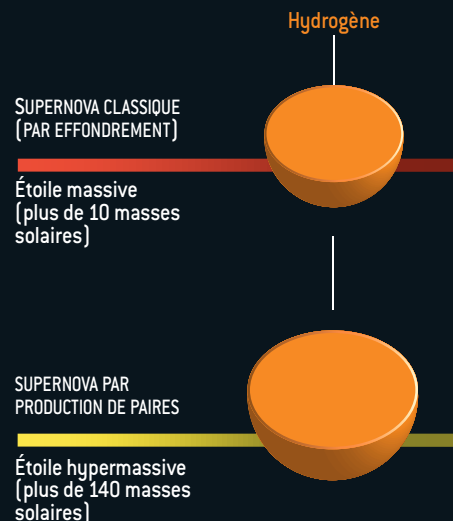
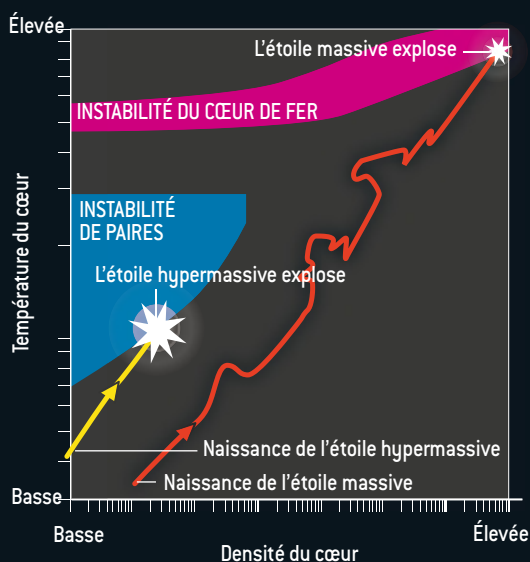


COMMENT MEURENT LES ÉTOILES MASSIVES

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.

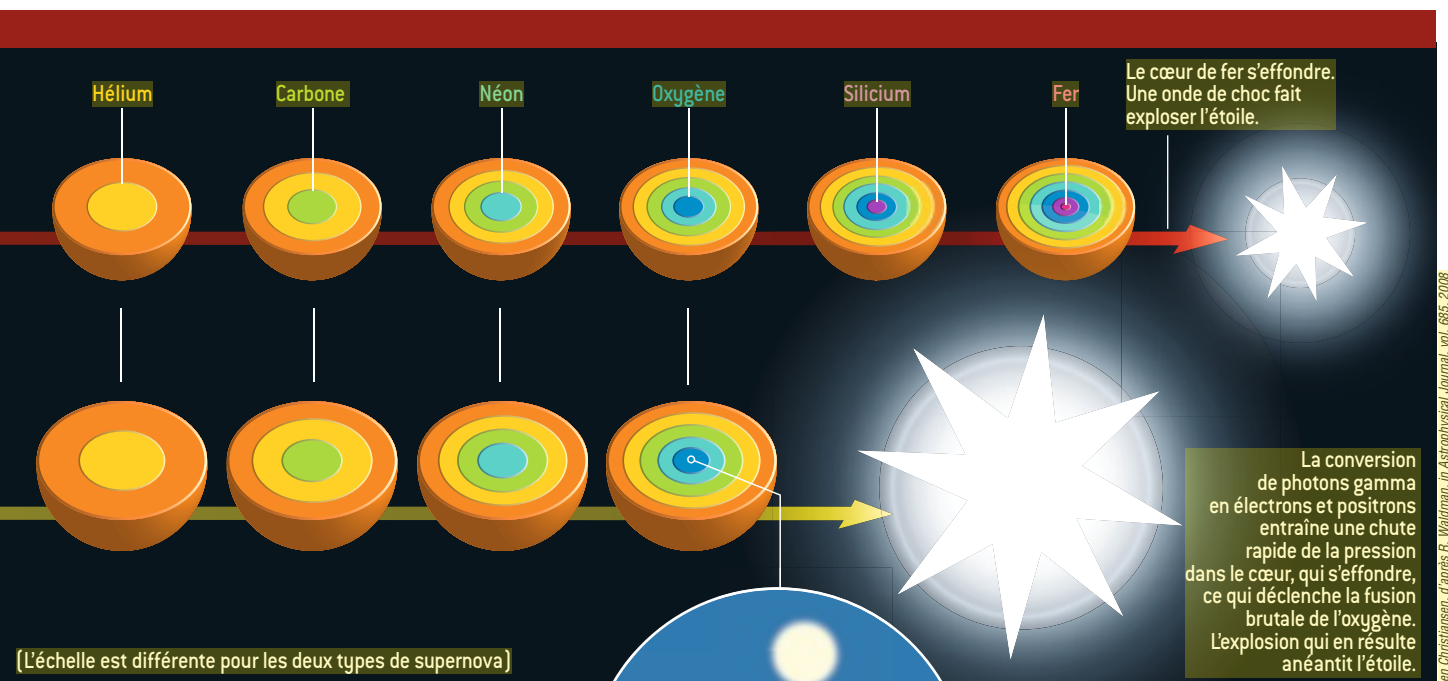
Tout au long de 2007 et de 2008, avec plusieurs collaborateurs, nous avons continué à observer SN 2007bi à l'aide des télescopes de l'Observatoire du mont Palomar. La supernova mit plus d'un an avant de s'éteindre enfin. J'ai alors demandé à mes collègues de Caltech Richard Ellis et Shrinivas Kulkarni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