

SURSAUTS GAMMA: UN FUTUR PROMETTEUR

Propos recueillis par Sean Bailly



SYLVAIN GUIRIEC

professeur à l'université George-Washington, à Washington, et chercheur au centre Goddard de la Nasa

Avec quelle fréquence détecte-t-on des sursauts gamma ?

Le télescope spatial *Fermi* détecte un sursaut tous les deux jours en moyenne. On a observé plus de 8 000 sursauts gamma depuis leur découverte dans les années 1960.

Quelles sont les sources des sursauts gamma ?

L'explosion initiale des sursauts dure typiquement de quelques millisecondes à quelques dizaines de secondes. On les classe en deux familles. Les « sursauts longs » durent plus de deux secondes et sont associés aux effondrements d'étoiles massives. Les « courts » sont déclenchés par la coalescence d'objets compacts (des paires d'étoiles à neutrons, ou un trou noir et une étoile à neutrons).

Mais, début 2021, avec mes collègues, nous avons mis en évidence que des explosions géantes de magnétars – des étoiles à neutrons en rotation rapide et à champ magnétique intense – dans des galaxies proches produisent parfois des sursauts gamma courts.

Comment les distinguer d'un sursaut de coalescence ?

Leur spectre en fréquence a une signature un peu différente de celui d'une coalescence. Mais nous n'avons pas toujours des données couvrant tout le spectre électromagnétique. Quand un événement est repéré par un satellite, l'alerte est aussitôt transmise à d'autres observatoires pour étudier l'objet dans d'autres fréquences. Mais un sursaut gamma est si bref qu'il est souvent impossible de réorienter les télescopes assez vite pour voir l'explosion initiale. Nous n'avons ainsi que quelques dizaines de sursauts observés dans le visible.

Quelle est la solution ?

La solution est d'avoir des télescopes à grand champ, qui voient à tout instant une grande portion du ciel. C'est le cas du *Zwicky Transient Factory*. Et ça sera aussi le cas du télescope *Vera-Rubin* en cours de construction. Le défi pour ce futur observatoire sera la quantité d'information collectée.

Avec quelques millions d'événements transitoires par nuit, les capacités de traitement et de stockage sont limitées. Il faut donc mettre au point des algorithmes efficaces pour sélectionner les objets les plus intéressants.

Une autre voie est la complémentarité avec les détecteurs d'ondes gravitationnelles. Par exemple, l'onde gravitationnelle GW170817 captée par les interféromètres *Ligo-Virgo* a été associée à un sursaut, ce qui indique clairement que celui-ci était le résultat d'une coalescence. Les expériences de neutrinos astrophysiques nous apporteront aussi des informations précieuses.

Enfin, de nouveaux projets d'observatoires gamma, X et infrarouge sont en préparation, tels *Gamow Explorer* (dont je suis responsable principal adjoint) du côté de la Nasa ou *Theseus* pour l'ESA. Ils permettront d'étudier les sursauts des premières étoiles de l'Univers. L'observatoire spatial franco-chinois *SVOM* prévu pour 2022 sera aussi un instrument capital pour l'étude des sources transitoires.

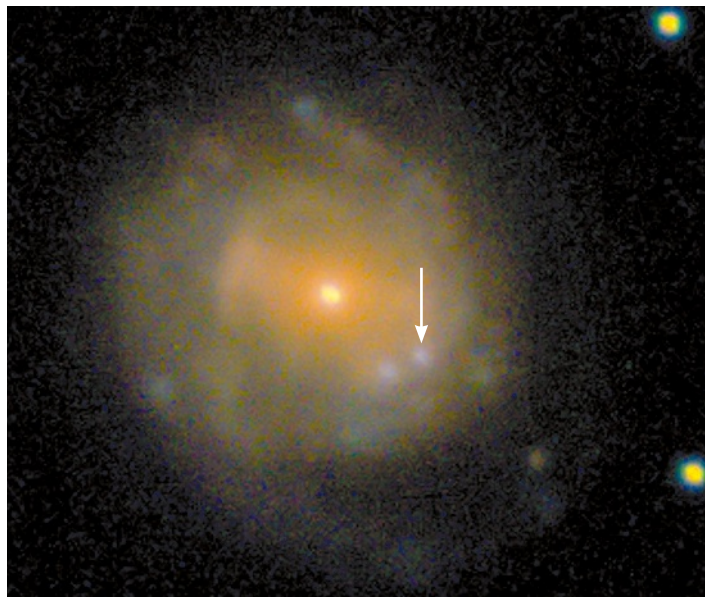
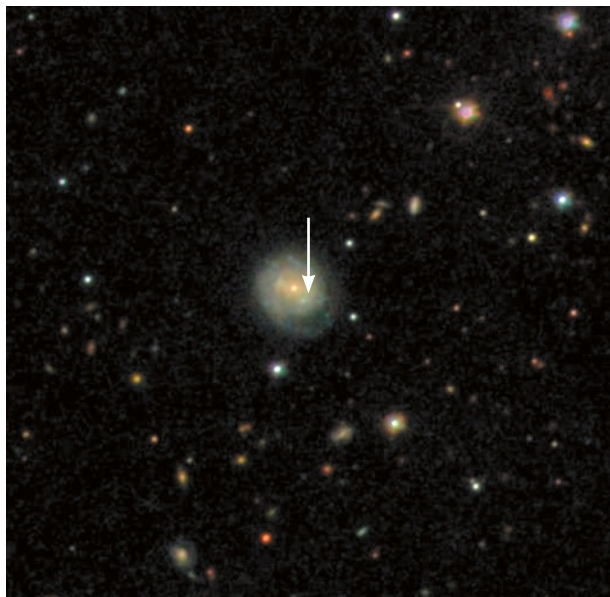
automatiquement accolé à tous les événements astronomiques transitoires, «2018» correspond à l'année de la découverte, et «cow» est une suite unique et aléatoire de lettres d'identification qui, ici, formait un mot, «vache» en anglais (il n'en fallait pas plus pour surnommer l'événement). Au début, les observations semblaient indiquer des similitudes entre cet événement et un sursaut gamma, sauf qu'il n'y avait pas eu de détection de rayons gamma. «Enfin! Je tiens une émission rémanente!» ai-je pensé. Mais la situation a rapidement changé. Parce qu'AT2018cow était si brillant (10 à 100 fois plus brillant qu'une supernova ordinaire) et si proche (à 200 millions d'années-lumière), l'objet a suscité un grand intérêt dans le monde entier. Les astronomes l'ont observé dans tout le spectre électromagnétique.

UNE EXPLOSION ATYPIQUE

AT2018cow a surpris toute la communauté. Le déroulé de l'événement était complètement différent de toutes les explosions cosmiques jamais observées. Et nous étions dans la même situation que les aveugles de la célèbre fable indienne: lorsque ces individus rencontrèrent un éléphant, ils en tâtèrent chacun une partie différente de l'animal, mais ne s'accordèrent pas sur une description commune. Ainsi, le premier en touchant la trompe la comparait à un serpent, le deuxième palpant l'oreille pensait à un éventail, pour un troisième la patte rappelait le tronc d'un arbre. De la même façon, nos diverses observations de la Vache étaient difficiles à combiner en une vision cohérente. L'explosion présentait des caractéristiques de plusieurs types de phénomènes différents. Diverses explications ont été rapidement proposées, mais sans toujours convaincre.

Mes collègues et moi avons travaillé dur pour compiler les données, afin de comprendre comment les interpréter. Certains de ces moments restent parmi mes meilleurs souvenirs de thèse: quand nous avons calculé ensemble au tableau noir les propriétés de l'onde de choc, quand un membre de l'équipe a déboulé dans le couloir en agitant une feuille avec de nouveaux résultats, ou encore quand nous avons échangé des regards ébahis à l'annonce d'une nouvelle mesure extraordinaire.

Finalement, nous avons conclu qu'il y avait deux composantes majeures dans AT2018cow. La première était un moteur central, comme dans un sursaut gamma. Mais sa longévité était bien supérieure, de l'ordre de plusieurs semaines plutôt que quelques jours, car les rayons X émanant du cœur de l'explosion ont brillé bien plus longtemps que prévu. La seconde composante était un cocon de gaz et de poussière d'environ un millième de masse solaire dont, pour une raison inconnue, l'étoile était entourée au moment de son explosion. Nos preuves de



L'événement AT2018cow, surnommé la Vache, a été 10 à 100 fois plus lumineux qu'une supernova classique. Il se serait déroulé dans la galaxie CGCG 137-068, située à 200 millions d'années-lumière (plan large à gauche, et resserré à droite). Il a été repéré grâce à des algorithmes qui comparent des images d'une même région du ciel pour détecter la formation soudaine de points brillants.

l'existence du cocon sont indirectes: quand l'étoile a explosé, nous avons vu un éclair de lumière optique et d'ondes radio qui semblait indiquer que des débris avaient heurté de la matière nimbant l'étoile. De tels cocons ont été observés dans d'autres types d'explosions, mais nous ne savons pas comment ils se forment; il se peut que cette matière soit larguée par l'étoile peu avant son explosion.

La plupart du temps, l'objet compact, une étoile à neutrons ou un trou noir, est complètement enveloppé dans ce qui reste de l'étoile; nous n'avons donc que des informations indirectes sur sa naissance. Mais si l'interprétation que nous faisons des données d'AT2018cow est correcte, le cœur stellaire qui s'est effondré était relativement visible. Pour la première fois, nous avons peut-être directement observé la formation de l'objet compact. Ces informations nous permettront de mieux comprendre comment cette naissance se produit. Il n'en reste pas moins de nombreuses questions. De quel type était l'étoile qui a explosé? Le moteur central était-il alimenté par une étoile à neutrons ou un trou noir? Pourquoi l'étoile a-t-elle expulsé de la matière peu avant d'exploser? Pour avancer, il nous fallait trouver des événements similaires. Nous avons alors entrepris de dénicher un autre AT2018cow à l'aide du relevé astronomique ZTF.

Trois mois plus tard, je pensais que j'en tenais effectivement un autre exemple avec l'explosion brillante et rapide du 9 septembre 2018, évoquée au début de l'article. Initialement, cet événement ressemblait beaucoup à AT2018cow. Mais en moins d'une semaine, il est devenu clair que nous avions là une supernova de type Ic-BL (le type associé aux sursauts gamma), notée SN2018gep.

Certes, ce n'était pas un autre AT2018cow, mais nous avions en revanche quelque chose qui s'apparentait à un sursaut gamma. En cinq jours, nous avions recueilli des observations détaillées sur tout le spectre électromagnétique. Nous avons cherché les traces d'un jet dans les données, sans succès. Mais encore une fois, cet événement présentait un comportement atypique: un rayonnement optique intense à évolution rapide, qui ne correspond pas à une émission rémanente et qui résulterait de la collision de débris d'explosion avec un cocon de matière.

DÉLESTAGE DE GAZ

Ce scénario était surprenant. D'autres types d'étoiles, comme les supergéantes rouges, émettent du gaz et de la poussière puis se retrouvent enveloppés dans des cocons, mais ces astres ne sont pas associés avec les types de supernovæ présentant des sursauts gamma. Notre découverte impliquait que davantage de types d'étoiles que nous ne le pensions sont susceptibles de larguer du gaz à la fin de leur existence.

L'étude de SN2018gep nous a permis de montrer que le gaz a été relâché dans les derniers instants de l'étoile. En effet, ce matériau se trouvait très près de l'étoile au moment de l'explosion; s'il avait été expulsé plus tôt, il aurait eu le temps de s'en éloigner davantage. L'étoile a perdu une fraction importante de son atmosphère externe dans les derniers jours ou les dernières semaines de sa vie, après avoir brillé pendant des millions, voire des dizaines de millions d'années. Ce délestage serait donc un indice annonciateur de la mort de l'étoile. Une fois de plus, il nous restait des questions. À quel point ce comportement qui précède

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 SN2018gpe, 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.