

LA MÉNAGERIE DES SUPERNOVÆ

Les explosions en supernova, qui marquent la mort des étoiles, présentent une variété beaucoup plus grande que ne le pensaient les astronomes. Des observations récentes ont révélé des supernovæ 100 fois plus brillantes que d'habitude, ainsi que des explosions mineures qui émettent 100 fois moins de lumière que la normale. Les théoriciens ont élaboré plusieurs hypothèses pour expliquer quels types d'étoiles donnent lieu à certaines de ces explosions hors norme.

ORDINAIRE

Dans une supernova typique, le cœur d'une étoile de masse au moins 10 fois supérieure à celle du Soleil s'effondre en laissant un vestige dense, une étoile à neutrons. Les couches externes explosent en créant une onde de choc supersonique.

COLLISION D'ÉTOILES À NEUTRONS

Les astronomes suggèrent que, lors de la fusion de deux étoiles à neutrons, l'essentiel de leur masse crée un trou noir, mais qu'une petite partie peut s'en échapper et créer ainsi une « kilonova » faiblement lumineuse.

MAGNÉTOILE

L'effondrement d'une étoile en rotation rapide peut produire une étoile à neutrons dotée d'un fort champ magnétique : une magnétoile. L'énergie de rotation, transmise à la matière environnante par ce champ, produirait une supernova ultraluminaire.

FAUSSE ALERTE

Une étoile peut amorcer le processus de supernova mais retrouver l'équilibre, soufflant juste une partie de ses couches externes. Quand l'étoile finit par exploser vraiment, les débris heurtent les couches éjectées auparavant, créant un éclair ultrabrillant.

PAIRES DE PARTICULES

Le cœur brûlant d'une étoile très massive produirait des paires particule-antiparticule. L'étoile deviendrait alors instable et exploserait prématurément, et si vite qu'elle ne laisserait ni étoile à neutrons ni trou noir derrière elle.

EFFONDREMENT TOTAL

Les étoiles les plus massives de toutes ne produiraient, de façon paradoxale, qu'une faible lueur : leur gravité extrême conduirait à concentrer presque toute leur masse dans un trou noir, dont très peu de matière s'échapperait.

Étoile de départ : 10 masses solaires ou plus

Étoile à neutrons

Étoile à neutrons

Étoile de départ : 10 masses solaires ou plus

Étoile de départ : 70 à 150 masses solaires

Étoile de départ : 150 à 300 masses solaires

Étoile de départ : 300 à 1 000 masses solaires

Étoile à neutrons

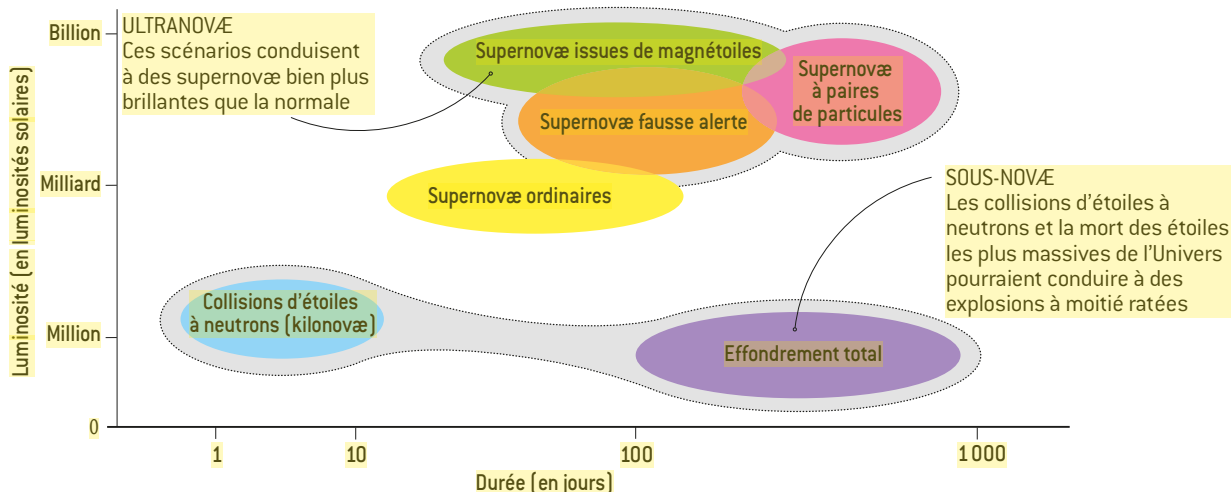
Trou noir

Magnétoile

Étoile à neutrons

Pas d'étoile résiduelle

Trou noir



magnétique 100 à 1000 fois plus intense que celui de la nébuleuse du Crabe et tourner à une vitesse proche du seuil de dislocation. Pour une telle étoile, presque toute l'énergie de rotation serait siphonnée en un mois, et le nuage de débris de supernova serait en conséquence un million de fois plus brillant que la nébuleuse du Crabe. Les chiffres semblent extrêmes, mais on connaît déjà des étoiles à neutrons dotées de champs magnétiques comparables. On les nomme des magnétoiles (ou magnétars), et elles présentent les champs magnétiques les plus puissants que nous connaissions dans l'Univers. Ainsi, les ultranovæ seraient parfois la marque de la naissance et du brusque ralentissement d'une magnétoile en rotation rapide.

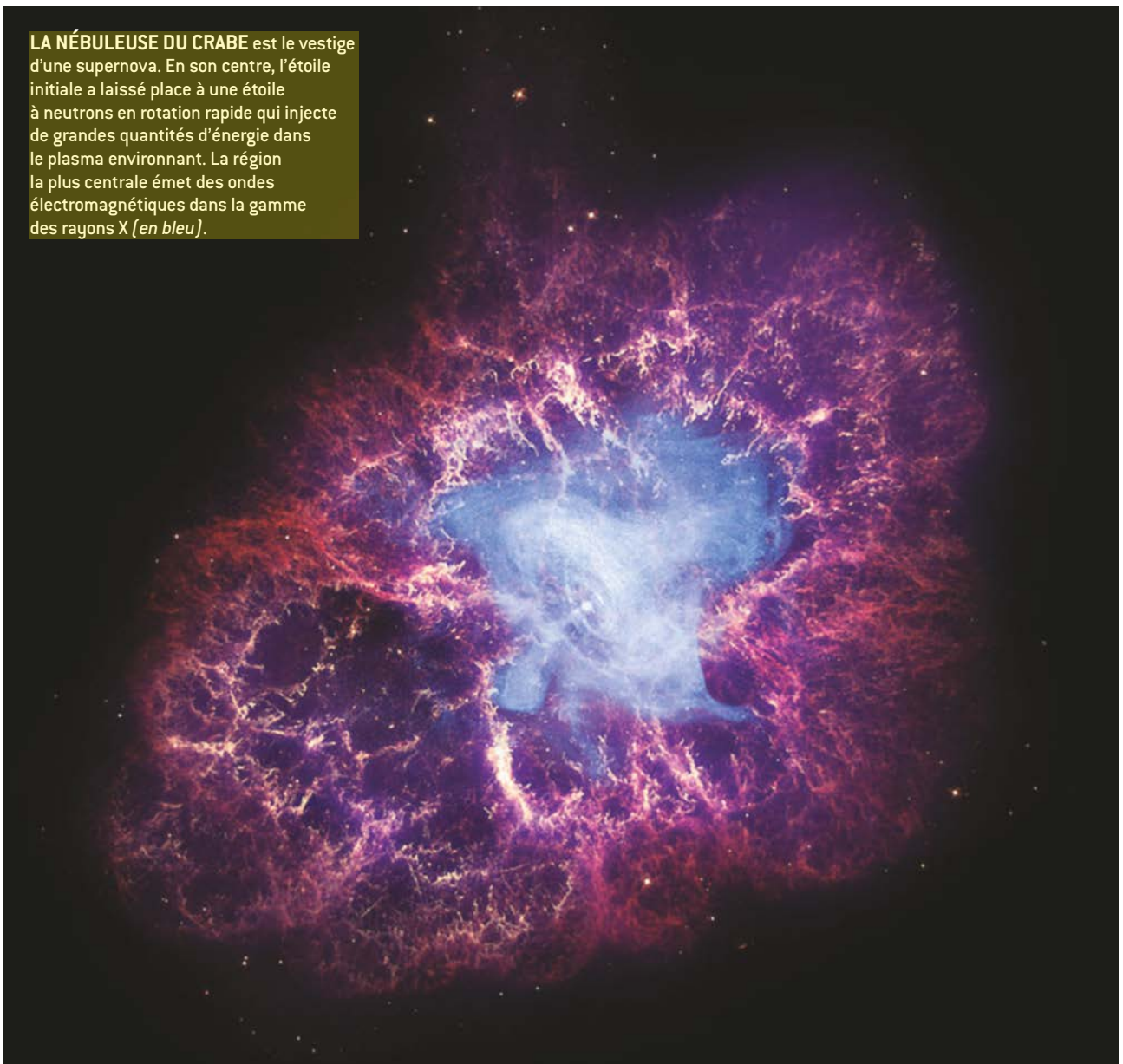
À l'autre extrémité du spectre des supernovæ, les astronomes ont récemment découvert un autre phénomène étrange, celui des supernovæ contre-performantes, 100 fois moins brillantes que les supernovæ ordinaires. La cause possible de ces explosions mineures est débattue, mais les chercheurs soupçonnent que certaines d'entre elles seraient, étonnamment, les derniers souffles étouffés des étoiles les plus massives ayant jamais existé.

On ne connaît pas vraiment la masse maximale qu'une étoile peut atteindre, mais on pense que certaines pourraient atteindre 300 à 1000 fois la masse du Soleil. De telles géantes ne produiraient-elles pas les explosions de supernovæ les plus spectaculaires

de toutes ? Peut-être que non. En fait, elles donnent probablement lieu à des explosions ratées. La gravité d'une telle étoile est si forte qu'une fois que l'astre devient instable, l'effondrement total est inévitable. Il se formerait alors un objet plus dense qu'une étoile à neutrons : un trou noir.

Des modèles théoriques montrent que la majeure partie de l'étoile tombe dans le trou noir et disparaît brutalement de notre vue. En effet, la gravité d'un trou noir est si forte que même la lumière est incapable de s'en échapper. Pour traquer de tels événements, les astronomes et leurs suivis automatisés ne cherchent pas une lumière soudaine dans le ciel, mais une étoile brillante qui s'éteint d'un seul coup.

LA NÉBULEUSE DU CRABE est le vestige d'une supernova. En son centre, l'étoile initiale a laissé place à une étoile à neutrons en rotation rapide qui injecte de grandes quantités d'énergie dans le plasma environnant. La région la plus centrale émet des ondes électromagnétiques dans la gamme des rayons X (en bleu).



© NASA/CXC/SO/F. Seward (composite), NASA/ESA/ASU/U. Hestier et A. Loll (optique), NASA/JPL-Caltech/université du Minnesota/R. Gehrz (infrarouge)

Bien qu'elles ne parviennent pas à produire une détonation, certaines de ces étoiles formant des trous noirs peuvent au moins émettre un murmure. Le cœur de certaines étoiles géantes est entouré d'un halo diffus d'hydrogène gazeux. Quand le trou noir se forme, une majeure partie de l'étoile tombe dedans, mais une fraction du halo pourrait s'échauffer et être soufflée, produisant une faible lueur. La mort d'une très grosse étoile produirait donc, paradoxalement, une supernova remarquablement faible et pâle.

Un ballet cosmique discret

Un autre type d'explosion à luminosité inférieure à la normale pourrait découler d'un événement d'un tout autre type: la collision de deux étoiles à neutrons. Les étoiles massives naissent souvent sous la forme de paires, tournant autour du centre de masse du système ainsi formé. Ces étoiles évoluent normalement et explosent en supernovæ classiques l'une après l'autre. Et si la paire n'est pas dissociée, ce qui reste est un système binaire formé de deux étoiles à neutrons (ou une étoile à neutrons et un trou noir, ou deux trous noirs). Au fil du temps, les deux objets compacts se rapprochent, finissent par entrer en collision et fusionnent pour donner éventuellement un trou noir (voir les figures pages 58 et 59). Lors d'une telle rencontre, les forces gravitationnelles extrêmes (environ 10 milliards de fois supérieures à l'attraction qu'exerce la Terre sur notre corps) peuvent arracher environ 1 % de la couche supérieure des étoiles et l'expédier dans l'espace (les 99 % restants finissent dans le trou noir).

Cette petite quantité de matière qui échappe au trou noir se présenterait sous une forme assez exotique (un nuage dense de particules, surtout des neutrons, avec quelques protons et électrons). À mesure que la pression baisse dans ce gaz, les particules se lient en noyaux de plus en plus lourds par l'ajout progressif de neutrons, ce qui produit de l'or, du platine et du mercure, mélangés à des éléments radioactifs, dont l'uranium et le thorium. Les collisions d'étoiles à neutrons seraient l'un des rares événements cosmiques permettant à ces éléments lourds de se former.

L'abondance de matériau radioactif devrait faire briller le nuage de débris comme une supernova. Mais à cause du peu de masse en jeu, la lumière serait environ

100 fois plus faible qu'une supernova ordinaire, et ne durerait que quelques jours. Avec mon étudiante Jennifer Barnes, de l'université de Californie à Berkeley, nous avons montré qu'en théorie, du fait de la composition particulière en métaux lourds de ces nuages, la lumière émise devrait avoir une «couleur» caractéristique, rouge foncé ou infrarouge. Pour désigner ce phénomène, nous parlons de kilonova.

En juin 2013, une émission de rayons gamma, observée par le satellite *Fermi*, indiquait probablement une fusion de deux étoiles à neutrons. Les astronomes ont pointé le télescope spatial *Hubble* dans cette direction et ils ont enregistré une faible lueur infrarouge. Quelques semaines plus tard, elle avait disparu. Les données sont peu nombreuses, mais en accord avec les prédictions relatives à une kilonova. Si cette identification est correcte, c'est la première fois que nous avons assisté directement à la production de métaux lourds. En observant davantage de ces kilonovæ, nous pourrions déterminer la quantité de métaux synthétisée par ces explosions, et savoir si elles rendent compte de l'abondance de l'or, du platine et d'autres éléments lourds dans l'Univers.

D'ici quelques années, de nouveaux télescopes automatisés tels que le *Zwicky Transient Facility*, près de San Diego et opérationnel dès cette année, le *Large Synoptic Survey Telescope*, en cours de construction au Chili, et le *Wide Field Infrared Survey Telescope*, que la Nasa projette d'envoyer dans l'espace, balaieront la majeure partie du ciel à intervalles de quelques jours avec une extrême sensibilité, en accumulant les données sur les supernovæ. De même, les superordinateurs seront assez puissants pour effectuer des simulations tridimensionnelles détaillées de ces événements et permettront de visualiser ce qui peut se passer au plus profond des explosions d'étoiles.

Les indices recueillis dans les années à venir mettront à l'épreuve nos théories sur les nombreuses formes que peut prendre la mort d'une étoile. Chaque scénario décrit ici est physiquement plausible, mais il reste à être prouvé. Avec des observations supplémentaires de supernovæ inhabituelles, nous espérons déterminer lesquelles de ces possibilités explosives sont effectivement réalisées. Et très probablement, l'Univers se révélera encore plus étrange que nous ne l'avions imaginé. ■

De façon paradoxale, la mort des plus grosses étoiles produirait des **supernovæ faibles**

■ BIBLIOGRAPHIE

J. Barnes et D. Kasen, *Effect of a high opacity on the light curves of radioactively powered transients from compact object mergers*, *Astrophysical Journal*, vol. 775(1), pp. 18-26, 2013.

J. C. Mauerhan et al., *The unprecedented 2012 outburst of SN2009ip: a luminous blue variable star becomes a true supernova*, *MNRAS*, vol. 430(3), pp. 1801-1810, 2013.

A. Gal-Yam, *Les super-supernovæ*, *Pour la Science*, n° 417, juillet 2012.

D. Kasen et L. Bildsten, *Supernova light curves powered by young magnetars*, *Astrophysical Journal*, vol. 717(1), pp. 245-249, 2010.