

LES POTINS DE LA VOIE LACTÉE
UNE SUPERNOVA DANS LE GRAND NUAGE DE MAGELLAN

Dans la nuit du 23 au 24 février 1987, l'astronome canadien Ian Shelton, alors en mission à l'observatoire américain de Las Campanas, au Chili, découvrait une supernova dans la galaxie australe voisine de la nôtre, le Grand Nuage de Magellan. Il s'agit là d'un événement scientifique d'importance: cette supernova est la première qui soit assez brillante pour être visible à l'oeil nu depuis celle apparue dans notre propre Galaxie, dans la constellation d'Ophiuchus, en 1604, connue sous le nom de "supernova de Kepler". A 170 000 années de lumière, le Grand Nuage de Magellan fait partie de notre proche banlieue, ce qui explique les conditions favorables à l'observation de la supernova. L'évènement constitué par l'explosion de la supernova s'est tout de même produit 170 000 ans auparavant.. Remarque qui a conduit un journaliste scientifique à se demander si, dans ces conditions, on pouvait véritablement parler de "scoop" !

Le Grand Nuage de Magellan, dont la déclinaison est égale à -69° , est un astre du ciel austral inobservable sous nos latitudes. Tous les observatoires de l'hémisphère austral, abandonnant les observations duement programmées, ont donc braqué leurs télescopes vers la supernova.

C'est qu'en effet on connaît mal les circonstances dans lesquelles une étoile est conduite à exploser et, libérant une gigantesque quantité d'énergie, à se transformer en supernova. Les moyens d'observation actuels sont sans commune mesure avec ceux dont disposait Kepler en 1604 - la première lunette astronomique n'était même pas encore construite ! -. L'énergie provenant de la supernova recueillie par nos télescopes est assez importante pour que les spectrographes puissent beaucoup la disperser, ce qui doit apporter une moisson d'informations aussi bien sur la supernova elle-même (formation et expansion de la nébuleuse, composition chimique traduisant les processus nucléosynthétiques récents au sein de la supernova...) que sur le milieu interstellaire traversé par la lumière à la fois dans le Grand Nuage de Magellan et dans notre Galaxie. Peut-être verrons-nous se former un pulsar, manifestation du résidu stellaire condensé. Déjà la "neutrino-astronomie" expérimentale est née, avec l'observation des neutrinos émis lors de l'explosion.

Bref, nos connaissances sur les supernovae qui reposaient jusqu'ici bien peu sur l'observation et beaucoup sur les déductions théoriques vont vraisemblablement s'enrichir considérablement dans les temps qui viennent.

LES SUPERNOVAE HISTORIQUES.

Les civilisations anciennes ont attribué beaucoup d'importance aux phénomènes célestes, pensant qu'ils pouvaient avoir une influence sur les événements terrestres. La civilisation chinoise nous a laissé une source importante d'informations sur les événements astronomiques qu'elle a soigneusement consignés. L'indice le plus ancien que l'on ait de l'apparition d'une supernova remonte à 1300 ans avant notre ère: une inscription gravée sur un fragment d'os nous apprend qu'une étoile très brillante est alors apparue à proximité de l'étoile que nous connaissons maintenant sous le nom d'Antarès, dans la constellation du Scorpion.

Le texte chinois concernant l'étoile nouvelle apparue en l'année 185 de notre ère ne laisse plus aucun doute sur son identification à une supernova, car il décrit non seulement l'importance de son éclat apparent, mais aussi la durée de son déclin - environ 6 mois. Les chroniques font mention de 5 autres supernovae apparues dans notre Galaxie au cours du millénaire suivant. Certaines sont confirmées par des sources indépendantes, venant d'Egypte ou du Japon. La plus célèbre est la supernova de 1054 apparue dans la constellation du Taureau, qui a donné naissance à la nébuleuse du Crabe et à un pulsar. Bien qu'elle ait été à son maximum plus brillante que la planète Vénus et visible en plein jour, elle n'a pas conduit les civilisations d'Europe à nous en laisser le moindre souvenir. Seuls les chinois, les japonais et peut-être des indiens de l'Arizona en ont fait mention.

La première description européenne d'une supernova date de 1572. L'astronome danois Tycho Brahé, s'il ne fut pas le premier à l'observer, lui attacha son nom par l'ouvrage "De Nova Stella" qu'il lui consacra. Trente deux ans plus tard, apparaissait la supernova de Kepler, dont l'intérêt particulier provient de ce qu'elle fut observée - essentiellement par Tycho Brahé - dès avant qu'elle atteigne son éclat maximal.

Il exploserait donc en moyenne 4 supernovae visibles à l'oeil nu par millénaire. Mais plus aucune n'est apparue depuis celle de Kepler, si ce n'est celle de 1885 dans la galaxie d'Andromède, juste en dessous du seuil de visibilité à l'oeil nu. L'astronome américain d'origine suisse, Fritz Zwicky, fut l'un des premiers à formuler une théorie moderne de l'explosion d'une étoile donnant naissance à une supernova et à entreprendre - malgré le scepticisme de ses collègues - une recherche systématique de supernovae dans les galaxies extérieures; avec ses collaborateurs, il devait en découvrir près de 300... On en connaît actuellement plus de 600.

COMMENT SE FORME UNE SUPERNOVA.

La stabilité d'une étoile résulte d'un équilibre entre la gravitation, qui tend à la faire s'effondrer sur elle-même, et l'énergie due aux réactions

thermonucléaires qui est générée dans le coeur de l'étoile et rayonnée vers l'extérieur. Tout au long de sa vie, une étoile trouve une structure d'équilibre sous ces deux effets contraires: celle d'une sphère de gaz chaud.

Quand les réactions de fusion s'arrêtent par manque de combustible thermonucléaire, l'équilibre est rompu et l'étoile - ou tout au moins son noyau central - s'effondre, donnant naissance, si elle n'est pas trop massive à une naine blanche, telle le compagnon de Sirius. La masse volumique dans une naine blanche est de l'ordre d'une tonne par cm^3 (la masse du Soleil dans le volume de la Terre, où, si vous préférez, celle d'un éléphant dans un dé à coudre). Les atomes sont complètement ionisés et les électrons libres si comprimés qu'ils y forment un gaz "dégénéré", soumis à des effets quantiques qui s'opposent à la compression et équilibrent donc les effets de la gravitation. Cet équilibre n'est possible que pour une masse plus faible que 1,4 fois celle du Soleil. A cause des processus de perte de masse importants qu'elles subissent au cours de leur évolution, des étoiles relativement massives, jusqu'à environ 8 masses solaires, terminent leur vie sous la forme de naines blanches.

Une première catégorie de supernovae, qu'on dit de **type I** (telles celles de Tycho et de Kepler) sont caractérisées par la forme de leur courbe de lumière (ou variation de leur éclat apparent au cours du temps) et par leur spectre dont les raies de l'hydrogène sont absentes. Elles se forment probablement dans des systèmes binaires serrés dont une composante est une naine blanche qui capture une partie de la masse de sa compagne, par effet de marée. Quand la masse qu'elle a capturée l'amène à dépasser la valeur limite de 1,4 masses solaires qui permet son équilibre, elle est conduite à exploser. Cette étoile est dépourvue d'hydrogène, qui s'est entièrement transformé en hélium par réaction thermonucléaire, ce qui explique que les raies de l'hydrogène soient absentes du spectre de la supernova.

La supernova du Grand Nuage de Magellan semble appartenir à la seconde catégorie de supernovae, celles de **type II**, qui sont la phase terminale de l'évolution d'étoiles de masse initiale supérieure à 8 masses solaires. Ces étoiles massives évoluent très rapidement, car elles sont capables de provoquer dans leurs régions centrales des températures plus élevées que celle qui règnent dans les étoiles de moins grandes masses. Etant très sensibles à la température, les réactions thermonucléaires se font à un rythme considérablement plus grand, avec un très grand débit d'énergie. Dans la phase de combustion de l'hydrogène en hélium, ces étoiles sont donc très lumineuses, puisqu'elles génèrent une puissance considérable; et cette phase est beaucoup plus courte que pour une étoile comme le Soleil (7 millions d'années contre 10 milliards), puisque le combustible s'épuise beaucoup plus vite. Suit une phase de contraction du noyau qui s'arrête quand la température atteinte (environ 200 millions de kelvins) permet la fusion de l'hélium.

L'étoile connaît alors une nouvelle phase de stabilité qui dure environ 600 000 ans. Et ainsi de suite: les contractions successives provoquent grâce à l'élévation de température, la fusion d'éléments de plus en plus lourds, jusqu'à la production de noyaux de fer. A ce stade, l'étoile a une structure qui rappelle celle d'un oignon, avec un noyau central de fer et des couches successives où s'effectuent des réactions de fusion, celle de l'hydrogène ayant lieu dans la couche la plus proche de la surface, là où la température est la moins élevée.

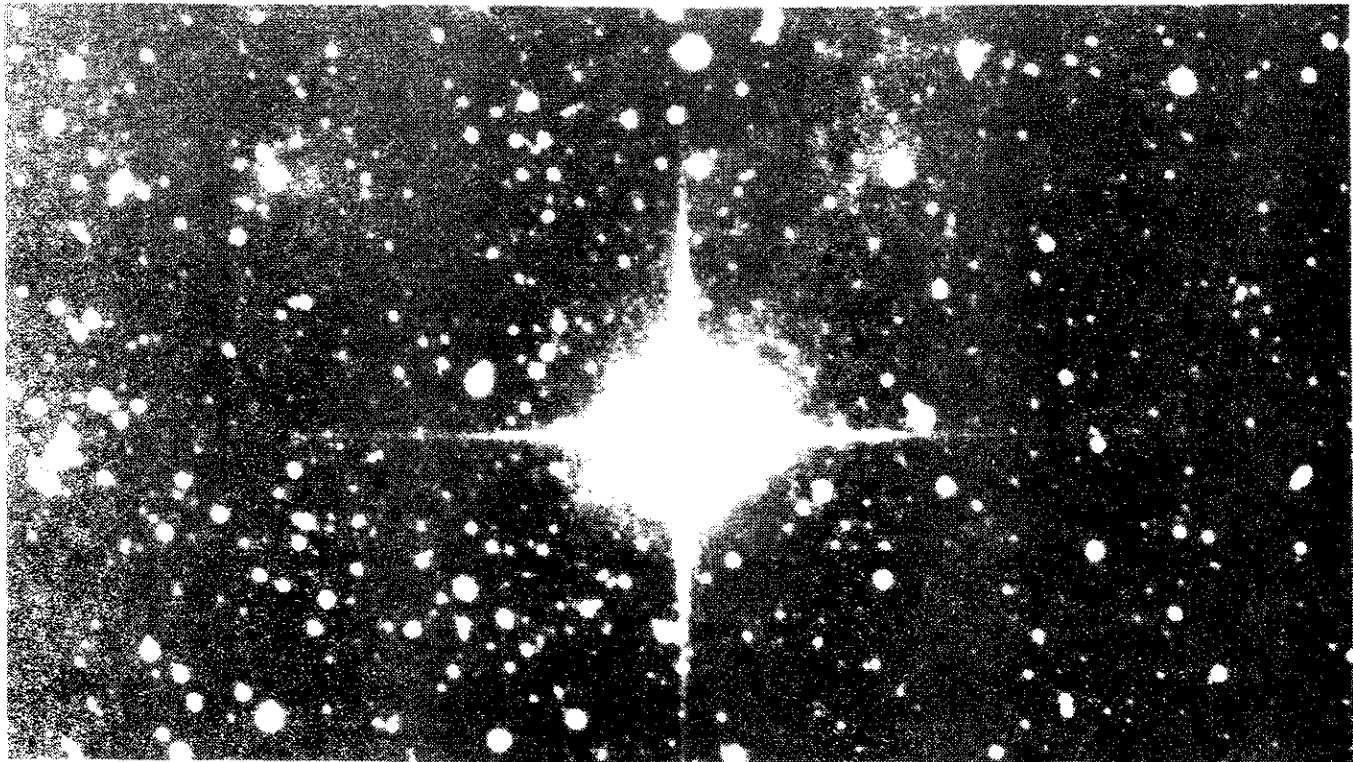
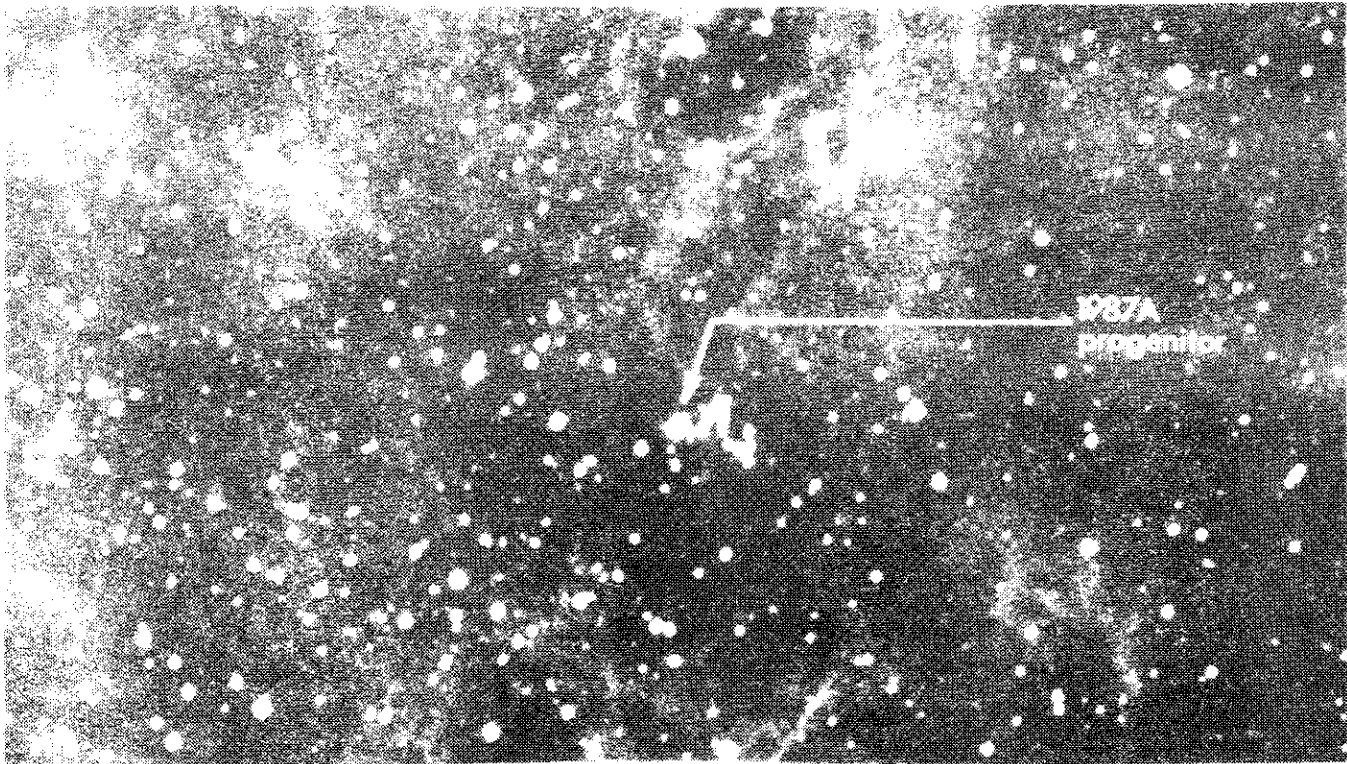
En moins d'une seconde, lorsque cessent les réactions de fusion du fer, le coeur de l'étoile composé de noyaux de fer s'effondre jusqu'à atteindre une densité de l'ordre de celle qui règne dans un noyau atomique - environ $10^{15} \text{ g cm}^{-3}$. Aux pressions énormes qui règnent alors, les électrons pénètrent dans les noyaux où ils fusionnent avec les protons pour donner des neutrons. Puis les noyaux atomiques eux-mêmes se dissolvent pour donner naissance à un gaz libre de neutrons, à son tour dans l'état dégénéré... Ces réactions transforment le coeur de l'étoile en étoile à neutrons en un millième de seconde. Elles s'accompagnent d'une émission intense de neutrinos, particules qui interagissent très peu avec la matière et quittent l'étoile. On connaît encore mal les détails des processus qui donnent alors lieu à travers la formation d'ondes de choc, à l'explosion du reste de l'étoile, accompagnée de la formation, par nucléosynthèse explosive, des éléments plus lourds que le fer. Ces éléments ont en effet besoin d'un apport d'énergie pour se former, la masse du noyau atomique étant supérieure à la somme des masses des constituants.

LA SUPERNOVA DU GRAND NUAGE DE MAGELLAN.

Nous avons encore beaucoup à apprendre de cette supernova. Les premiers résultats spectroscopiques ont montré que la nébuleuse éjectée a atteint des vitesses considérables, s'élevant jusqu'à $18\ 000 \text{ km s}^{-1}$; la structure de nombreuses raies interstellaires, telles la raie D du sodium et les raies H et K du calcium ionisé a montré de nombreuses composantes, en absorption, formées dans des nuages animés de vitesses radiales différentes, dans le Grand Nuage de Magellan et dans notre Galaxie.

Les résultats les plus spectaculaires jusqu'ici concernent les neutrinos. Le détecteur japonais, Kamiokande II en a détectés 11, dans le domaine d'énergie attendu, dont la date d'arrivée s'est étalée sur 13 secondes le 23 février, 3 heures **avant** la première observation de la supernova. Cette observation est en excellent accord avec celle effectuée par le détecteur américain Irvine-Michigan-Brookhaven, sous le rivage du lac Erié, qui a détecté au même moment 8 neutrinos, échelonnés sur 6 secondes; elle confirme très bien la théorie précédemment décrite qui prévoit que les neutrinos se forment dans un court intervalle de temps pendant la phase

AVANT ...



Ces deux clichés (avec la même échelle : 21mm pour 1 minute d'arc) représentent un détail du Grand Nuage de Magellan au voisinage de la supernova SN1987A; ils ont été obtenus avec un télescope de Schmidt de l'Observatoire Européen Austral (ESO) au Chili. Le cliché du haut a été pris en 1977, en lumière violette (IIa-O+UG1, 60 min) et l'on y a indiqué la position de l'étoile supergéante bleue soupçonnée initialement d'être à l'origine de la supernova. Le cliché du bas a été pris en lumière bleue (IIa-O+GG385, 15 min) le 26 février 1987 alors que la supernova a augmenté en éclat d'un facteur 2000 environ. On retrouve sur les deux clichés les autres étoiles, dont l'éclat n'a pas varié. La "croix" autour de la supernova est un effet optique parasite produit dans le télescope par le système de support des plaques photographiques.

d'effondrement de l'étoile à neutrons et avant l'explosion de la supernova.

Le très faible nombre de neutrinos détectés nous rappelle que la probabilité d'interaction d'un neutrino avec la matière est extrêmement faible. Pratiquement tous la traversent sans interagir. On évalue à 10 milliards le nombre de ceux qui ont traversé chaque cm^2 à la surface de la Terre.

Cette expérience pose aussi des contraintes sur les propriétés des neutrinos dont on voit qu'ils ont survécu pendant les 170 000 ans qu'a duré le parcours; on a pu déduire de l'observation une limite supérieure à la masse du neutrino de l'ordre de 20 eV (pour plus de détails sur le neutrino et sa masse possible voir les Cahiers Clairaut n° 21 et 22), en accord avec la plupart des expériences de laboratoire antérieures.

Le problème de l'identification de l'étoile qui a donné naissance à la supernova, par contre, n'est pas encore résolu. On a d'abord soupçonné une étoile supergéante de type spectral B3 et de magnitude apparente 12, dont la position coïncide très bien avec celle de la supernova. Il paraissait simplement un peu étonnant que l'on n'ait jamais décelé de variabilité sur cette étoile auparavant. Des observations en ultraviolet, aux longueurs d'onde de 1150 à 1600Å, ont permis de réobserver l'étoile incriminée, identique à ce qu'elle était auparavant, à partir du 2 mars. Le progéniteur de la supernova serait-il un compagnon peu brillant de cette étoile, mais alors comment expliquer l'absence d'interaction visible après l'explosion ? Une autre hypothèse fait intervenir une étoile peu brillante, située dans une direction très voisine mais à une distance différente.

Le flux de neutrinos observés et la présence des raies de l'hydrogène sont en bon accord avec la nature d'une supernova de type II. Par contre, la magnitude apparente au maximum d'éclat observé jusqu'ici conduit à une magnitude absolue trop peu lumineuse pour ce type de supernova; de plus le changement de couleur (qui est passée du bleu au rouge) s'est fait en une durée 5 à 10 fois plus rapide que celle habituellement observée dans les supernovae de type II. Enfin, le spectre observé dans l'UV est assez différent du spectre habituellement observé dans les supernovae de type II. L'avenir nous apportera certainement encore beaucoup de nouvelles surprises.

Lucette Bottinelli

Bibliographie:

On pourra trouver dans les Cahiers Clairaut des articles portant sur des points particuliers évoqués ici:

"Les neutrinos solaires" par E. Schatzman, C.C. n°21, p.3 et n°22, p. 18

"Alchimie Cosmique" par L. Gouguenheim, C.C. n°24, p.3

"Etoiles à Neutrons et Pulsars" par R. Hakim, C.C. n°25, p.9; n°26, p.15; n°27, p.21 et n°28, p. 28