



Pour réagir aux articles : courrier@pouirlascience.fr
ou directement sur les pages correspondantes du site www.pouirlascience.fr

✓ CHAUFFER LES PANNEAUX SOLAIRES ?

L'article *Des polymères pour les panneaux solaires* (*Pour la Science* n° 415, mai 2012, http://bit.ly/415_panneaux_solaires) indique que dans un semi-conducteur, l'agitation thermique peut suffire à faire passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction. Pourquoi alors ne pas convertir le rayonnement solaire par l'intermédiaire d'une surface chauffante posée sur un semi-conducteur ?

Christophe Limousin

→ RÉPONSE DE FRANÇOIS CARDINALI

C'est un problème de rendement. La chaleur de la lumière solaire (des photons infrarouges principalement) peut en effet conduire à une augmentation de la conductivité, mais à des niveaux très faibles. Le calcul de la proportion des états d'énergie qui peuvent être peuplés à une température donnée livre un résultat décevant pour des valeurs proches de la température ambiante, voire à des températures supérieures, vers 200 ou 300 °C, où le problème de la stabilité des composés commence à se poser.

Il est plus rentable de transformer l'énergie thermique du Soleil en chaleur accumulée dans l'eau (chauffe-eau thermique), ou pour fabriquer de l'électricité, en concentrant la chaleur accumulée par une grande surface réfléchissante sur un fluide caloporteur résistant à de très hautes températures (des sels fondus, par exemple), lequel sert ensuite à transformer de l'eau en vapeur pour entraîner des turbines (centrale solaire). Le rendement de tels systèmes est limité à une trentaine de pourcents, mais il reste très supérieur au rendement théorique du dispositif que vous proposez.

✓ LA MAUVAISE FILE À PILE OU FACE

Parmi les explications mathématiques de la *malédiction de la mauvaise file*, traitée par Jean-Paul Delahaye dans le numéro de mai 2012 de *Pour la Science* (http://bit.ly/415_mauvaise_file), il faut citer celle de William Feller, contenue dans *An Introduction to Probability Theory and its Applications*, vol. II. Si on assimile deux files

d'attente parallèles au jeu de pile ou face (pile, la file de gauche avance d'un cran ; face, c'est la file de droite), la loi de probabilité des intervalles entre deux retours à l'origine (files au même niveau) est la distribution stable de Paul Lévy d'exposant $-1/2$. La probabilité qu'une file finisse par rattraper l'autre est bien égale à 1, mais le temps d'attente moyen est infini ! Ainsi, un conducteur qui voit que l'autre file le dépasse doit parfois attendre très longtemps avant de la rattraper. En outre, il ne sert à rien de changer de file, puisque dans le jeu de pile ou face, il n'y a pas de mémoire.

Alexandre Granet

→ RÉPONSE DE JEAN-PAUL DELAHAYE

C'est une remarque intéressante. Cependant, je ne la trouve pas totalement convaincante, car, dans ce modèle, par symétrie, une fois que j'ai doublé une voiture, l'espérance du temps d'attente avant qu'elle me rattrape est elle aussi infinie et donc devrait me donner l'impression que je suis dans la bonne file, ou au moins compenser exactement l'impression provoquée par les voitures qui me doublent et dont l'espérance du temps d'attente pour que je les rattrape est infinie. Le fait que je n'observe pas les voitures que je double alors que j'observe celles qui me doublent crée une dissymétrie, déjà évoquée dans l'article.

✓ DES VIRIONS DANS LE NOYAU

Dans l'article *Les virus géants, vestiges d'organismes cellulaires* (*Pour la Science* n° 415, mai 2012, http://bit.ly/415_claverie), j'ai été étonnée de voir sur le schéma de répllication d'un virus classique que le virion (la particule virale complète, avec sa capsid et son matériel génétique) est assemblé directement à l'intérieur du noyau de la cellule infectée. Comment cela fonctionne-t-il et quels virus sont concernés ?

Françoise Pierre

→ RÉPONSE DE JEAN-MICHEL CLAVERIE

Un bon exemple est celui des virus de la famille de l'herpès, qui ne disposent pas de leur propre

machinerie de transcription. Ils font donc synthétiser leurs ARN messagers dans le noyau des cellules infectées. Une fois synthétisés, ces ARNm sortent du noyau pour être traduits sur les ribosomes du cytoplasme. Les protéines virales ainsi produites sont réintroduites dans le noyau, où a lieu l'assemblage des nouvelles particules virales. Enfin, celles-ci ressortent du noyau, en s'entourant d'ailleurs d'une couche de membrane nucléaire « décorée » de protéines virales qui serviront à l'arrimage avec les futures cellules infectées. Ce processus nécessite donc un va-et-vient incessant entre le noyau et le cytoplasme.

La majorité des virus infectent des bactéries ou des archéobactéries, et ne sont pas concernés par la production de virions dans le noyau cellulaire, puisque ces hôtes n'ont pas de noyau ! Quant aux virus géants, qui fonctionnent avec « l'usine à virions » cytoplasmique décrite dans le même schéma, ils forment un sous-ensemble des virus à ADN double brin infectant des cellules eucaryotes. Ils sont donc très minoritaires, bien que nous ne connaissions pas assez la biodiversité du monde viral pour effectuer un comptage précis.

✓ 3D : NE PAS PENCHER LA TÊTE !

Une précision peut être apportée à l'article *Cinéma, la conquête de la 3D* (*Pour la Science* n° 416, juin 2012, http://bit.ly/416_cinema3d) : une fois en face de l'écran et pendant toute la durée du film, le spectateur ne doit pencher la tête ni à gauche ni à droite, car la fusion stéréoscopique à partir d'images en deux dimensions prises à l'horizontale exige que la droite passant par les yeux reste parallèle à celle passant par les objectifs. Si ce n'est pas le cas, les images se trouvent alors trop hautes ou trop basses par rapport au plan formé par les axes optiques des yeux, sans pouvoir ainsi fusionner obliquement. Cette précaution avait été déjà indiquée en 1957 dans la sixième édition de l'ouvrage *La technique photographique*, de L. P. Clerc (éditions Paul Montel).

Thierry Garçon

Astrophysique

SUPER SUPERNOVAE

Avishay Gal-Yam

Certaines étoiles extrêmement massives finissent leur vie dans des explosions parmi les plus puissantes de l'Univers, déclenchées en partie par la production d'antimatière dans leur cœur.

UNE SUPERNOVA déclenchée par la production d'antimatière serait sans doute très spectaculaire vue depuis une planète en orbite. Cependant, tous les observateurs seraient rayés de la carte !



L'ESSENTIEL

✓ Ces dernières années, plusieurs supernovae – des explosions d'étoiles – se sont révélées plus puissantes et plus durables que toutes celles observées auparavant.

✓ Les étoiles à l'origine de ces supernovae faisaient une centaine de masses solaires. Or on pensait que des étoiles aussi massives n'explosaient pas.

✓ Certaines de ces supernovae pourraient avoir été déclenchées par la création de paires particule-antiparticule.

✓ Les premières étoiles de l'Univers, extrêmement massives, ont peut-être explosé par un mécanisme similaire.

Mi-2005 : la modernisation d'un des deux télescopes géants de l'observatoire américain *Keck*, à Hawaï, s'achève. Un dispositif d'optique adaptative, qui corrige automatiquement les effets de la turbulence atmosphérique, permet à l'instrument de produire des images aussi nettes que celles du télescope spatial *Hubble*. Shrinivas Kulkarni, de l'Institut de technologie de Californie (*Caltech*), presse alors les jeunes chercheurs de son organisme, dont je fais partie, à demander du temps d'observation sur ce télescope, avant que la communauté des astronomes prenne conscience des nouvelles performances et que la concurrence pour obtenir un créneau ne devienne trop intense.

Sur ses conseils, je me suis associé avec mes collègues postdoctorants Derek Fox et Doug Leonard pour mener une étude qui n'avait auparavant été réalisée qu'avec *Hubble* : la traque des progéniteurs de supernovae. En d'autres termes, nous voulions savoir à quoi ressemblent les étoiles qui explosent juste avant qu'elles n'explosent.

On sait depuis longtemps quelles étoiles vont finir leur vie en explosant en supernova. Il s'agit, d'une part, des « naines blanches », étoiles qui peuvent être victimes d'une explosion thermonucléaire suite à l'accrétion d'une grande quantité de matière arrachée à une étoile compagnon ; et, d'autre part, des étoiles massives, de plus de huit masses solaires environ, qui s'effondrent sur elles-mêmes sous leur propre poids. Les étoiles bleues et très brillantes, par exemple, vivent quelques millions d'années avant d'exploser en supernovae. Nous comprendrions mieux le processus des supernovae s'il était possible de le voir se dérouler intégralement et en direct, mais hélas, scruter une étoile donnée en attendant qu'elle explose n'est pas réaliste.

Nous n'avons obtenu qu'une seule nuit d'observation sur le *Keck*, en novembre 2005. Heureusement, les cieux nous furent favorables. Cette étude a conduit à de nouvelles idées sur la taille limite que sont susceptibles d'atteindre les étoiles, et sur la façon dont ces géantes meurent.

Jusque-là, on pensait que si les étoiles massives explosaient en supernovae, ce n'était pas le cas des étoiles extrêmement massives, de l'ordre de la centaine de masses solaires. Celles-ci dégagent tellement d'énergie qu'elles éjectent dans l'espace une bonne partie de leur masse sous forme d'un vent stellaire intense, s'amenuisant ainsi progressivement. En fait, d'après les

modèles théoriques, dans les conditions de l'Univers actuel, ces vents stellaires puissants devraient même bloquer la croissance de telles étoiles et les empêcher de devenir hypermassives : on pensait qu'une étoile ne peut pas dépasser une centaine de masses solaires environ.

Mais suite à nos observations, nous sommes arrivés à la conclusion qu'il existe aujourd'hui des étoiles d'au moins 140 masses solaires, et que leur vie s'achève dans des explosions parmi les plus énergétiques de l'Univers. Certaines de ces étoiles explosent par un mécanisme totalement différent des supernovae que l'on connaissait jusqu'ici. Ce processus, nommé supernova par création de paires, implique la création d'antimatière au centre de l'étoile.

En outre, la mort cataclysmique de ces étoiles géantes nous renseigne sur la façon dont les premières étoiles de l'Univers ont explosé et ont dispersé les éléments lourds qu'elles avaient synthétisés, semant ainsi les graines des soleils et des planètes actuels.

Dénicher une aiguille dans une botte de foin

Durant notre créneau sur le télescope *Keck*, nous espérions observer une supernova active et, partant de là, consulter les archives du télescope *Hubble* pour retrouver une image de l'étoile avant son explosion. Il fallait donc observer une supernova située dans une des nombreuses galaxies photographiées par *Hubble*. La difficulté pour retrouver ensuite le progéniteur de la supernova sur ces images est de déterminer laquelle des étoiles, parmi les milliards que comporte une galaxie, est celle qui a explosé. Une tâche bien plus dure que dénicher une aiguille dans une botte de foin !

Pour espérer y parvenir, il faut mesurer les coordonnées de la supernova avec une extrême précision. Avant l'arrivée des systèmes d'optique adaptative, une telle précision n'était possible qu'avec le télescope *Hubble* lui-même. Et même ainsi, la recherche est si ardue que les astronomes n'avaient réussi à identifier avec certitude que trois précurseurs de supernovae.

Parmi les supernovae visibles à cette époque, nous en avons sélectionné une nommée SN 2005gl. Certains ont sans doute considéré que c'était un mauvais choix : les équipes qui recherchent des précurseurs de supernovae explorent typiquement un rayon d'environ 60 millions d'années-lumière. Or SN 2005gl était



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.

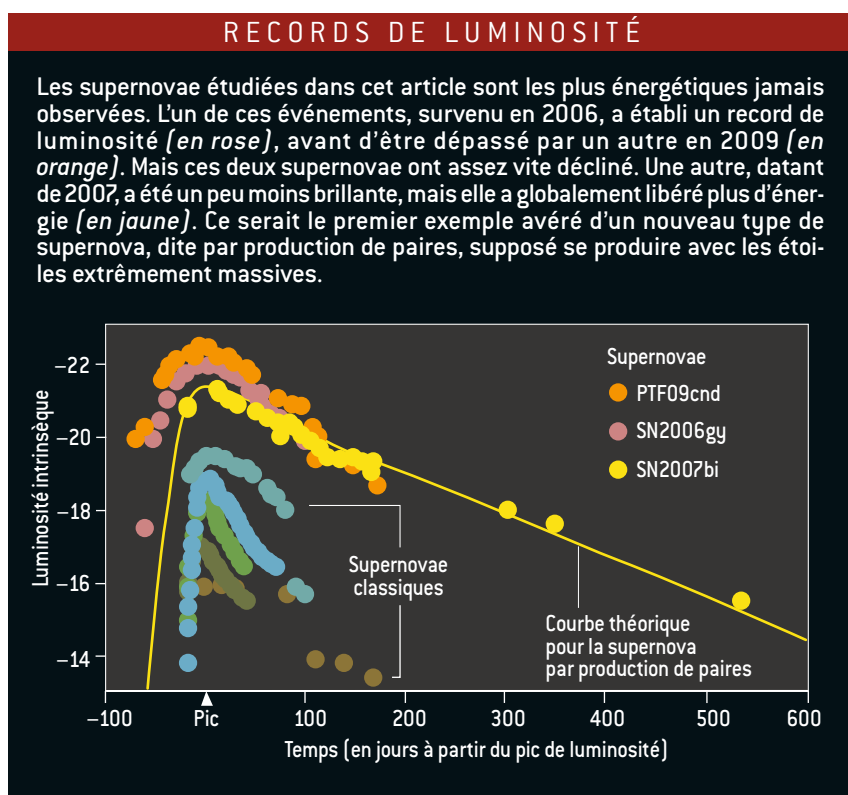
Pour les étoiles hypergéantes, de plus de 100 masses solaires, l'évolution est différente. G. Rakavy et ses collègues ont calculé que, lorsque le cœur est parvenu au stade de l'oxygène, il se contracte modérément et reste trop peu dense pour que sa fusion s'amorce. A la place, il se produit un phénomène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

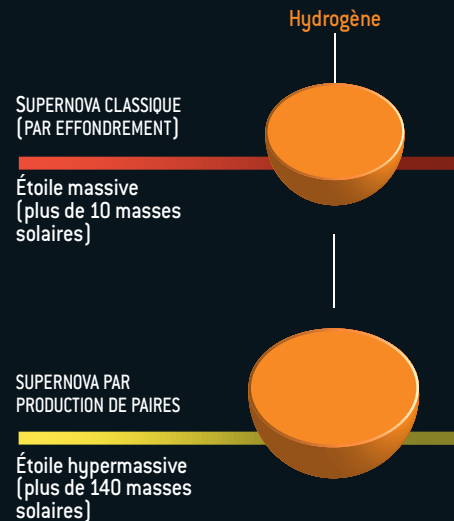
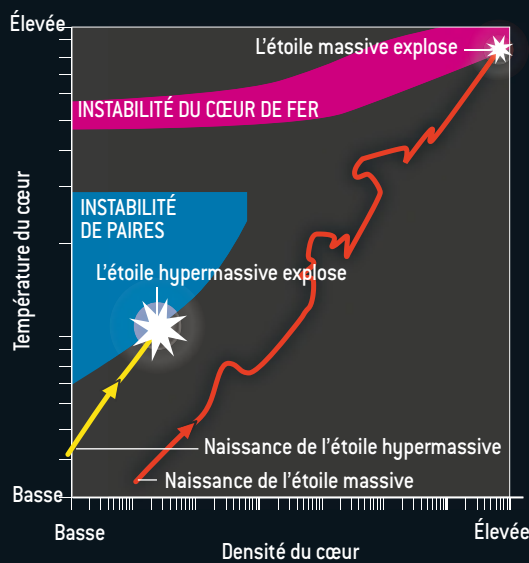
maient, elles dégageraient un vent stellaire si puissant qu'elles perdraient rapidement la majeure partie de leur masse, si bien que leur cœur ne deviendrait jamais assez massif pour que se déclenche l'instabilité de paires.

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.

COMMENT MEURENT LES ÉTOILES MASSIVES

Ce sont les réactions de fusion nucléaire dans leur cœur qui font briller les étoiles. À mesure qu'une étoile vieillit, son cœur devient plus chaud et plus dense (*ci-contre*) et produit des éléments de plus en plus lourds, qui forment des couches en pelure d'oignon (*à droite*). Une étoile assez massive, par exemple de 20 masses solaires (*traits rouges*), finit par avoir un cœur assez dense pour s'effondrer, ce qui entraîne l'explosion du reste de l'étoile. Mais dans une étoile hypermassive, de 140 masses solaires ou plus (*en jaune*), avant que le cœur ne devienne trop dense, la conversion de photons en paires électron-positron entraîne une réaction de fusion explosive qui désintègre entièrement l'étoile dans une déflagration colossale.



Dans une supernova par production de paires, l'essentiel de la luminosité ne devrait pas provenir de l'explosion elle-même, mais de la décroissance radioactive du nickel 56 et des autres isotopes créés durant l'explosion. La radioactivité est un processus bien connu, et les désintégrations des différents éléments se produisent à un rythme prédictible.

Mais SN2006gy, après avoir brillé pendant de nombreux mois, s'est éteinte brusquement, de façon incompatible avec une émission majoritairement d'origine radioactive. En fin de compte, SN2006gy n'était probablement pas une supernova par production de paires, et la première hypothèse, celle de l'onde de choc, s'est imposée. Néanmoins, ce coup manqué avait éveillé ma vigilance à l'égard des signatures de supernovae par production de paires.

Quelques mois plus tard, en 2007, Peter Nugent, du Laboratoire national Lawrence Livermore de Berkeley, avec qui je venais de commencer un « tour de chauffe » pour un vaste programme de recherche de supernovae, m'envoya un spectre totalement inhabituel, provenant d'une supernova nommée SN 2007bi.

Les raies d'absorption et d'émission des différents éléments, visibles à des longueurs d'onde spécifiques dans le spectre d'une source astronomique, nous renseignent sur la composition chimique

de celle-ci (plus précisément, du matériau qui émet la lumière). Le spectre de la supernova SN 2007bi suggérait que les différents éléments étaient présents dans des proportions inhabituelles et que l'objet était extrêmement chaud.

Une supernova qui refuse de s'éteindre

J'ai continué à suivre l'évolution de cette supernova. Elle était environ dix fois plus lumineuse qu'une supernova ordinaire, et la luminosité décroissait très lentement. Cette source refusait tout simplement de s'éteindre, et les jours devenaient des semaines, puis des mois. J'étais convaincu que c'était enfin un exemple de supernova par production de paires. Mais il me fallait davantage de données pour étayer cette interprétation.

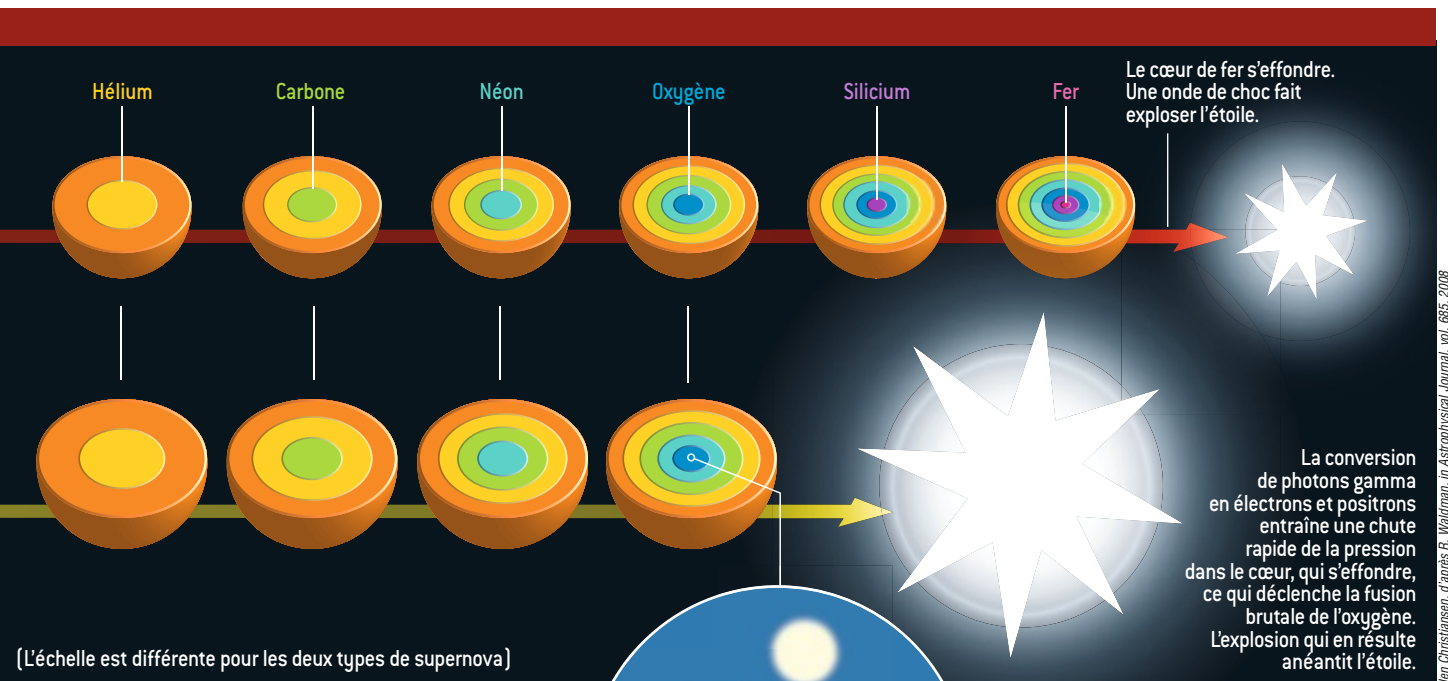
Tout au long de 2007 et de 2008, avec plusieurs collaborateurs, nous avons continué à observer SN 2007bi à l'aide des télescopes de l'Observatoire du mont Palomar. La supernova mit plus d'un an avant de s'éteindre enfin. J'ai alors demandé à mes collègues de Caltech Richard Ellis et Shrinivas Kulkarni de l'observer avec les télescopes du Keck.

En août 2008, après que j'ai intégré l'Institut Weizmann, en Israël, S. Kulkarni et son étudiant en thèse Mansi Kasliwal m'ont envoyé le dernier spectre en date de

SN 2007bi. Une première analyse a révélé un résultat stupéfiant : cette explosion avait synthétisé une quantité de nickel 56 équivalente à cinq à sept fois la masse du Soleil ! C'était dix fois plus que ce qu'on avait jamais vu auparavant, et cela correspondait exactement à ce que l'on attendait d'une explosion de supernova par production de paires.

Fin 2008, je me suis rendu à l'Institut Max Planck d'astrophysique de Garching, en Allemagne, pour travailler avec Paolo Mazzali, un spécialiste de l'analyse des spectres de supernovae qui pourrait vérifier les résultats de mes analyses approximatives. P. Mazzali détenait aussi des spectres obtenus avec le très grand télescope VLT de l'Observatoire européen austral, au Chili. Après de longs calculs, l'analyse de P. Mazzali livra des résultats cohérents avec les miens : plusieurs masses solaires de nickel 56 avaient été synthétisées, et l'abondance relative des éléments correspondait aux prédictions des modèles de production de paires.

Bien qu'assez confiant dans le fait d'avoir identifié une supernova par production de paires, j'ai ensuite mis les données de côté pendant quelques mois pour me repencher sur la supernova à l'origine de tout cela : SN 2005gl. Quand nous avons trouvé fin 2005 ce que nous pensions être son précurseur, nous ne pouvions pas affirmer qu'il s'agissait d'une étoile unique plutôt que d'un groupe d'étoi-



les. Mais trois ans plus tard, la supernova avait disparu, et nous pouvions faire un test simple: si notre candidat n'était pas l'étoile qui avait explosé, il devait être encore présent. D. Leonard et moi avons mené de nouvelles observations avec *Hubble* pour le vérifier. Et à la fin de 2008, nous en eûmes la certitude: l'étoile avait disparu. Ainsi, le précurseur de SN 2005gl était bien, selon toute vraisemblance, une étoile très lumineuse et très massive, semblable à Eta Carinae, une des géantes bleues les plus massives de la Voie lactée.

Ainsi, la théorie classique selon laquelle les étoiles hypergéantes perdent l'essentiel de leur masse avant de pouvoir exploser est contredite par au moins un cas. Des étoiles très lumineuses et très massives existent bien et explosent avant d'avoir perdu toute leur masse. Et si la théorie de la perte de masse est incorrecte, peut-être existe-t-il encore aujourd'hui des étoiles géantes qui exploseront un jour sous forme de supernovae par production de paires.

J'étais maintenant prêt à revenir sur le cas SN 2007bi et à y chercher des signes probants de supernova par production de paires. Avec toute une équipe, nous avons examiné cet événement sous tous les angles imaginables. Nous avons analysé en détail les spectres recueillis et l'évolution de la lumière émise, comparé les prédictions des anciens modèles d'explosion stellaire et les plus récents. Fin 2009, toutes les

analyses convergeaient vers une même conclusion: l'explication la plus plausible est que SN 2007bi est une supernova par production de paires.

Des événements rares, mais possibles

Depuis lors, trois autres événements qui seraient de bons candidats au titre de supernovae par production de paires ont été dénichés. Ce type de supernova semble excessivement rare, peut-être de l'ordre de 1 sur 100 000 supernovae, et concernerait des étoiles d'au moins 140, voire 200, masses solaires. Ces explosions sont les plus énergétiques que l'on connaisse, et elles sont le siège d'une énorme production d'éléments chimiques. Elles mériteraient le qualificatif d'«hypernovae».

Un des aspects fascinants de ce nouveau type de supernova est qu'elle nous laisse entrevoir l'Univers primordial. Les étoiles de première génération étaient de plusieurs centaines de masses solaires. Certains de ces poids lourds ont sans doute

explosé par production de paires. Ainsi, les cousins éloignés de certaines supernovae d'aujourd'hui ont peut-être été les premières explosions à ensemercer l'Univers en éléments lourds.

Nos travaux suggèrent non seulement l'existence d'un nouveau mécanisme d'explosion stellaire, mais ils signifient aussi que les étoiles hypermassives, bien que rares, existent dans l'Univers actuel, contrairement à ce que l'on pensait. Cela implique que l'enrichissement du milieu interstellaire en éléments lourds par les générations successives d'étoiles ne constitue pas un aussi grand frein à la croissance des étoiles que ne le pensaient les astrophysiciens.

Le programme d'étude des supernovae que P. Nugent et moi avons commencé à préparer en 2007 est maintenant en cours, et surnommé *Palomar Transient Factory*. Nous recherchons de nouveaux exemples d'explosions par production de paires. De fait, ce programme a permis de trouver l'un de nos derniers candidats, qui ressemble beaucoup à SN 2007bi. À mesure que les données s'accumulent, nous améliorons notre compréhension de ces explosions. Les instruments de demain, tel le télescope spatial *James Webb*, seront sans doute capables de voir des supernovae par production de paires très lointaines; et peut-être, un jour, la fin violente des premières étoiles formées dans l'Univers? ■

L'origine préhistorique

Marc Azéma

La représentation du mouvement, notamment avec les bandes dessinées et le cinéma, peut sembler une invention récente de l'humanité. Mais cette impression est trompeuse : comme nous le verrons, l'examen de nombre d'œuvres pariétales de la Préhistoire montre que les artistes du Paléolithique maîtrisaient déjà des techniques graphiques d'animation. Un premier exemple est le panneau des Lions de la grotte Chauvet (*ci-contre*). Toutes les images paléolithiques ne sont pas aussi dynamiques. Leur degré d'animation varie d'un site à l'autre, et suivant le style et les intentions de l'artiste. Il peut être nul à l'échelle d'un seul animal, mais l'absence apparente de mouvement est à relativiser. En effet, les animaux figurés, qu'ils soient statiques ou pas, participent souvent à une action collective qui, elle, est animée. Il arrive aussi qu'ils prennent vie lorsqu'on les observe sous un éclairage dynamique. À l'évidence, les artistes de la Préhistoire ont cherché à donner vie aux animaux qu'ils représentaient dans les cavernes.

► LE PANNEAU DES LIONS

Ces lions peints sur une paroi de la grotte Chauvet sont pleins de vie. En observant cette scène de chasse, on perçoit les mouvements de chaque lion, celui de la meute et même celui, apeuré, du troupeau de bisons qui s'enfuit... On constate avec étonnement que l'artiste talentueux qui, il y a 32 000 ans, a peint cette fresque, ne pouvait concevoir de ne pas en montrer l'essentiel : le mouvement des prédateurs en train de charger. Et pour cela, il a employé les mêmes conventions graphiques que les artistes d'aujourd'hui.

Jean Coates, équipe scientifique de la grotte Chauvet

