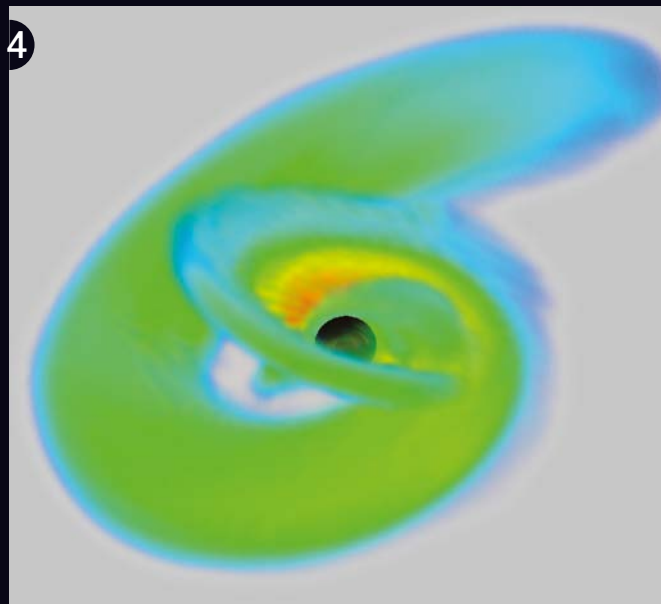
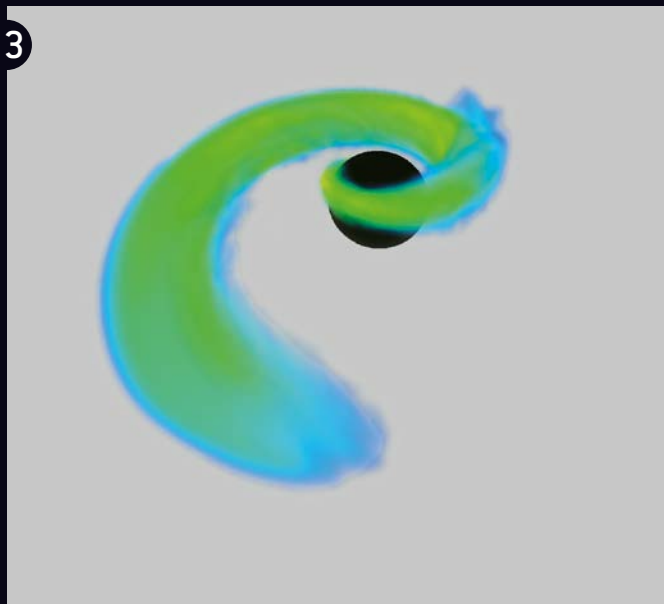




et faisant 10 masses solaires ou plus. Ces astres vivent des millions d'années pendant que leur hydrogène subit des réactions de fusion et forme des éléments de plus en plus lourds (hélium, carbone, oxygène, etc.). Une fois que tout a été transformé en fer, la fusion ne produit plus d'énergie mais en requiert. Elle ne peut donc plus se poursuivre. Il n'y a alors plus de force pour contrebalancer la gravité. La partie la plus profonde du cœur de l'étoile s'effondre sur elle-même et voit son volume comprimé d'un facteur un million, se transformant en un noyau ultradense, nommé étoile à neutrons: une boule de seulement quelques kilomètres de diamètre, mais de masse supérieure à celle du Soleil. L'énorme quantité d'énergie libérée lors de l'effondrement gravitationnel souffle le reste de l'étoile en un gigantesque feu d'artifice.

Pour se faire une idée de la puissance d'une explosion de supernova typique, disons qu'elle est comparable à celle qui serait libérée si le Soleil consommait toutes ses réserves d'hydrogène (de quoi entretenir sa combustion nucléaire pendant plus de 10 milliards d'années) en quelques secondes. Quand une supernova explose, la température interne de l'étoile monte à environ 3 milliards de degrés. Cela déclenche une onde de choc supersonique qui laisse dans son sillage un mélange d'éléments lourds fraîchement fusionnés, tels que du silicium, du calcium, du fer et des isotopes radioactifs du nickel, du cobalt et du titane.

En quelques minutes, l'étoile est soufflée en un nuage de cendres et de débris radioactifs, éjectés à une vitesse de 30 millions de kilomètres par heure, soit quelques pour cent de la vitesse de la lumière.

Le Soleil est trop peu massif pour finir en supernova, mais si c'était le cas, la première manifestation sur Terre en serait un bref éclair de rayons X intenses qui tuerait toute vie sur la planète. En quelques minutes, le nuage de débris solaires doublerait de taille et deviendrait un millier de fois plus brillant que le Soleil, mais il resterait trop opaque pour libérer toute la lumière piégée. Au bout de quelques heures, le nuage engloberait la Terre. Après quelques semaines, les cendres du Soleil auraient envahi tout le Système solaire. À ce stade, le nuage de débris deviendrait translucide et la lumière s'en échapperait, atteignant un pic d'environ un milliard de fois la luminosité solaire avant de pâlir définitivement.

Les astronomes n'observent presque jamais le bref éclair de rayons X émis par une supernova, et ils ne sont que rarement en mesure de retrouver une image d'archive de l'étoile telle qu'elle était avant son explosion. En général, on n'enregistre que la suite du processus: le nuage géant de débris radioactifs en expansion qui luit pendant des semaines, voire plus longtemps. En examinant cette lumière et les cendres, les astronomes tentent de reconstituer le passé de cette étoile, quel était son type et pourquoi elle a été détruite.

Parmi les supernovæ insolites récemment découvertes, les plus spectaculaires sont peut-être les explosions hyperénergétiques (ce que j'appelle des ultranovæ) qui sont au moins 100 fois plus lumineuses que les supernovæ ordinaires. Ce sont les supernovæ les plus brillantes, de sorte qu'elles sont visibles pratiquement jusqu'aux frontières de l'Univers observable. De tels événements sont très rares: il s'en produit peut-être un pour mille supernovæ ordinaires. Les astronomes n'ont pas encore assez d'éléments probants pour expliquer pourquoi ces explosions sont si brillantes, mais ils ont esquissé trois scénarios possibles. L'un d'eux explique peut-être toutes les ultranovæ que nous voyons, mais il est plus probable que les trois processus coexistent.

Des supernovæ ultrabrillantes

L'idée la plus naturelle est d'associer les ultranovæ aux étoiles extrêmement massives. Ces étoiles très grosses sont sensibles à toute une série d'instabilités. En particulier, le cœur des étoiles pesant entre 150 et 250 masses solaires pourrait devenir tellement chaud qu'un déluge de paires de particule matière-antimatière (plus précisément, des électrons et des positrons) s'y formerait. La production de ces particules a un coût énergétique qui saperait la force de pression s'opposant à la gravité

de l'étoile et entraînerait l'effondrement de son cœur, alors que son combustible nucléaire n'est pas totalement épuisé. Le résultat serait alors désastreux. La compression du cœur accélérerait la fusion qui s'emballerait, brûlant presque tout instantanément. Cette brusque libération d'énergie renverserait l'effondrement et ferait exploser l'étoile. Elle ne laisserait même pas d'étoile à neutrons derrière elle.

Ces explosions nucléaires géantes produiraient des nuages de débris 1000 fois plus radioactifs que ceux des supernovæ ordinaires. Et puisque ces nuages sont supposés extrêmement massifs et opaques, la lumière mettrait une année ou plus à s'en échapper. Les astronomes s'attendent donc à ce que les suites de ces explosions soient particulièrement brillantes et durables. Quelques-unes des ultranovæ récemment découvertes présentent ces caractéristiques. Il n'est pas encore clair pour les astronomes si ces observations confirment ce scénario ou si d'autres explications sont possibles. De futures observations d'autres événements aussi brillants et prolongés permettront peut-être de mieux identifier la composition et la vitesse du nuage de débris stellaires, et ainsi de confirmer ou d'infirmer ce scénario.

Une autre idée pour expliquer les ultranovæ est qu'elles auraient leur origine dans des étoiles de masse légèrement plus faible que les précédentes (autour de 70 à 150 masses solaires). On pense que ces étoiles sont sujettes à des instabilités comparables à celles de leurs sœurs plus massives, mais les conditions sont souvent moins sévères. Quand l'étoile commence à s'effondrer et que la fusion rapide de son carburant nucléaire s'enclenche, la force s'opposant à la gravité pourrait reprendre le dessus. L'étoile rebondirait, se dilaterait et mettrait un frein aux réactions nucléaires avant qu'elles ne soient hors de contrôle. L'astre retrouverait l'équilibre. Mais dans le processus, il aura probablement soufflé une bonne partie de ses couches externes, produisant une supernova « imposteur » : un sursaut qui ressemble à une pâle supernova.

Les étoiles de cette gamme de masses pourraient subir plusieurs de ces hoquets, perdant à chaque fois un peu plus de matière, jusqu'à ce qu'elles finissent par

épuiser leur combustible nucléaire. Elles exploseraient alors comme des supernovæ ordinaires, en expulsant leurs débris dans un environnement déjà encombré par la matière rejetée lors des crises précédentes. La collision violente du nuage de débris de la supernova avec ces restes devrait produire des feux d'artifice extrêmement brillants, qui expliqueraient certaines des ultranovæ.

En 2009, les astronomes ont remarqué ce qui ressemblait à une supernova assez ordinaire, quoique pâle. Nommée SN2009ip, elle a disparu en quelques semaines et a ensuite été essentiellement oubliée. Un an plus tard, à la surprise générale, on

Certaines
explosions stellaires
sont anormalement brillantes,
**100 fois plus
lumineuses que
les supernovæ
ordinaires**

observait une autre « supernova » pâle exactement au même endroit. Apparemment, l'étoile n'était pas encore morte. En 2012, les astronomes ont repéré une troisième bouffée, puis un mois plus tard une autre, très lumineuse cette fois-ci.

Certains chercheurs pensent que l'avant-dernier événement correspondait à la mort réelle de l'étoile, et que le dernier éclat, le plus lumineux, résultait du choc entre le nuage de débris de la supernova et le matériau laissé par les précédents hoquets. D'autres pensent que l'étoile est encore en vie et continuera à nous offrir son spectacle épisodique. Ce qui est certain, c'est que nous venons d'assister à un type d'instabilité violente dont souffrent certaines étoiles massives.

Enfin, une troisième théorie des ultranovæ considère que leur luminosité inhabituelle a moins à voir avec la masse énorme des étoiles qu'avec leur vitesse de rotation extrême. Des astres de 10 à 60 masses solaires produisent vraisemblablement des supernovæ ordinaires, laissant en leur cœur une étoile à neutrons. Mais si l'étoile initiale était en rotation rapide, l'effondrement accélérerait cette rotation jusqu'à des vitesses extrêmes, de la même façon qu'un patineur déjà en rotation tourne plus vite quand il ramène ses bras près du corps. En principe, une étoile à neutrons peut atteindre des vitesses de rotation de l'ordre de 1000 tours par seconde ; au-delà, la force centrifuge la disloquerait.

L'énergie cinétique emmagasinée dans une « toupie » aussi massive est énorme.

Comment pourrait-elle déclencher une ultranova ? Les étoiles à neutrons ont des champs magnétiques très intenses qui peuvent transporter cette énergie. Pour comprendre comment, imaginez que vous fassiez tourner un aimant de réfrigérateur dans la paume de votre main. Ce faisant, vous tordez le champ magnétique qui l'entoure. Même si vous ne pouvez pas le voir ni le sentir, une petite partie de l'énergie que vous avez dépensée pour faire tourner l'aimant est emportée dans l'espace sous la forme d'ondes électromagnétiques.

Nous pensons que le même processus se produit aussi, à bien plus grande échelle, autour des étoiles à neutrons. On en aurait un exemple spectaculaire avec la nébuleuse du Crabe (voir la figure page 62), qui correspond aux vestiges d'une supernova consignée par les astronomes chinois en l'an 1054 de notre ère. Aujourd'hui, la lumière qui nous parvient de la nébuleuse est alimentée par une étoile à neutrons en rotation qui engendre un tourbillon de plasma aimanté. Depuis un millier d'années, le champ magnétique déformé a extrait de l'énergie de rotation de l'étoile à neutrons et chauffé le gaz environnant, alimentant ce magnifique spectacle.

En 2010, Lars Bildsten, de l'université de Californie à Santa Barbara, et moi avons suggéré qu'une version extrême de ce processus expliquerait la forte luminosité de certaines ultranovæ. L'étoile à neutrons devrait dans ce cas présenter un champ