

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.

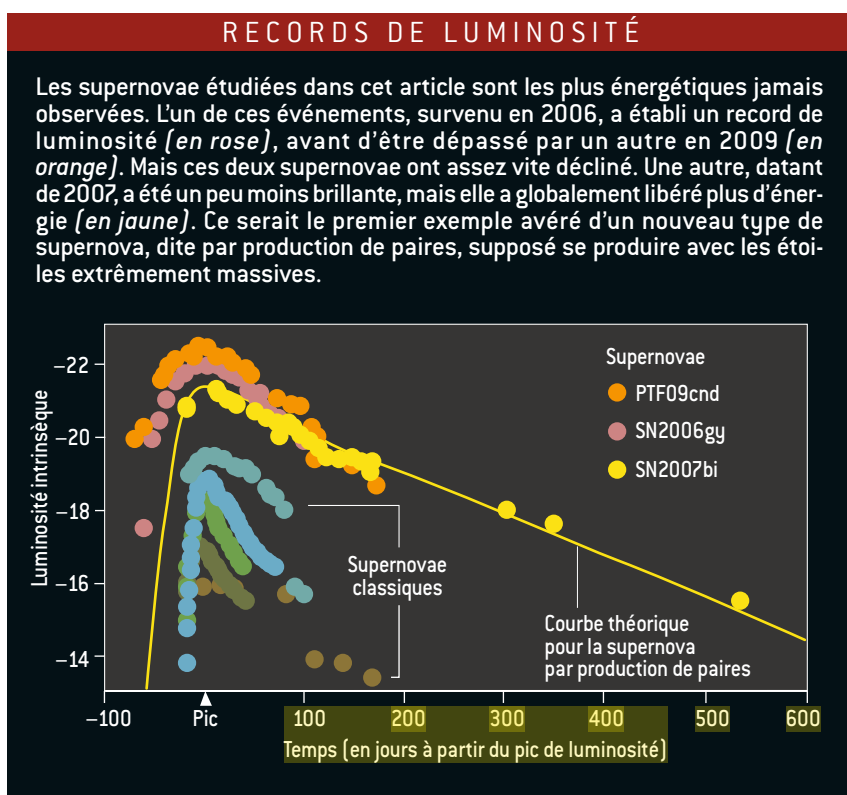
Pour les étoiles hypergéantes, de plus de 100 masses solaires, l'évolution est différente. G. Rakavy et ses collègues ont calculé que, lorsque le cœur est parvenu au stade de l'oxygène, il se contracte modérément et reste trop peu dense pour que sa fusion s'amorce. A la place, il se produit un phénomène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

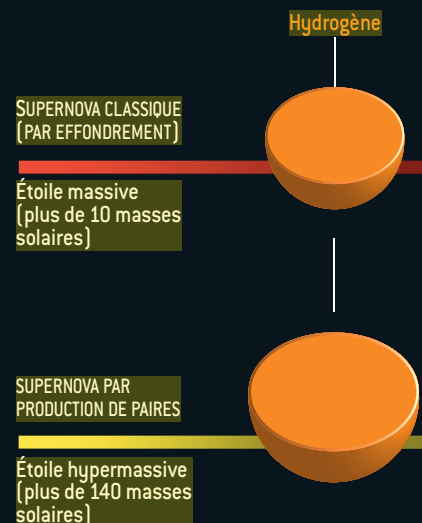
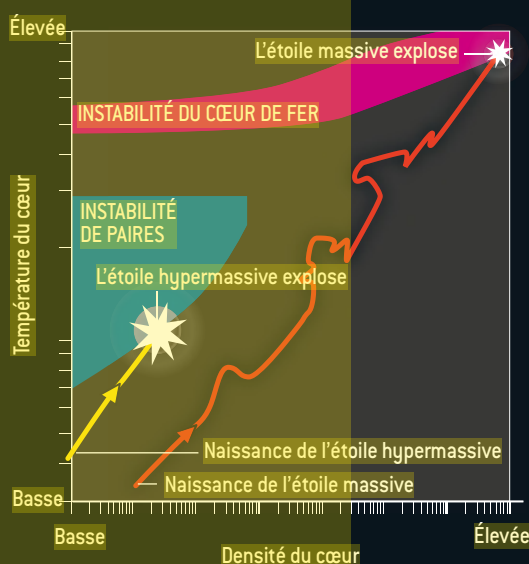
maient, elles dégageraient un vent stellaire si puissant qu'elles perdraient rapidement la majeure partie de leur masse, si bien que leur cœur ne deviendrait jamais assez massif pour que se déclenche l'instabilité de paires.

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-