

Le 9 septembre 2018, un télescope robotisé effectuait un relevé de routine du ciel nocturne lorsqu'il repéra ce qui ressemblait à une nouvelle étoile. Au fil des heures, cette «étoile» devint dix fois plus brillante. Un logiciel que j'avais écrit pour identifier des événements célestes inhabituels déclencha alors une alerte. Il faisait nuit en Californie et je dormais, mais mes collègues de l'autre côté de la Terre réagirent promptement à ce signalement. Douze heures plus tard, divers télescopes terrestres et spatiaux avaient recueilli assez de données pour confirmer qu'il s'agissait d'une supernova – une explosion d'étoile – dans une galaxie lointaine. Mais cet événement n'avait rien d'une supernova «banale».

En combinant les mesures des différents télescopes, nous sommes parvenus à la conclusion qu'après avoir brillé pendant des millions d'années, l'étoile a fait quelque chose d'aussi surprenant que mystérieux. Elle s'est subitement débarrassée de ses couches de gaz externes, formant ainsi un cocon de poussière et de gaz autour d'elle. Quelques jours à une semaine plus tard, l'étoile a explosé. Les débris de l'explosion sont alors entrés en collision avec le cocon et ont ainsi produit un flash inhabituellement brillant et de courte durée. Parce que l'explosion a eu lieu dans une galaxie très éloignée (sa lumière a mis près de un milliard d'années à atteindre la Terre), elle n'était pas assez brillante pour être vue à l'œil nu. Cependant, elle était assez lumineuse pour nos observatoires. Et grâce à une recherche rétrospective dans les données des télescopes, nous avons même réussi à retrouver l'étoile en train de se «deshabiller» deux semaines avant d'exploser, alors qu'elle était encore cent fois moins brillante que lors de son explosion.

Au cours de ma thèse, j'ai ainsi observé des étoiles qui ont expulsé une part importante de leur gaz dans les derniers jours de leur vie lors d'éruptions violentes, mais aussi des astres dont le vestige du cœur est resté actif après l'effondrement de l'étoile et a émis des jets de matière se déplaçant à des vitesses hyperrelativistes (très proches de la vitesse de la lumière). Ces processus extrêmes semblent rares et ne se conforment pas aux schémas standard que les astrophysiciens ont dressés sur la mort des étoiles. Mais le simple fait qu'ils puissent se produire de temps à autre indique que nous avons encore beaucoup de choses à comprendre sur les mécanismes essentiels de la vie et de la mort des étoiles.

Grâce aux progrès techniques des instruments d'observation et de l'analyse des données, les astrophysiciens sont en train d'enrichir régulièrement cette collection de fins stellaires atypiques qui remettent en cause les scénarios classiques. Ces événements soulèvent des

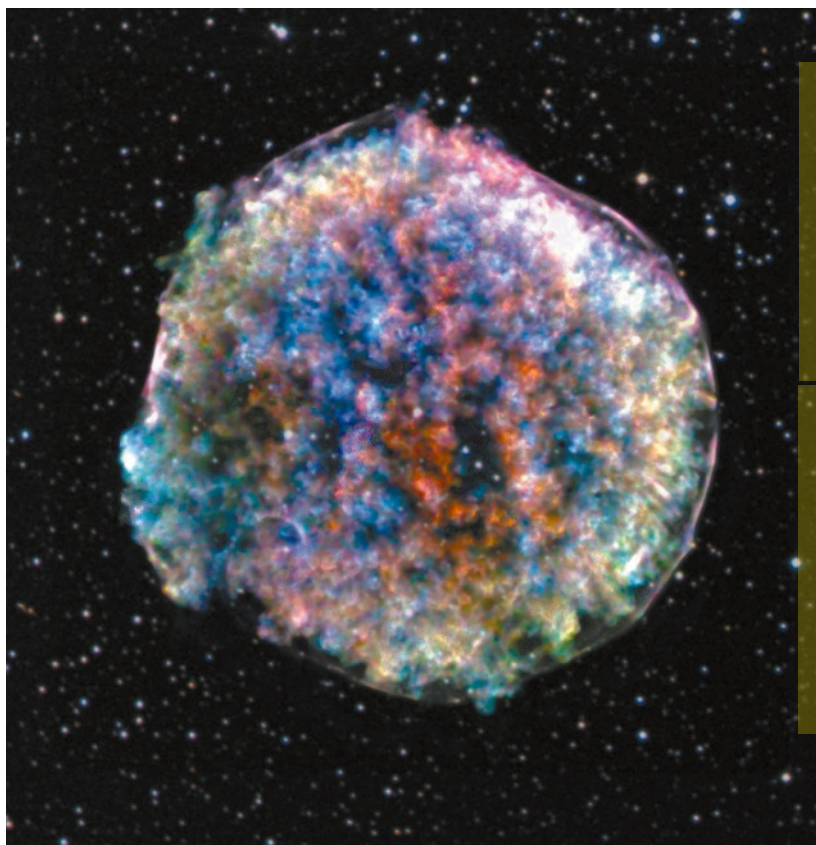
questions fondamentales: quels sont les facteurs qui déterminent comment un astre va mourir? Pourquoi certaines étoiles terminent-elles leur vie avec des éruptions ou des jets violents, tandis que d'autres explosent, tout simplement? Nous ne sommes qu'au début de l'exploration de ces fins exceptionnelles d'étoiles, mais nous accumulons progressivement des indices offrant des pistes de réponses.

UNE NOUVELLE ÉTOILE

L'histoire de la naissance, de la vie et de la mort d'une étoile est celle d'une compétition entre différentes forces. Les étoiles naissent dans de vastes nuages interstellaires d'hydrogène. Le gaz s'accumule dans certaines régions sous l'effet de l'attraction de la force gravitationnelle. Cette dernière devient assez intense pour s'opposer à des forces qui tendent à disperser le gaz, comme la pression des champs magnétiques. Lorsqu'une portion du nuage s'effondre sur lui-même en une protoétoile, la densité augmente de 20 ordres de grandeur et sa température croît de plusieurs millions de degrés. Dans ces conditions, les atomes d'hydrogène entrent en collision avec suffisamment d'énergie pour se lier et former de l'hélium. Cette fusion libère de l'énergie: la boule de gaz chauffe et brille. Une nouvelle étoile est née.

Avec la robotisation des télescopes, nous sommes capables de repérer des milliers de supernovæ chaque année

Comme le nuage initial, l'étoile est elle-même le théâtre d'une compétition entre la gravitation, qui attire le gaz vers l'intérieur, et la pression due à la fusion nucléaire, qui le repousse vers l'extérieur. L'évolution d'une étoile est donc un équilibre délicat entre ces forces; un équilibre qui dépend de la température et de la masse de l'astre. Dans les étoiles de faible masse et en conditions modérées, l'hydrogène fusionne lentement en hélium et c'est tout: ainsi, le Soleil est



né il y a plus de 4 milliards d'années et brûle encore son hydrogène. Les étoiles plus massives présentent une pression gravitationnelle plus forte et une température plus élevée. Elles consomment rapidement leur carburant nucléaire et ont une vie très courte, de l'ordre de 10 millions d'années. Ces fourneaux stellaires ont cependant une chaîne de fusion nucléaire riche et synthétisent des éléments «lourds» (oxygène, carbone, néon, fer, etc.).

La masse d'une étoile détermine aussi comment elle mourra. Les étoiles de moins de huit masses solaires environ connaissent une fin relativement paisible. Une fois la réserve de combustible nucléaire épuisée, s'y amorce la fusion d'éléments plus lourds. Ces réactions étant plus énergétiques, l'étoile enfle et expulse dans l'espace ses couches externes, formant une magnifique nébuleuse planétaire. Puis, faute d'une température suffisante pour que les processus de fusion se poursuivent, le noyau de l'étoile se contracte et devient alors une naine blanche: un objet chaud et dense d'environ une demi-masse solaire pour une taille à peine supérieure à celle de la Terre.

Les étoiles massives, en revanche, connaissent une fin violente en raison des températures et des pressions énormes régnant dans leur cœur. Quand elles atteignent le stade de production du fer, la chaîne de combustion nucléaire se brise. Le fer est si stable qu'il ne

En 1572, l'astronome Tycho Brahe a observé à l'œil nu la supernova SN1572. Les restes de l'étoile (le «rémanent») sont encore visibles aujourd'hui, mais pas à l'œil nu. En 2019, les astronomes ont étudié la distribution tridimensionnelle et hétérogène du gaz et de poussière expulsés lors de cette explosion. L'image en fausses couleurs a été prise par le télescope spatial *Chandra*. On y voit le silicium qui se déplace vers la Terre (en bleu) ou s'en éloigne (en rouge). Les autres couleurs correspondent à d'autres éléments.

fusionne pas pour former des éléments plus lourds. Conséquence: la pression qui s'opposait à la gravité disparaît, et le cœur de l'étoile s'effondre sur lui-même. Sous l'effet de la pression extrême, les atomes sont alors si proches les uns des autres qu'une nouvelle force entre en scène: l'«interaction forte». Une forme de pression inédite rétablit un équilibre. Le cœur devient alors une étoile à neutrons, c'est-à-dire un état très dense où la matière est essentiellement constituée de neutrons.

Si l'étoile est assez massive (à partir de 20 masses solaires environ), la gravité l'emporte même sur l'interaction forte et l'étoile à neutrons s'effondre encore davantage jusqu'à former un trou noir. Dans un cas comme dans l'autre, quand le cœur périclité, une partie de l'énergie libérée provoque une violente éjection des couches externes de l'étoile dans l'espace. Cette explosion spectaculaire, une supernova, est si lumineuse que, pendant quelques jours, elle brille plus que l'ensemble de toutes les autres étoiles de sa galaxie.

Depuis des millénaires, les humains ont remarqué à l'œil nu ce phénomène de supernova. Notamment, en 1572, l'astronome danois Tycho Brahe a ainsi constaté la formation d'une «nouvelle étoile» dans la constellation de Cassiopée. Elle était aussi brillante que Vénus, un éclat qu'elle a conservé pendant plusieurs mois avant de s'estomper. Le vestige de l'explosion est encore visible aujourd'hui (voir l'image ci-contre).

AU-DELÀ DE LA VOIE LACTÉE

Pour qu'une supernova soit visible à l'œil nu, elle doit se produire dans la Voie lactée, comme la supernova de Tycho, ou dans l'une de ses galaxies satellites. Cet événement est rare. Il ne me sera peut-être pas donné de voir un jour une telle explosion sans l'aide d'un télescope, mais l'espoir est permis. Au cours du ^{xx}e siècle, les astronomes ont commencé à utiliser des télescopes pour chercher des supernovæ au-delà de la Voie lactée. La méthode est simple: en faisant des observations régulières de certaines galaxies, nous traquons des objets qui s'allument puis s'éteignent, des «événements astronomiques transitoires». Avec la robotisation des télescopes et le développement de caméras très performantes, nous sommes capables de repérer des milliers de supernovæ chaque année.

Dans les années 1960, grâce au développement de télescopes spatiaux, les astronomes ont découvert des événements astronomiques transitoires particuliers, les sursauts de rayons gamma (ou GRB, pour *gamma-ray burst*), de brèves bouffées de rayons gamma. C'est seulement dans les années 1990 que les chercheurs ont compris que ces sursauts gamma sont associés à la mort violente de certaines étoiles massives qui s'effondrent en étoiles à neutrons ou