

l'explosion est-il fréquent? Quel est le mécanisme physique qui le produit?

Mes recherches ont pris une direction inattendue. Je ne m'intéressais plus seulement aux sursauts gamma, mais aussi aux signes avant-coureurs de l'explosion des étoiles massives.

C'est seulement dans les six derniers mois de ma thèse que j'ai enfin trouvé un candidat solide pour une émission rémanente de sursaut gamma (notée SN2020btl). Le 28 janvier 2020, alors que j'examinais les événements sélectionnés par mon code, j'ai remarqué quelque chose de prometteur. La prudence était de mise (au fil des années, j'avais eu de nombreux faux espoirs). J'ai immédiatement demandé des observations complémentaires sur un télescope de La Palma, aux îles Canaries. Elles ont confirmé que cette source s'atténuait rapidement, comme on s'y attend pour une émission rémanente. Cette nuit-là, j'ai sollicité des observations urgentes sur le télescope *Hale* de cinq mètres, à l'observatoire Palomar, qui ont montré que la source continuait de s'affaiblir. La nuit suivante, j'ai obtenu des données dans la gamme des rayons X grâce au télescope spatial *Neil Gehrels-Swift Observatory*, confirmant qu'il s'agissait d'une émission rémanente de sursaut gamma. La nuit d'après encore, j'ai réussi à obtenir un bref créneau sur le télescope *Keck*, à Hawaï, dans l'espoir de mesurer la distance à laquelle s'était produite l'explosion.

Équipée d'un sac de couchage, j'ai dormi dans la salle d'observation à distance de mon université, l'institut de technologie de Californie. J'avais réglé mon réveil sur quatre heures du matin pour préparer mon observation. Celle-ci était programmée en toute fin de nuit. J'étais stressée. À une heure où le ciel s'éclaircit rapidement, allais-je obtenir des mesures suffisantes de ma source déjà assez peu lumineuse? J'ai fait au mieux, puis j'ai téléphoné à mon collègue Dan Perley, de l'université John Moores, à Liverpool, au Royaume-Uni, et nous avons examiné les données ensemble. J'avais eu de la chance. La source était faible, mais il y avait une signature évidente dans la lumière de l'événement qui nous a permis de mesurer sa distance. Quand cette étoile a explosé, l'Univers n'avait que 2,3 milliards d'années. Les photons de l'explosion ont mis 11,4 milliards d'années pour atteindre la Terre. À une telle distance, tout autre objet transitoire qu'un sursaut gamma aurait été impossible à observer.

Quelques mois après cette première émission rémanente, nous en avons trouvé une deuxième. Pour mettre cela en perspective, antérieurement à ZTF, seules trois émissions rémanentes avaient été trouvées sans l'aide de la détection du sursaut gamma associé, alors que nous en avons trouvé deux en quelques mois. Comme notre stratégie de recherche

semblait opérationnelle et efficace, nous espérons en trouver rapidement d'autres.

Pour le moment, avec deux émissions rémanentes sur lesquelles travailler, il est difficile d'apporter des réponses aux nombreuses questions qui se sont accumulées sur ce sujet. Il est même difficile de dire si une émission rémanente donnée est un sursaut gamma normal dont on aurait manqué le jet ou s'il a pu être produit par un autre type de phénomène. Il nous faudra trouver davantage d'événements avant de pouvoir dire si nous assistons à des phénomènes vraiment différents.

ÉTOFFER LE CATALOGUE

Au cours de mes travaux, nous avons découvert de nombreux types inhabituels d'explosions stellaires: AT2018cow dont nous avons peut-être vu la naissance de l'objet compact résultant; l'étrange supernova Ic-BL (le type associé aux sursauts gamma) qui s'est fracassée sur un cocon de matière mais ne présentait pas de jet; deux autres supernovæ Ic-BL qui avaient probablement des jets, mais moins énergétiques et plus larges que ceux des sursauts gamma ordinaires; et, vers la fin de ma thèse, deux véritables émissions rémanentes, dont l'une s'est révélée être associée à un sursaut gamma.

L'histoire et le destin des étoiles semblaient s'organiser suivant des catégories simples et faciles à caractériser. Mais depuis peu, la mort des astres semble suivre des chemins bien plus riches et surprenants. Pour l'instant, les astronomes sont tels des zoologistes, explorant des territoires inconnus et caractérisant les différentes espèces qu'ils rencontrent (dans mon cas, des explosions stellaires). L'étape suivante consistera à repérer des motifs caractéristiques parmi les événements atypiques que nous découvrirons. Avec quelle prévalence se produit chaque type d'explosions? Se produisent-elles dans des galaxies aux caractéristiques particulières (riches ou pauvres en éléments lourds, en poussière, etc.)? Ces différentes catégories correspondent-elles à des «espèces» vraiment différentes, ou bien sont-elles simplement des manifestations variées d'un même phénomène? Mes collègues et moi travaillons déjà sur quelques pistes impliquant la vitesse de rotation de l'étoile ou encore des interactions de l'astre avec d'autres étoiles.

Pour répondre à ces questions, nous aurons besoin d'un catalogue bien plus étoffé. D'ici à quelques années, l'observatoire *Vera-Rubin*, actuellement en construction au Chili, utilisera la plus grosse caméra numérique jamais conçue (plus de 3 milliards de pixels) pour détecter 10 millions d'événements transitoires chaque nuit. C'est dix fois plus que le ZTF. Avec un instrument aussi puissant, il sera possible de comprendre pourquoi les étoiles meurent de mille et une façons différentes. ■

BIBLIOGRAPHIE

O. J. Roberts et al., **Rapid spectral variability of a giant flare from a magnetar in NGC 253**, *Nature*, vol. 589, pp. 207-210, 2021.

A. Y. Q. Ho et al., **ZTF20aajnksq (AT 2020btl) : A fast optical transient at $z \approx 2.9$ with no detected gamma-ray burst counterpart**, *The Astrophysical Journal*, vol. 905, article 98, 2020.

A. Y. Q. Ho et al., **Evidence for late-stage eruptive mass loss in the progenitor to SN2018gep, a broad-lined Ic Supernova : Pre-explosion emission and a rapidly rising luminous transient**, *The Astrophysical Journal*, vol. 887, article 169, 2019.

D. Kasen, **Des kilonovæ aux ultranovæ**, *Pour la Science*, n° 474, avril 2017.

MIGUEL MONTARGÈS
est postdoctorant au Lesia
(Laboratoire d'études spatiales
et d'instrumentation en
astrophysique), à l'observatoire
de Paris et à l'université PSL (Paris
Sciences & Lettres). Il est spécialiste
des supergéantes rouges
et notamment de Bételgeuse.



L'énigme de Bételgeuse est probablement résolue

La baisse record de luminosité de l'étoile Bételgeuse en 2019 et 2020 a suscité un vif intérêt, certains imaginant que l'astre était sur le point de se transformer en supernova. Il n'en est rien. L'astrophysicien Miguel Montargès nous raconte comment, avec ses collègues, il a réussi à expliquer ce phénomène exceptionnel.

Pourquoi Bételgeuse est-elle une étoile si médiatique ?

Dans le ciel, Bételgeuse ne passe pas inaperçue. Elle appartient à la constellation d'Orion que l'on reconnaît inmanquablement grâce à sa ceinture, composée de trois étoiles alignées. De part et d'autre de cette dernière, on trouve deux étoiles très brillantes, une bleue, Rigel, et une rouge, Bételgeuse.

Bételgeuse est, après Antarès, la deuxième supergéante rouge la plus proche du Soleil. Comme Antarès se situe plus près du centre galactique, elle est cernée de nombreuses autres étoiles. Elle est donc un peu plus difficile à repérer. Bételgeuse, plus isolée, se détache parfaitement dans le ciel nocturne. Elle brille dans l'infrarouge aussi intensément que Vénus dans le visible. Les astronomes, professionnels et amateurs, ont ainsi une affection particulière pour cette étoile. Alors, quand il lui arrive un événement extraordinaire comme une chute importante de sa luminosité, cela attire nécessairement l'attention.

On parle d'une étoile proche, mais à quelle distance se trouve-t-elle exactement ?

De façon étonnante, on connaît assez mal cette distance. Quand une étoile est proche, on utilise la technique de la parallaxe. Pour comprendre le principe de cette mesure, tendez un bras devant vous avec le pouce dressé. Regardez-le avec l'œil gauche, puis avec l'œil droit. Le doigt semble bouger par rapport à l'arrière-plan fixe. Avec la mesure de ce « déplacement », ou parallaxe, et un peu de trigonométrie, il est possible de calculer la distance entre vos yeux et le pouce. Avec les étoiles, on utilise la même approche, les deux yeux étant remplacés par votre télescope sur Terre, ou en orbite, à six mois d'intervalle, donc à deux positions opposées lors de la révolution de la planète autour du Soleil. Cette technique fonctionne pour les étoiles les plus proches, car plus elles sont lointaines, plus la parallaxe est faible et difficile à évaluer.

Pour Bételgeuse, cette méthode devrait donner de bons résultats, *a priori*. Il n'en est rien... Pour une raison étonnante : la parallaxe est inférieure au diamètre de l'étoile ! La plupart des astres sont juste des points, même quand on les observe avec des instruments puissants. Bételgeuse est si grosse (son diamètre est équivalent à 1000 fois celui du Soleil) et si proche qu'on ne peut pas la considérer comme un point. Par ailleurs, sa surface est soumise à d'importantes fluctuations et il est difficile de définir son centre. Par conséquent, l'incertitude est grande dans le calcul de sa parallaxe.

Le satellite *Hipparcos*, dédié à des mesures de parallaxes, a permis d'obtenir une distance d'environ 520 années-lumière, avec une incertitude de 73 années-lumière. Malgré sa

précision plus élevée, le successeur d'*Hipparcos*, *Gaia*, ne peut malheureusement pas mesurer la parallaxe de Bételgeuse... car cette dernière est trop brillante pour la caméra du satellite ! En 2018, Graham Harper, de l'université du Colorado, et ses collègues ont réalisé une mesure de parallaxe avec des radiotélescopes. Ils ont obtenu une distance de 724 années-lumière. C'est la valeur que j'utilise en général. Plus récemment, en 2020, Meridith Joyce, de l'université australienne de Canberra, et ses collègues ont proposé une méthode originale. Ils ont utilisé des modèles d'hydrodynamique stellaire pour évaluer de façon indépendante cette distance à 548 années-lumière, mais les incertitudes restent importantes.

Quand on travaille avec cette étoile, il faut garder en tête ce problème de la mesure de la distance. Ces incertitudes se propagent à toutes les autres grandeurs que l'on voudrait déterminer : la luminosité, la température, etc.

Si Bételgeuse n'est pas un point, est-il possible d'avoir une image de sa surface ?

Bételgeuse nous offre effectivement cette chance quasi unique : nous pouvons obtenir une image de sa surface grâce aux techniques d'interférométrie des plus grands télescopes, tels le *VLT* (*Very Large Telescope*) et *Alma* (*Atacama Large Millimeter Array*). Cette étoile est donc un laboratoire idéal pour étudier les supergéantes rouges.

Que sont ces supergéantes rouges ?

Dans cinq milliards d'années, lorsque le Soleil épuisera son carburant, la fusion de l'hydrogène ne sera pas suffisante pour maintenir l'équilibre de l'étoile, qui commencera à se contracter sur elle-même. De nouvelles réactions de fusion s'enclencheront et conduiront à voir le rayon de l'astre enfler jusqu'à environ l'orbite de la Terre. Le Soleil sera alors une géante rouge.

Suivant un schéma similaire, les supergéantes rouges sont le destin d'étoiles beaucoup plus massives que le Soleil, des géantes bleues (de 10 à 40 masses solaires). Ces dernières consomment très vite leur hydrogène et ont une durée de vie très courte, de l'ordre de 10 à 100 millions d'années. Elles deviennent alors des supergéantes rouges. Puis, quand ces astres épuisent à leur tour leur carburant, ils explosent en supernovæ (voir l'article pages 24 à 33). Leur cœur s'effondre et forme une étoile à neutrons ou un trou noir, selon la masse finale de la supergéante rouge.

Or les supergéantes rouges perdent beaucoup de matière au cours de leur vie sous la forme d'un important vent stellaire. Bételgeuse expulse chaque année l'équivalent de 10^{-6} masse solaire, mais on estime qu'elle contient encore 98% de la masse de la géante bleue dont elle est issue. Par exemple, VY Canis Majoris perd en