



Avishay GAL-YAM est directeur de recherche à l'Institut Weizmann de Rehovot, en Israël.

plus de trois fois plus loin, à environ 200 millions d'années-lumière. Pour que nous puissions repérer le précurseur de SN 2005gl dans les images de *Hubble*, il aurait fallu que cette étoile soit parmi les plus lumineuses jamais observées.

Les chances de succès étaient faibles, mais notre pari fut payant. Après avoir mesuré la position de SN 2005gl avec les données du *Keck*, nous avons examiné la position correspondante sur les images prises par *Hubble* avant l'explosion, et nous avons vu quelque chose qui ressemblait à une étoile, sans en avoir la certitude. Si c'était une étoile unique, sa luminosité, de l'ordre de un million de fois celle du Soleil, suggérait qu'elle atteignait 100 masses solaires. Cependant, comme il était généralement admis qu'un tel poids lourd ne pouvait pas exploser, il était beaucoup plus vraisemblable que le point lumineux corresponde à un groupe non résolu d'étoiles plus petites. Les données ne pouvaient pas exclure cette possibilité.

Trop lumineuse pour être normale

Les choses en étaient là quand une découverte surprenante, en 2006, m'a conduit à penser que non seulement les étoiles géantes pouvaient exploser en supernovae, mais également que cela se déroulait d'une façon étonnante.

Par une nuit couverte au *Keck*, une brève accalmie a laissé entrevoir quelques étoiles. Faute de mieux, j'ai décidé d'observer la supernova la plus brillante du moment, un événement d'une intensité inhabituelle dénommé SN2006gy, découverte huit jours plus tôt par Robert Quimby, de l'Université du Texas, à l'aide d'un petit télescope. J'ai pu l'observer pendant 15 minutes avant que la trouée dans les nuages ne se referme définitivement.

L'analyse des données que j'avais obtenues par l'équipe de Eran Ofek, du *Caltech*, a révélé que SN2006gy était la supernova la plus brillante jamais repérée jusqu'alors. Une étude indépendante conduite par Nathan Smith, alors à l'Université de Californie à Berkeley, est parvenue à une conclusion analogue.

Aucun des types de supernova que nous connaissions n'était capable de dégager une telle luminosité. SN2006gy se trouvait dans une galaxie que *Hubble* n'avait pas observée, si bien que nous n'avions aucun moyen d'étudier l'étoile progéni-

trice. Mais à en juger par la violence de l'explosion, cet astre faisait au moins 100 masses solaires.

Nous avons envisagé plusieurs explications possibles. Deux étaient moins improbables que les autres. Selon la première, la luminosité extrême est due au rayonnement thermique de l'onde de choc formée lorsque les débris éjectés par l'explosion ont rattrapé le vent stellaire précédemment émis par l'étoile, plus lent.

La seconde explication fait intervenir la radioactivité. Durant l'explosion d'une étoile massive en supernova, l'énergie et la quantité colossale de neutrons dégagés entraînent la synthèse d'éléments plus lourds que le fer (les éléments plus légers sont créés par les réactions de fusion dans le cœur durant la vie de l'étoile). Ces nouveaux éléments sont, pour l'essentiel, synthétisés sous forme d'isotopes radioactifs riches en neutrons, qui se désintègrent ensuite en isotopes plus stables. L'explosion géante à l'origine de SN2006gy a peut-être synthétisé une énorme quantité de matériau radioactif, dont la désintégration aurait injecté de l'énergie dans le nuage de débris en expansion, le faisant ainsi rayonner par fluorescence. Mais comment expliquer l'énorme quantité de matériau radioactif nécessaire à ce scénario ?

Pour creuser cette dernière piste, nous avons passé en revue les travaux théoriques. Dans une série d'articles écrits à la fin des années 1960, un trio de jeunes astrophysiciens, Gideon Rakavy, Giora Shaviv et Zalman Barkat, avait proposé un nouveau mécanisme d'explosion stellaire.

Les étoiles brillent parce que leur cœur est suffisamment dense et chaud pour que les atomes y fusionnent en libérant de l'énergie. C'est cette énergie qui s'oppose à l'autogravité de l'étoile et la maintient en équilibre. La masse initiale contrôle l'essentiel de la physique et de l'évolution d'une étoile. Celle-ci passe par des phases stables au cours desquelles les éléments du cœur fusionnent en éléments plus lourds – phases qui peuvent durer des milliers, voire des milliards d'années, selon la façon dont la combustion agit sur la température et la pression du cœur – entrecoupées de brèves périodes de contraction du cœur.

L'hydrogène initial fusionne ainsi en hélium, qui est ensuite converti en carbone, qui devient lui-même de l'oxygène, donnant progressivement à l'étoile une structure en couches concentriques (« en pelure

✓ BIBLIOGRAPHIE

A. Gal-Yam *et al.*, Supernova 2007bi as a pair-instability explosion, *Nature*, vol. 462, pp. 624-627, 2009.

A. Gal-Yam et D. C. Leonard, A massive hypergiant star as the progenitor of the supernova SN 2005gl, *Nature*, vol. 458, pp. 865-867, 2009.

M. Heydari-Malayeri, L'énigmatique formation des étoiles massives, *Pour la Science*, n° 359, septembre 2007.
<http://bit.ly/359-etoiles-massives>

W. Hillebrandt *et al.*, Supernovae : des explosions énigmatiques, *Pour la Science*, n° 336, octobre 2005.
http://bit.ly/336_supernovae

R. Larson et V. Bromm, Les premières étoiles de l'Univers, *Pour la Science*, n° 293, mars 2002.

d'oignon»). À partir de l'oxygène, l'évolution diffère selon la masse initiale de l'étoile.

Dans une étoile d'une dizaine de masses solaires, le cycle de fusion se poursuit : l'oxygène forme du silicium, qui fusionne à son tour en fer. Ce dernier étant un élément très stable, le cycle s'arrête, et le cœur de fer inerte grossit. Lorsqu'il devient trop massif, il s'effondre sur lui-même, provoquant l'explosion de l'étoile : c'est la supernova par effondrement classique.

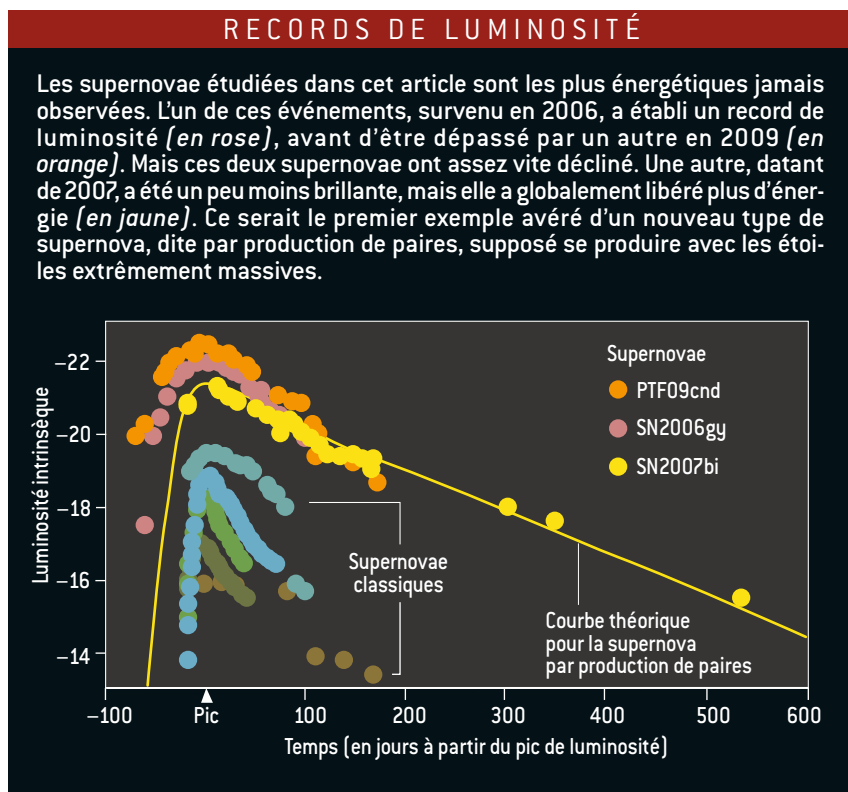
Pour les étoiles hypergéantes, de plus de 100 masses solaires, l'évolution est différente. G. Rakavy et ses collègues ont calculé que, lorsque le cœur est parvenu au stade de l'oxygène, il se contracte modérément et reste trop peu dense pour que sa fusion s'amorce. A la place, il se produit un phénomène que les physiciens appellent production de paires.

Dans le cœur, les noyaux atomiques portés à haute température émettent des photons très énergétiques, dans le domaine gamma du spectre électromagnétique. Or, en vertu de l'équivalence entre masse et énergie, deux photons gamma qui interagissent peuvent se convertir spontanément en une paire composée d'un électron et de son antiparticule, le positron. Lorsque cette production de paires électron-positron devient importante, l'essentiel de l'énergie des photons est capturée sous forme de matière, qui exerce une pression de radiation beaucoup plus faible que les photons. La pression au sein du cœur chute alors brutalement ; il devient instable et commence à se contracter rapidement, jusqu'à ce que la densité soit suffisante pour amorcer la fusion de l'oxygène.

Chute fatale de pression

Or lorsque ce seuil est franchi dans un cœur en train de s'effondrer et non dans un cœur stable, l'allumage de la fusion est explosif : la fusion libère de l'énergie, qui chauffe davantage encore le matériau, ce qui accélère les réactions de fusion, et ainsi de suite. La réaction s'emballe. L'étoile peut brûler tellement d'oxygène en quelques minutes que l'énergie libérée est supérieure à toute l'énergie potentielle de gravitation de l'étoile. Sous cet afflux d'énergie, l'étoile est entièrement disloquée et sa matière expulsée dans l'espace dans une explosion cataclysmique.

Contrairement aux supernovae classiques, où subsiste le cœur effondré,



devenu une étoile à neutrons, voire un trou noir, une supernova par production de paires ne laisse rien derrière elle. Tout ce qui reste de l'étoile est un nuage d'éjectats qui se dilate rapidement, très riche en éléments ayant été synthétisés au cours de la déflagration.

Selon des travaux théoriques d'autres équipes, les supernovae par production de paires doivent engendrer, entre autres éléments lourds, une énorme quantité de nickel 56. C'est un isotope radioactif, qui se désintègre en cobalt 56 en environ six jours, puis en fer 56, non radioactif, en 77 jours. La désintégration du nickel 56 pouvait-elle expliquer l'intense luminosité de la supernova SN2006gy ?

Bien que la théorie des supernovae par production de paires soit cohérente, il était généralement admis que ce processus n'avait plus cours dans la nature. Selon les théories de formation stellaire, les étoiles hypermassives ne devraient pas voir le jour dans l'Univers actuel. Le milieu interstellaire est riche en éléments plus lourds que l'hydrogène et l'hélium. Or en présence de ces éléments lourds, les nuages moléculaires s'effondrent plus vite et les étoiles s'allument plus précocement, soufflant le gaz résiduel qui les entoure trop tôt pour espérer devenir très massives. Et même si des étoiles massives se for-

maient, elles dégageraient un vent stellaire si puissant qu'elles perdraient rapidement la majeure partie de leur masse, si bien que leur cœur ne deviendrait jamais assez massif pour que se déclenche l'instabilité de paires.

La situation était différente durant le premier milliard d'années après le Big Bang. Les premières étoiles qui se sont formées à partir du gaz primordial, composé presque exclusivement d'hydrogène et d'hélium, étaient sans doute de véritables monstres de plusieurs centaines de masses solaires. En effet, en l'absence d'éléments lourds, la dissipation d'énergie par un nuage de gaz qui se contracte est moins efficace, si bien que la masse minimale pour former une étoile est plus élevée. Ces étoiles primordiales ont peut-être explosé sous forme de supernovae par production de paires.

Pendant ce temps, la supernova record SN2006gy suscitait l'intérêt des astrophysiciens. De façon ironique, bien qu'elles nous ait poussés, nous et d'autres équipes, à réenvisager le modèle de production de paires, cette supernova s'est révélée dépourvue de la signature attendue pour une grande quantité de nickel radioactif, à savoir une forme particulière de la courbe d'atténuation de la luminosité avec le temps.