



LE CHARME DISCRET DES VARIABLES

CATAcly

L'ESSENTIEL

Les variables cataclysmiques sont des systèmes formés d'une étoile naine blanche et d'une compagne naine rouge, cette dernière perdant de la matière qui tombe sur la naine blanche. Elle ne tombe pas droit sur elle, mais en formant un disque de matière en rotation qui se rapproche doucement de la naine blanche. De temps à autres, la luminosité de ce système s'accroît brusquement, comme s'il s'embrasait. Le zoom de ce mois-ci explique comment de la matière de la naine rouge peut ainsi tomber sur l'autre étoile, comment l'émission d'ondes gravitationnelles et comment des interactions électromagnétiques avec le vent soufflé par l'étoile naine rouge permettent à ce système d'évoluer. Il explique aussi pourquoi les variables cataclysmiques ne sont possibles qu'avec des étoiles ni trop éloignées ni trop proches (de période orbitale supérieure à 80 minutes). Enfin, il révèle la cause de ces sursauts occasionnels de luminosité. Contrairement à ce que l'on pourrait croire, il ne sont pas causés par une hausse de luminosité d'une des deux étoiles.

Une «variable cataclysmique» est un couple d'étoiles dont la luminosité augmente fortement de temps à autre, produisant ce que l'on appelle une *nova naine* ou, beaucoup moins souvent, mais beaucoup plus fortement, ce qu'on nomme une *nova*.

Ces brusques augmentations d'éclat sont à l'origine de l'adjectif « cataclysmique » dans leur nom. L'étoile dite *primaire* - une naine blanche - accrète de la matière perdue par l'étoile *secondaire*. Dans la plupart des cas, cette dernière est une étoile de faible masse (inférieure à une masse solaire), proche de la séquence principale, autrement dit, une naine rouge (de type spectral K ou M).

Quand on leur parle de *variables cataclysmiques*, la plupart des astronomes professionnels ne savent pas trop de quoi il s'agit. « *Encore un animal exotique du bestiaire stellaire* », pensent-ils, surtout s'ils sont spécialistes de cosmologie ou d'astronomie dite « extragalactique » (c'est-à-dire hors de notre Galaxie). Mais ces animaux exotiques observables dans notre Galaxie présentent un grand intérêt, notamment pour comprendre les disques d'accrétion, lesquels sont d'une grande généralité dans le cosmos, et in-

téressent aussi les spécialistes des galaxies lointaines, par exemple lorsqu'ils étudient le trou noir central des galaxies activé par de la matière qui y tombe.

L'orbite sur laquelle se meuvent les étoiles d'une variable cataclysmique est serrée: sa dimension est de l'ordre du rayon de l'étoile secondaire, ses couches externes sont déformées par la gravitation de la naine blanche qui, étant compacte, garde sa forme. Pour la secondaire, l'équilibre s'établit entre la force centrifuge due à sa rotation propre, la force de marée due à la présence de l'autre étoile et l'attraction gravitationnelle. Cet équilibre délimite une surface virtuelle en forme de poire autour de chaque étoile, appelée *lobe de Roche* - du nom du mathématicien et astronome montpelliérain Édouard Roche - au-delà de laquelle l'équilibre n'est plus possible: toute matière qui sort du lobe de Roche n'est plus rattachée à l'étoile, mais chute sur le compagnon. (cf. rubrique « Éclairage » p. 71 de ce numéro.)

SMIQUES

Dans une variable cataclysmique, l'étoile secondaire remplit son lobe de Roche, c'est-à-dire qu'une partie de sa matière ne tourne plus simplement autour d'elle: cette partie s'échappe et tombe sur la naine blanche, par le simple fait des forces de gravitation. Cela provoque la perte de masse de l'étoile secondaire et l'accroissement de masse de la primaire. C'est la matière qui chute sur la naine blanche qui, en libérant son énergie gravitationnelle, est la source principale de la luminosité du système. Sans remplissage du lobe de Roche, pas de chute sur la naine blanche et donc pas de lumière. Autrement dit: les variables cataclysmiques brillent car la naine rouge remplit le lobe de Roche et perd toute la masse qui le dépasse. Elle doit donc rester en contact avec son lobe de Roche. Or, nous l'avons dit, cette étoile est proche de la séquence principale et nous savons très bien comment une telle étoile réagit à une perte de masse: elle se contracte! Donc paradoxe: la perte de masse par l'étoile secondaire lui fait perdre contact avec son

lobe de Roche, donc elle devrait éteindre les variables cataclysmiques... qui pourtant sont supposées briller à la suite de la chute de cette masse sur la naine blanche. À moins que le lobe de Roche suive l'étoile dans sa contraction...

Regardons cela de plus près. Puisqu'on considère deux étoiles en rotation l'une autour de l'autre (autour de leur centre de masse), il faut considérer l'évolution de deux grandeurs fondamentales: leur énergie et leur moment cinétique. L'énergie d'une étoile binaire inclut la somme des énergies associées à la vitesse de chaque étoile (énergies cinétiques) et de l'énergie gravitationnelle, proportionnelle à l'inverse de leur distance. Le moment cinétique du système est la somme du produit des masses de chaque étoile, de leur distance au centre de masse et de leur vitesse orbitale. Selon les lois de la mécanique classique (celle issue de Newton), l'énergie et le moment cinétique du système ne doivent pas varier, même en cas d'échange de masse entre les deux étoiles. On dit qu'elles sont

conservées. Une patineuse conserve son moment cinétique quand elle augmente ou diminue la vitesse de rotation de ses pirouettes en pliant ou étendant ses bras.

Puisque dans les variables cataclysmiques la naine rouge (l'étoile secondaire, émettrice de matière) est moins massive que la naine blanche (l'étoile primaire), le transfert de matière déplace le centre de masse du système vers la primaire. Pour assurer la conservation de l'énergie et du moment cinétique, la taille de l'orbite de la secondaire doit augmenter. Mais la théorie newtonienne de la gravitation nous dit que cela augmente son rayon de Roche. Ainsi la perte de masse devrait s'arrêter d'elle-même: non seulement elle cause la contraction de l'étoile, mais de plus elle augmente la taille de son lobe de Roche. Et pourtant, c'est grâce à leur luminosité d'accrétion que nous les observons en grandes quantités.

Résumons: pour expliquer à la fois le remplissage du lobe de Roche et le fait que la variable cataclysmique ne s'éteigne pas, il faudrait un moyen de briser la conservation du moment cinétique: il faudrait en perdre.

UNE PÉRIODE MINIMUM

Nous avons résolu le paradoxe du transfert de masse dans une variable cataclysmique: la naine rouge se contracte mais, grâce à la perte du moment cinétique par émission d'ondes gravitationnelles, l'orbite se rétrécit et son lobe de Roche la rattrape. Le transfert de masse peut donc continuer. Jusqu'à quand? Jusqu'à l'épuisement de la masse disponible, pourrait-on penser. Ou plutôt jusqu'au moment où l'étoile secondaire quittera la séquence principale, car pour qu'elle puisse brûler l'hydrogène, la masse d'une étoile doit être supérieure à 0,085 masse solaire. Au-dessus de cette masse, les étoiles ne peuvent être que des naines brunes. La période orbitale d'un système double dont une étoile de 0,085 masse solaire remplit son lobe de Roche est égale à 57 minutes. On devrait donc observer des variables cataclysmiques avec des périodes d'une heure ou même plus courtes. Or, comme on peut le voir sur la *figure 2*, la distribution des périodes orbitales des variables cataclysmiques s'arrête brusquement, comme sur un mur, à 80 minutes. Bien au-dessus de 57 minutes. Cette période minimum n'est pas due à un biais observationnel, elle est réelle et doit donc avoir une cause physique.

C'est encore Paczyński, qui, en 1980, a trouvé que la période minimum des variables cataclysmiques est le résultat direct de l'action du rayonnement gravitationnel.

Quand la masse de l'étoile donneuse diminue, sa structure doit s'adapter à ce changement. Comme nous l'avons

dit déjà, en réaction à une perte de masse, une étoile sur la séquence principale se contracte. La raison est qu'elle se nourrit de la combustion d'hydrogène qui est très sensible à la température. Or, la température au centre d'une telle étoile est proportionnelle à sa masse et inversement proportionnelle à son rayon. Pour maintenir le feu thermonucléaire, il faut que cette température reste plus ou moins constante; donc, quand elle perd de la masse, l'étoile doit aussi réduire son rayon. C'est la raison pour laquelle sur la séquence principale inférieure, où se trouvent les étoiles secondaires des variables cataclysmiques, les masses des étoiles sont proportionnelles à leurs rayons. Autrement dit: en diminuant son rayon suite à la perte de masse, l'étoile s'efforce de rester sur la séquence principale.

Pendant, la contraction de l'étoile ne peut être immédiate. La contraction qui ajuste la distribution des températures est un processus thermique dont la durée (le temps Kelvin-Helmholz), pour les petites étoiles qui remplissent leur lobe de Roche et pour des périodes orbitales inférieures à 2 heures, est de l'ordre de 10^9 années. Le temps caractéristique de perte de moment cinétique par rayonnement gravitationnel est lui aussi de l'ordre du milliard d'années. Ce qui explique comment fonctionne le processus de perte de masse par l'étoile secondaire. La perte de moment cinétique causée par l'émission d'ondes gravitationnelles rétrécit le lobe de Roche, qui « épluche » l'étoile. Celle-ci se contracte, mais puisque la vitesse de perte du moment cinétique du système est comparable à celle de la contraction de l'étoile, le lobe de Roche rattrape toujours la surface de celle-ci et l'épluchage, c'est-à-dire

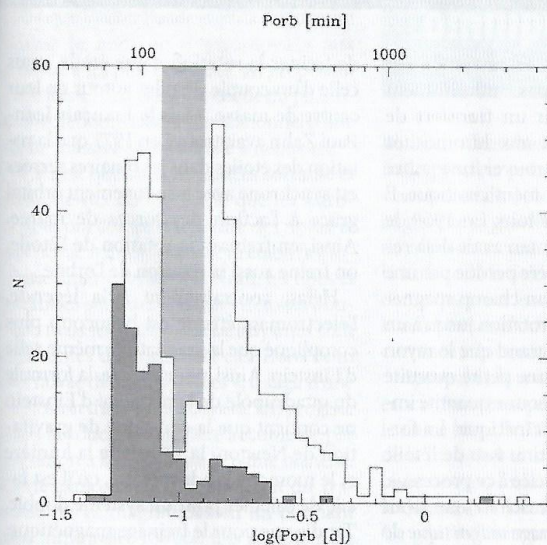
Pour le faire, il faut sortir du cadre de la physique de Kepler et Newton. Grâce à Albert Einstein en effet, nous savons depuis 1918 que les systèmes binaires doivent émettre des ondes gravitationnelles, qui emportent l'énergie et le moment cinétique de l'orbite. Cela a été confirmé en 1974 quand Russel Hulse et Joseph Taylor ont découvert un pulsar binaire, délicatement nommé PSR B1913+16, dont l'orbite s'est avérée rétrécir, après seulement quelques années d'observations, exactement comme le prédit la théorie de la relativité générale. (Notons qu'un pulsar binaire est plus simple qu'une variable cataclysmique, car il n'y a pas de décharge notable de matière entre les deux étoiles compactes.) La contraction de l'orbite est rapide, dans environ 300 millions d'années les deux étoiles à neutrons fusionneront en produisant un feu d'artifice gravitationnel et électromagnétique, à l'instar de celui observé le 17 août 2017 par la collaboration Ligo-Virgo et des dizaines d'observatoires spatiaux et terrestres. Sauf que PSR B1913+16 étant dans la Galaxie, l'amplitude de l'onde gravitation-

nelle sera alors 6000 fois plus importante et le flux électromagnétique 40 millions de fois plus puissant!

EVOLUTION DES VARIABLES CATAclysmIQUES

On pourrait penser que le rayonnement gravitationnel n'est important que pour des systèmes d'objets compacts, tels les étoiles à neutrons ou les trous noirs; pour une orbite képlérienne ne comptent que les masses et la période orbitale *mais pas la compacité des corps en orbite*. La vitesse orbitale d'étoiles d'une masse solaire est égale à 0,003 fois la vitesse de la lumière pour une période d'une heure. Les effets relativistes ne sont donc pas négligeables. Avec leurs périodes orbitales variant entre 80 minutes et 2 jours, et leurs masses plus ou moins solaires, les variables cataclysmiques sont suffisamment relativistes pour que les effets de pertes d'énergie orbitale par émission d'ondes gravitationnelles ne soient pas négligeables. Surtout pour celles qui ont les périodes les plus courtes.

C'est ce qu'avaient déjà compris et annoncé, en 1962, trois Américains, Robert Kraft, Jon Matthews et Jesse Greenstein, en apprenant que le Polonais Wojtek Krzemiński avait déduit de ses observations que la période orbitale de la binaire cataclysmique WZ Sge n'est que de 81,5 minutes. Quelques années plus tard, Bohdan Paczyński, Polonais lui aussi et l'un des plus grands astronomes de la deuxième moitié de XX^e siècle, a émis l'hypothèse que c'est l'émission d'ondes gravitationnelles qui gouverne l'évolution de ces étoiles doubles. Les travaux de ces astronomes sur l'importance du rayonnement gravitationnel dans l'évolution des systèmes binaires serrés furent totalement ignorés par les relativistes qui, pendant encore une vingtaine d'années, continuèrent à s'écharper au sujet de la validité de la formule dite « du quadrupôle » qui, d'après Einstein, décrit l'émission des ondes gravitationnelles par un couple de corps massifs (lire l'encadré « Une période minimum »).



1. Distribution des périodes orbitales de variables cataclysmiques.

Les parties foncées de l'histogramme vers les périodes courtes correspondent aux sources découvertes grâce au relevé digital Sloan (SDSS). La couleur grise marque le déficit de systèmes avec des périodes entre 2 et 3 heures, liée à la réduction du freinage magnétique quand l'étoile devient pleinement convective. (B.T. Gänsicke et al. MNRAS 2009, 397, 2170-2188)

la perte de masse, peut continuer d'une façon ininterrompue. Le problème est que la vitesse de contraction de l'étoile diminue avec sa masse, donc avec la période orbitale, tandis que celle des pertes par rayonnement gravitationnel augmente. Quand cette dernière devient supérieure à la vitesse de contraction de l'étoile, le lobe de Roche ne l'épluche plus, il la creuse plutôt, car vu les différences de vitesses, la surface de l'étoile est pratiquement immobile. Cela change tout. Par rapport au système double, dont le lobe de Roche est un des éléments, l'étoile augmente sa taille puisqu'elle ne suit plus sa contraction. Cela ne peut durer très longtemps et pour se remettre en équilibre, en accord avec les lois de la dynamique de Newton, le système binaire doit finalement s'étendre, sa période orbitale doit augmenter. Donc, quand la vitesse de contraction de l'étoile devient égale à la vitesse de perte du moment cinétique du système double par émission d'ondes gravitationnelles, la contraction de l'orbite s'arrête: on a atteint la période minimum d'une variable cataclysmique. Quand on la calcule, on trouve 80 minutes. En accord avec les observations.

Près de la période minimum, l'étoile secondaire quitte la séquence principale. Sa masse n'est que d'environ 0,1 masse solaire, elle est trop grosse pour sa masse et devient trop froide pour brûler l'hydrogène. Elle devient une naine brune. De telles étoiles réagissent à la perte de masse en augmentant leur rayon, ce qui à son tour augmente la période orbitale. L'ancienne variable cataclysmique repart donc vers les longues périodes orbitales. Cependant, le transfert de masse est devenu très ténu, ce qui rend leur luminosité très faible et difficile à observer. Mais on en voit quelques-unes quand même.



Vue d'artiste d'un modèle de matière tombant sur une naine blanche (au centre). La matière provient de l'étoile compagne (à droite), laquelle remplit son lobe de Roche. Elle forme un disque d'accrétion. (Nasa/JPL-Caltech)

FREINAGES

Au début des années 1980, Paczyński espérait que la remarquable coïncidence des périodes calculées et observées (voir encadré) pourrait servir de test à la fameuse formule quadripôle d'Einstein, indépendant de celui fourni par le pulsar binaire PSR 1913+16. Mais, comme presque toujours (sauf pour les pulsars binaires qui sont des « cas d'école »), la réalité astrophysique se montra plus complexe que prévu. Contrairement à ce qu'on pourrait penser, les complications ne viennent pas du côté de la relativité générale, théorie réputée ardue. Dans la théorie d'Einstein, les choses sont simples : il suffit de connaître l'évolution temporelle de l'asymétrie de la distribution des masses (qui est mesurée par le fameux moment quadripolaire) pour calculer l'énergie et le moment cinétique perdus par émission d'ondes gravitationnelles par n'importe quel système autogravitant. Pour les systèmes d'étoiles doubles, la formule est connue depuis le début des années 1940.

Cependant, on avait vite compris que, pour les périodes orbitales de plus de

deux heures environ, le rayonnement gravitationnel n'est pas suffisamment puissant pour fournir un transfert de masse correspondant aux luminosités observées. Il fallait trouver une autre source de perte de moment cinétique. Il ne fallut pas chercher loin. En 1959, le Français Evry Schatzman avait déjà remarqué que, si la matière perdue par une étoile est forcée par son champ magnétique à participer à sa rotation jusqu'à un rayon beaucoup plus grand que le rayon stellaire, alors même une petite quantité de masse peut emporter une quantité importante de moment cinétique. La formation d'un vent continu issu de l'étoile (vent stellaire) est associée à ce processus. Souvent prophétique, Schatzman avait ainsi découvert le *freinage magnétique* de la rotation stellaire. Comme cela a été confirmé après les travaux de Schatzman, les étoiles de faible masse dans les variables cataclysmiques ont une activité magnétique importante. On s'attend donc à ce que leur rotation soit freinée par émission de vent stellaire. Évidemment, dans un système double serré, il ne s'agit pas

de freiner la rotation d'une étoile, mais celle d'un couple d'étoiles autour de leur centre de masse. Mais le Français Jean-Paul Zahn avait trouvé en 1977 que la rotation des étoiles dans les binaires serrées est synchrone avec le mouvement orbital grâce à l'action des forces de marée. Ainsi, en freinant la rotation de l'étoile, on freine aussi la rotation de l'orbite.

Hélas, contrairement à la légende, l'électromagnétisme est beaucoup plus compliqué que la gravitation, même celle d'Einstein. Ainsi, par exemple, la formule du quadripôle de la relativité d'Einstein ne contient que la constante de gravitation de Newton, la vitesse de la lumière et le moment quadripolaire, qu'il est facile de calculer pour un système double. Tandis que pour le freinage magnétique, cela est une tout autre affaire. D'abord, le mécanisme de freinage lui-même dépend de la structure du champ magnétique, de la nature du vent stellaire, de la structure de l'étoile, etc. C'est une vraie usine à gaz. Ce qui fait que, presque quarante ans après la découverte par Paczyński de la cause de la période mi-

nimum des variables cataclysmiques, nous ne connaissons toujours pas sa valeur théorique exacte, car il semble que même pour les périodes orbitales les plus courtes, il existe un freinage magnétique en plus du freinage gravitationnel...

LES CATACLYSMES :

supernovae, novae, étoiles symbiotiques... et novae naines

En quoi sont-ils cataclysmiques ces systèmes d'étoiles doubles dont nous parlons dans cet article ? Depuis l'aube de l'humanité, on connaissait les étoiles « neuves » qui apparaissaient soudainement sur la sphère céleste pour disparaître quelque temps plus tard. En 1572, Tycho Brahe en avait observé une, particulièrement brillante, décrite dans un ouvrage intitulé *De Stella Nova*, et c'est le nom latin de nova que les astronomes donnent depuis aux étoiles transitoires. Ce n'est que trois siècles après les observations de Brahe qu'on a introduit le terme de « nova naine » pour désigner des « novae » plus faibles que celles observées jusqu'alors, mais on ne comprenait toujours pas la nature des phénomènes à l'origine de ces apparitions furtives d'étoiles dans le ciel. Enfin, c'est en 1934 que Walter Baade et Fritz Zwicky ont donné le nom de « supernova » aux « novae » les plus brillantes, en proposant cette fois-ci une cause physique du phénomène : l'effondrement gravitationnel d'une étoile massive en une étoile à neutrons.

Ce n'est que dans les années soixante et soixante-dix du XX^e siècle que les astronomes ont compris la nature des novae et des novae naines. Comme l'a établi l'astronome américain Robert Kraft, les unes et les autres sont des systèmes d'étoiles doubles, mais les causes des cataclysmes sont différentes dans les deux cas. Dans celui des novae dites « classiques », il s'agit d'une explosion thermonucléaire de l'hydrogène dans la couche de matière accumulée par accrétion à la surface de la naine blanche. Cette explosion augmente l'éclat du système de 12 magnitudes en lui donnant une luminosité 100 000 fois supérieure à celle du Soleil. L'explosion de nova éjecte la couche accumulée qui doit donc se reformer avant l'explosion suivante. Sa masse est de 10^{-5} à 10^{-4} masse solaire. Puisque les taux d'accrétion dans les variables cataclysmiques sont de l'ordre de 10^{-10} à 10^{-9} masse solaire par an, les novae classiques explosent tous les dix mille ou cent

mille ans. Cependant, il existe aussi des novae récurrentes, que l'on voit exploser beaucoup plus souvent. Le record est tenu par une nova dans la galaxie d'Andromède qui explose tous les ans. Puisque le compagnon de la naine blanche dans les novae récurrentes est une géante rouge, on hésite à les classer comme variables cataclysmiques (plutôt associées aux naines rouges) et on les range parmi les étoiles dites symbiotiques. Cela dit, le mécanisme de l'explosion d'une nova récurrente est le même que dans les novae classiques, mais le taux de transfert de masse est dix fois supérieur à celui des variables cataclysmiques et, surtout, la naine blanche est très massive : sa masse est proche de la masse

Ah ! les disques d'accrétion ! Ils pullulent dans l'Univers, ils sont omniprésents.

limite de Chandrasekhar (la masse maximale possible pour une naine blanche), c'est-à-dire de 1,4 masse solaire, ce qui augmente sa gravité de surface. La couche de matière accumulée plus rapidement à la surface de la naine blanche est ainsi plus dense que pour les novae classiques, ce qui la rend très explosive, d'où le temps de récurrence très court.

Approcher la masse de Chandrasekhar est extrêmement périlleux, car il suffit que la naine blanche l'atteigne en accumulant de la matière à sa surface pour qu'elle subisse une explosion thermonucléaire qui la détruira sans laisser de résidu stellaire. Ce genre d'événement cataclysmique et catastrophique porte le nom de *supernova de type Ia*, un type qui ne fait pas partie des supernovae prédites par Baade et Zwicky et dont l'utilisation dans la découverte de l'accélération de l'expansion de l'Univers a été récompensée par un prix Nobel, pourtant si rares en astronomie. On peut noter à cette occasion que la « nova » de Tycho

Brache s'est révélée avoir été une supernova de type Ia. Nous avons donc établi un lien entre les variables cataclysmiques et le prix Nobel, ce qui devrait impressionner le lecteur le plus dubitatif sur les mérites de ces systèmes binaires. Pour être honnête, il faut ajouter qu'il existe un modèle concurrent des explosions de supernovae Ia, d'après lequel celles-ci sont provoquées par une coalescence de deux naines blanches, processus similaire à la fusion des deux étoiles à neutrons qui a donné lieu au pulse d'ondes gravitationnelles et au sursaut gamma observés le 17 août 2017 par les détecteurs Ligo et Virgo et la batterie de divers télescopes électromagnétiques.

NOVAE NAINES

Après quelques hésitations et malentendus, on a fini par comprendre au début des années 1970 que le site des éruptions des novae naines associées aux variables cataclysmiques n'est ni la naine blanche ni son compagnon stellaire, mais le disque d'accrétion qui se trouve entre les deux. Un des avantages des variables cataclysmiques est leur proximité et leur densité spatiale relativement importante qui permettent d'observer un nombre considérable de ces systèmes à éclipses. Puisque les périodes orbitales sont courtes, une seule ou quelques nuits d'observation de ces éclipses produisent rapidement une « cartographie » de ces systèmes d'étoiles doubles. C'est ainsi que l'on sait qui est qui dans la binaire et où, le cas échéant, une explosion se produit.

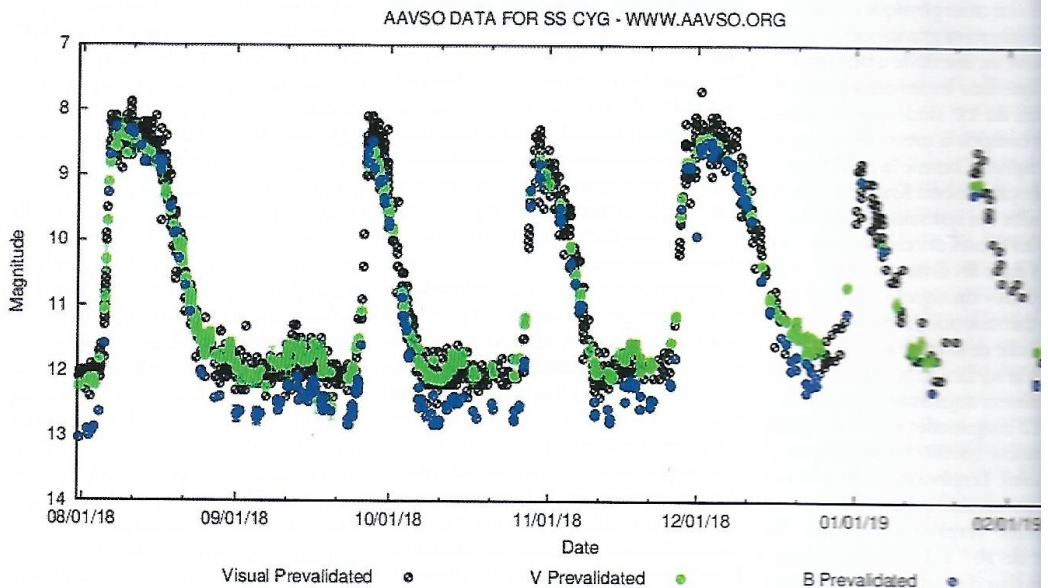
Il restait à trouver la raison du cataclysmisme qui, se produisant dans le disque d'accrétion, n'est certainement pas d'origine nucléaire. Ah ! les disques d'accrétion ! Ils pullulent dans l'Univers, ils sont omniprésents. On les voit, grâce aux splendides images d'ALMA, entourer les étoiles en formation – ce sont les pépinières des planètes, et l'on observe leur présence dans les systèmes d'étoiles doubles de toutes sortes, en particulier sous forme de puissantes sources de rayons X quand ils entourent les étoiles à neutrons ou les trous noirs, et on en détecte aussi la signature, à l'échelle la plus grande, dans les noyaux actifs des galaxies. Mais c'est dans les variables cataclysmiques qu'on les trouve dans leur état le plus pur. Dans d'autres systèmes, ils sont fortement irradiés, ou ils évoluent sous l'effet de leur propre masse (ils sont autogravitants), émettent des vents forts, etc.



Un disque d'accrétion « pur », ou standard, est une machine à diffuser vers le corps central de la matière, en lui enlevant son moment cinétique pour le transporter vers l'extérieur. La matière dans un tel disque suit des orbites képlériennes (celles décrites par la théorie de Newton) dont le moment cinétique augmente avec la distance. Un mouvement radial vers l'intérieur n'est possible que si cette quantité de mouvement rotationnel est réduite. Une manière de la réduire inspirée de la mécanique des fluides est de faire intervenir une sorte de viscosité. Par exemple la poix est plus visqueuse que l'huile, de même l'huile plus visqueuse que l'eau. Plus un fluide est visqueux, plus on peut dissiper de l'énergie et du moment cinétique, donc les réduire en les transformant en une autre forme (pour l'énergie) ou en les déplaçant (pour le moment cinétique), tout en conservant leurs valeurs totales. Les astronomes américains Steven Balbus et John Hawley ont trouvé que le mécanisme de transport du moment cinétique dans les disques d'accrétion chauds est fourni par une instabilité dite « magnéto-rotationnelle » qui génère une « viscosité » turbulente. La viscosité normale n'est pas capable d'agir dans les disques d'accrétion, ils sont trop étendus et même les mélasses les plus gluantes ne

peuvent entraîner l'accrétion. La viscosité turbulente, « anormale », est dissipative et chauffe le disque, qui est refroidi par le rayonnement électromagnétique. En équilibre thermique, le chauffage est exactement compensé par le refroidissement radiatif. Cet équilibre sera stable si le refroidissement varie plus vite avec la température que le chauffage. En effet, dans un tel cas, un accroissement du chauffage et donc de la température sera immédiatement jugulé par une augmentation plus importante du refroidissement et ramènera le disque dans son état précédent. À l'inverse, dans le cas d'un refroidissement, le chauffage ne suivra pas, ce qui rétablira la situation de départ (voir figure 2).

Les disques chauds, ionisés, dans les variables cataclysmiques sont stables. « Chaud » dans ce contexte veut dire que la température (du rayonnement ou effective) est supérieure à 7 000 K. Au-dessous de cette température, le disque devient instable, car les électrons qui assuraient le refroidissement se recombinent en atomes et les fluctuations de chaleur ne peuvent plus être compensées par leur rayonnement. Au-dessous de 5 000 K, le disque redevient stable. Ainsi, un disque d'accrétion ne peut pas rester en équilibre si sa température se trouve en quelque endroit comprise entre



2. Courbe de lumière récente de la nova naine SS Cyg. Observations par des astronomes amateurs en visuel: ● - Filtre V; ● - Filtre B; ● - les ont subi une vérification initiale (« Prevalidated ») pour éliminer des erreurs grossières. (AAVSO)

Située dans les parages de ρ Cyg, la variable cataclysmique SS Cyg (croix violette), étoile de magnitude supérieure à 8 perdue dans la Voie lactée, n'est pas aisée à trouver. Le champ en vignette ci-contre a une largeur d'environ 20 minutes d'arc. (Releve DSS2, visualisé avec Aladin/CDS Strasbourg)



5 000 et 7 000 K. Suite à une augmentation de température, il subira un chauffage cataclysmique qui, en augmentant sa luminosité, l'amènera dans un état chaud: température supérieure à 7 000 K, partout. Mais la température est déterminée par le taux de masse avec lequel le compagnon alimente le disque. Celui-ci n'a pas changé, donc le disque est trop chaud par rapport à son taux d'accrétion. Il se vide et se refroidit, ce qui l'amène à un refroidissement cataclysmique. Cela s'arrête quand la température est partout inférieure à 5 000 K. Mais maintenant le disque est trop froid par rapport à son taux d'accrétion, donc il se remplit et se réchauffe, et arrive finalement à 5 000 K, pour repartir dans une explosion. Et ainsi de suite.

Nous venons de décrire le « cycle limite » qui produit les éruptions de novae naines. On doit ce modèle à plusieurs astronomes européens et américains: Friedrich Meyer, Emmi Meyer-Hofmeister, Józef Smak, John Cannizzo, Craig Wheeler et Pranab Ghosh, qui l'ont mis au point au début des années 1980. Ce modèle

« d'instabilité du disque » (DIM en anglais) reproduit bien les courbes de lumière des novae naines, dont celle de la plus brillante, SS Cygni, qui est montrée sur la figure 2. Cette courbe de lumière est due aux observateurs amateurs de l'AAVSO (American Association of Variable Star Observers), qui avec leurs collègues d'autres pays jouent un rôle important dans l'astronomie des variables cataclysmiques.

La même instabilité thermique est à l'origine des éruptions des binaires X transitoires, cousines germaines des novae naines, dans lesquelles la naine blanche est remplacée par une étoile à neutrons ou un trou noir, mais contrairement à ce qu'on

lit parfois, elle n'est pas responsable des variations de luminosité des quasars.

Les variables cataclysmiques sont des objets modestes, dont le comportement est rarement spectaculaire et pourtant leur charme scientifique est incontestable car, faciles à observer, elles permettent de mettre en œuvre et de tester de grands pans d'une physique intéressante et importante. ■

À propos de l'auteur: Jean-Pierre Lasota est directeur de recherche émérite à l'Institut d'astrophysique de Paris et professeur au Centre d'astronomie Nicolas-Copernic à Varsovie. Il a publié chez Odile Jacob *La Science des trous noirs* (2010) et, avec Nathalie Deruelle, *Les Ondes gravitationnelles* (2018).