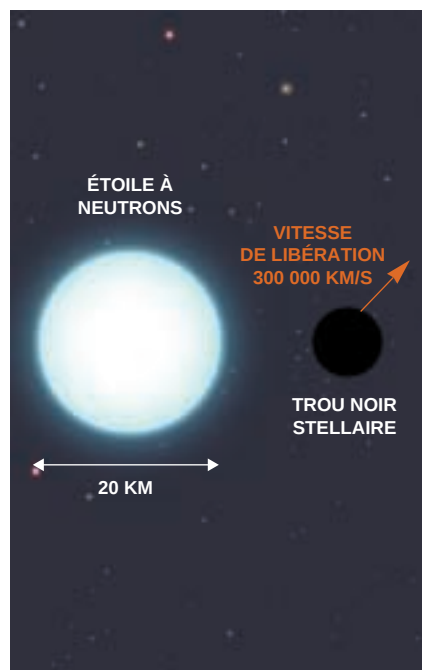


3. LE GRAND NUAGE DE MAGELLAN, une galaxie satellite de la nôtre, contient des sources de rayonnement X (à gauche, en fausses couleurs, l'énergie du rayonnement augmente lorsque l'on passe du rouge au bleu). Les sources de rayonnement X de faible énergie sont des points rouges ou orange, tandis que les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



Sven Kohle, 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).



Alfred T. Kamajian

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.

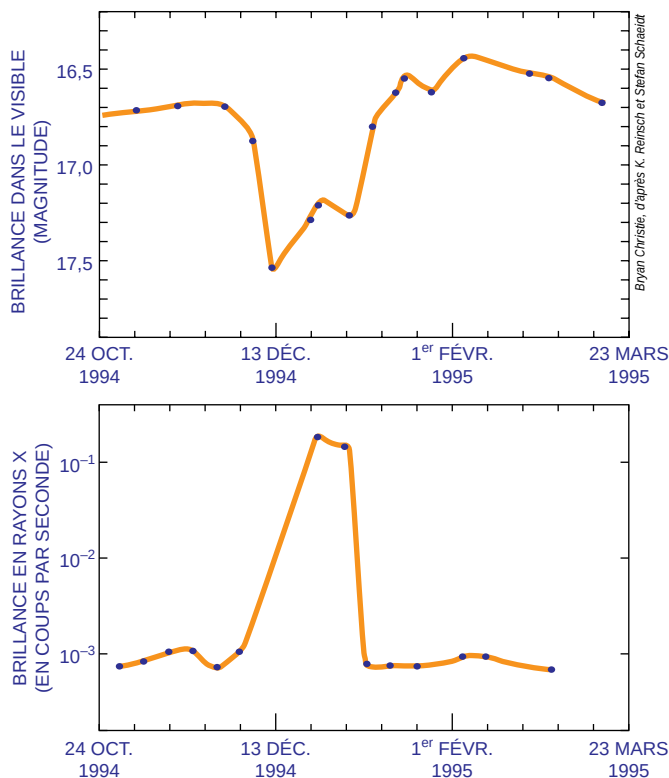
Tous les systèmes doubles n'échangent pas du gaz assez vite pour qu'ils émettent un rayonnement X mou. Si la masse de l'autre étoile est inférieure à celle de la naine blanche, ce que l'on observe dans la plupart des systèmes qui se transforment en novae, la vitesse d'accumulation est d'environ 0,0003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

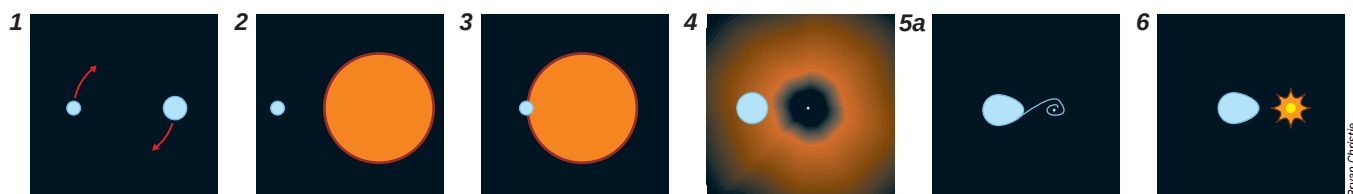
Lorsque la masse de l'étoile compagnon est supérieure à celle de la naine blanche, la conservation du moment cinétique du système double provoque un rétrécissement de l'orbite à mesure que de la matière est échangée : la naine blanche, qui grossit, se rapproche du centre de masse du système, situé près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

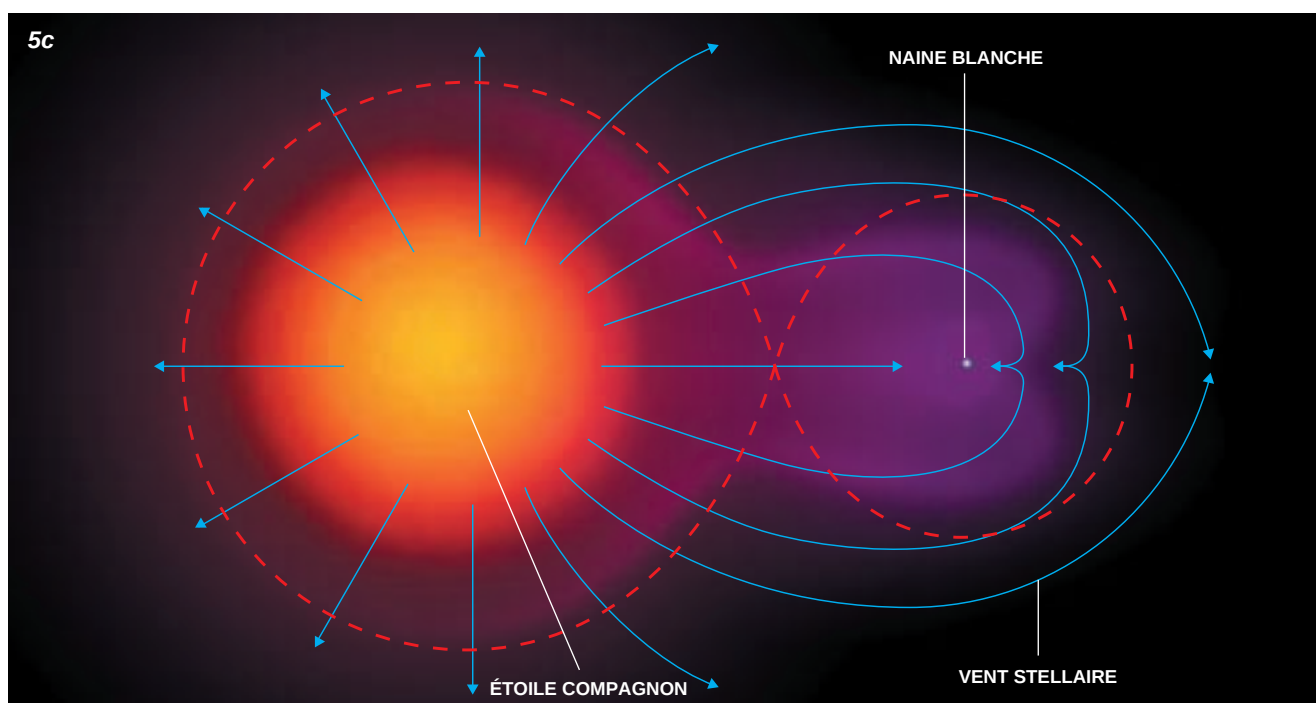
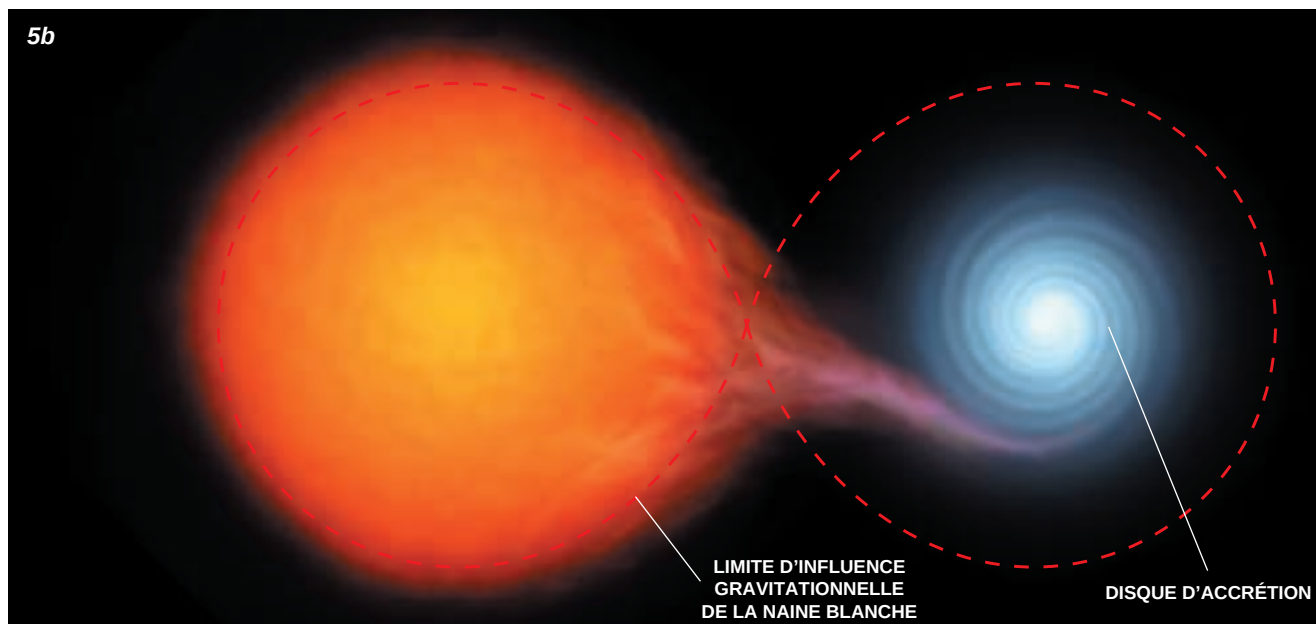
Le compagnon travaille à sa propre perte : bien qu'il perde de la masse en surface, la réaction de fusion qui a lieu dans son cœur continue à produire de l'énergie sous forme de rayonnement, et la pression de ce rayonnement sur les couches externes restantes les pousse en dehors du lobe de Roche, comme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



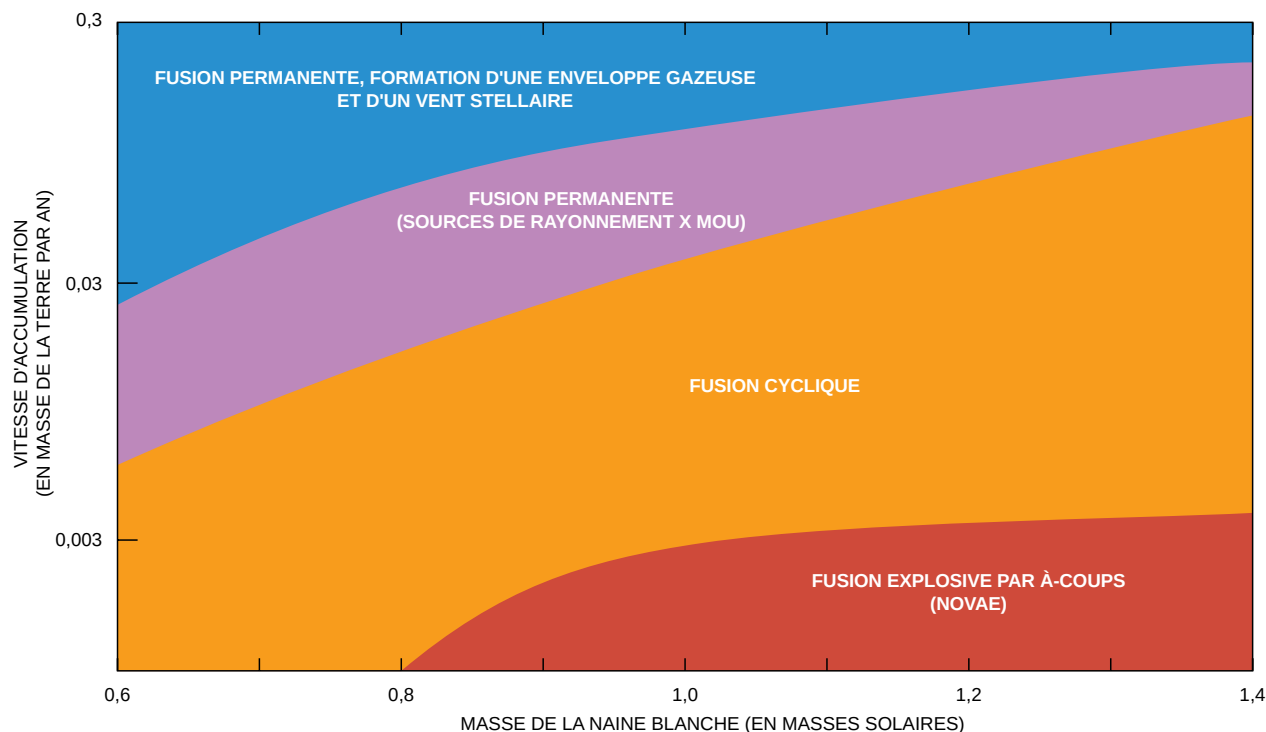
Bryan Christie



Alfred T. Kamajian

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'explorent 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

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.

