

L'explosion d'une supernova dans le Grand Nuage de Magellan ! (*)

par Jean SURDEJ (**)

La plus brillante supernova depuis près de quatre siècles...

La première à être visible à l'œil nu depuis 1604 (supernova de Kepler)...

SN 1987A, la pierre de Rosette des astrophysiciens ?...

« Cette supernova est différente de toutes celles observées jusqu'à présent »

(Communiqué de presse du 31 mars 1987, ESO)

Première détection de neutrinos émis par une supernova il y a 165.000 ans !

La première supernova de 1987 brille toujours dans le ciel austral...

Depuis la découverte surprenante, le 24 février dernier, de l'explosion d'une supernova dans le Grand Nuage de Magellan, une agitation tout à fait euphorique règne dans les grands centres astrophysiques du monde entier. Jamais autant de télescopes n'ont été braqués sur un même astre de notre Univers (sauf la comète de Halley en 1985-86), jamais autant de physiciens des particules élémentaires et d'astrophysiciens n'ont échangé de vues sur ce qui lie l'infiniment petit à l'infiniment grand. De plus, cette supernova continue à briller de ses plus grands feux dans le ciel noir de l'hémisphère austral (Amérique et Afrique du Sud, Australie, Nouvelle-Zélande, etc). C'est la fête pour tous ceux qui ont la chance d'observer à l'œil nu les dernières lueurs d'une étoile qui a cessé d'exister il y a environ 165.000 ans.

Les implications de cette découverte sont multiples, voire insoupçonnables. Tout d'abord, l'étude astrophysique de la supernova 1987A conduira à une évaluation beaucoup plus précise des processus cataclysmiques qui accompagnent la mort d'une étoile massive. La détermination des propriétés intrinsèques (cf. la luminosité absolue) de SN 1987A permettra de revoir la calibration des échelles de distance de tout notre Univers... L'estimation de son âge pourrait même en être affectée !

La brillance apparente exceptionnellement élevée de SN 1987A en fait une « sonde » de tout premier choix. Ainsi, plus d'une vingtaine de nuages de matière interstellaire et intergalactique situés entre notre Soleil et la

(*) Le présent article est basé sur de nombreuses Circulaires Astronomiques de l'UAI ainsi que sur des communiqués de presse de l'ESO, la revue « The Messenger » du 15 mars 1987, des photographies et autres documents qui nous ont été transmis par l'ESO (pour plus de détails au sujet des activités de l'ESO, voir l'article « L'Observatoire Européen Austral a (presque) 25 ans » par J.-P. Swings dans ce même numéro).

(**) Institut d'Astrophysique, Université de Liège. Chercheur Qualifié au FNRS.

ABSTRACT

We present here an overview of the main results obtained so far about the bright supernova SN 1987A which exploded in the Large Magellanic Cloud.

* * *

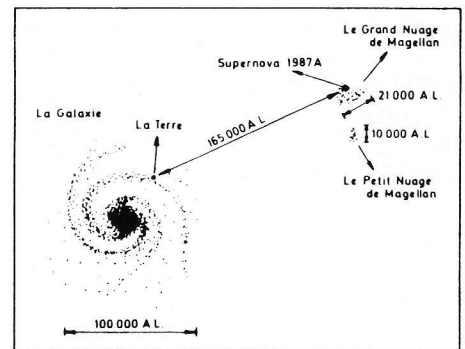
supernova ont déjà été découverts grâce à des observations spectroscopiques.

Par ailleurs, la détection à la surface de la terre de quelques rares neutrinos en provenance de SN 1987A a apporté des renseignements de toute première importance sur les propriétés (masse, temps de vie, etc.) de ces particules « fantômes » ainsi que sur les scénarios théoriques proposés pour rendre compte de la formation d'étoiles à neutrons. Cependant, l'apparition de cette supernova laisse aussi derrière elle de multiples conjectures : pourquoi cette étoile trépassée ne faiblit-elle pas ? Retrouvera-t-on sur des clichés anciens la trace et le type de l'étoile qui a explosé ? Observera-t-on un pulsar comme vestige de ce gigantesque feu d'artifice ? Nous devons encore vivre quelques semaines d'impatience, peut-être quelques années, avant de connaître la suite passionnante de cette histoire inattendue.

Un rêve qui devient réalité !

L'étude de l'apparition des supernovae dans un grand échantillon de galaxies extérieures prédit qu'environ quatre supernovae de notre Galaxie devraient être visibles à l'œil nu en l'espace de mille ans. Quelle ne fut pas la surprise d'apprendre par un Télégramme Astronomique de l'UAI (1) du 24 février 1987 (immédiatement suivi de la Circulaire Astronomique n° 4316) qu'une brillante supernova de magnitude visuelle apparente $m_v = 4,5$ - c'est-à-dire facilement visible à l'œil nu - avait été découverte au cours de la nuit du 23 au 24 février 1987 dans le Grand Nuage de Magellan. Le Grand Nuage de Magellan (GNM) est en réalité une petite

galaxie satellite située à environ 165.000 AL (2) de notre Voie Lactée (voir les Figures 1 et 2). Nous percevons donc aujourd'hui cette supernova telle qu'elle était il y a 165.000 ans.



▲ Fig. 1 : La supernova 1987A dans le Grand Nuage de Magellan.

L'explosion de la supernova 1987A a eu lieu au cours de la nuit du 23 au 24 février 1987 dans le Grand Nuage de Magellan. Celui-ci ainsi que le Petit Nuage de Magellan sont deux petites galaxies satellites de la nôtre situées à environ 165.000 AL. Etant donné que la lumière a mis 165.000 ans pour nous parvenir de la supernova, nous assistons aujourd'hui à un événement cataclysmique qui s'est en réalité produit dans le Grand Nuage de Magellan bien avant l'apparition de l'homo sapiens sur la planète Terre. Les Petit et Grand Nuages de Magellan sont facilement observables à l'œil nu dans le ciel étoilé de l'hémisphère austral (Amérique et Afrique du Sud, Australie, Nouvelle-Zélande).

Trois découvertes indépendantes de SN 1987A (3) ont en fait été annoncées dans la Circulaire historique du 24 février. Alors qu'Oscar Duhalde (assistant de nuit à l'observatoire américain de Las Campanas, au Chili) et Albert Jones (astronome amateur de Nelson, Nouvelle-Zélande) ont découvert visuellement SN 1987A le

(2) Une année-lumière (AL) mesure la distance parcourue en une année par la lumière à la vitesse de 299.793 km/sec, c'est-à-dire environ 9.460 milliards de kilomètres !

(3) Première (lettre A) supernova (SN) de cette année (1987).

(1) Union Astronomique Internationale.



▲ Fig. 2 : Le Grand Nuage de Magellan.

Sur cette photo du Grand Nuage de Magellan, la supernova 1987A brille, deux jours après l'explosion fatale, de ses feux les plus étincelants. Ce cliché a été obtenu par C. Madsen le 25 février à 1 h TU avec un appareil photographique de type Hasselblad (pose de 20 min. sur une émulsion Agfachrome 1000 RS) à l'Observatoire Européen Austral (ESO, Chili). La supernova a alors atteint une magnitude $V \approx 4,5$ mag. et est devenue ainsi facilement visible à l'œil nu. SN 1987A est la plus brillante des supernovae qui soit apparue depuis 393 ans ! La Tarentule, qui ressort aussi très bien sur ce cliché, est une nébuleuse géante d'hydrogène qui est ionisée par un amas d'étoiles chaudes.

[Cliché ESO]

24 février 1987 à 4,8 h TU (Temps Universel) et à 7,9 h TU respectivement, Ian Shelton (astronome de l'université de Toronto, en mission à l'observatoire de Las Campanas au Chili) a identifié la supernova à 5,5 h TU sur un cliché photographique obtenu au moyen d'un astrographe de 25 cm de diamètre. D'après des témoignages, nous savons que Ian Shelton pensait tout d'abord que le nouvel objet identifié était un défaut de plaque !

C'est en observant le ciel austral avec ses propres yeux qu'il put se convaincre qu'il ne rêvait pas. SN 1987A est en effet la plus brillante des supernovae observées depuis 1604. La supernova de 1604 est apparue à une distance approximative de 30.000 AL dans la direction du centre de la Galaxie. Kepler et Galilée l'ont d'ailleurs observée avec les moyens disponibles à leur époque.

Immédiatement après cette découverte, des programmes d'observation d'urgence étaient déclenchés dans tous les observatoires astronomiques situés au sud de l'équateur terrestre. Par chance, plusieurs clichés photographiques en couleur du GNM ont été

pris à l'ESO (4) avec un appareil photographique de type Hasselblad juste avant et après l'apparition de SN 1987A. Le cliché reproduit à la Figure 2 permet de bien situer la position de la supernova, à côté de la nébuleuse géante « Tarentule » (30 Doradus) dans le GNM. La Figure 3 illustre avec plus de détails la région du ciel près de la Tarentule dix ans avant et trois jours après l'explosion de SN 1987A. Ces clichés ont été obtenus avec le grand télescope de Schmidt de l'ESO. Remarquons que la supernova a augmenté d'éclat de plus de deux mille fois entre la prise de ces deux clichés. On sait aujourd'hui que ces variations de lumière ont eu lieu en moins de 24 heures (voir Figure 4).

Une vraie pluie de Circulaires Astronomiques continue de s'abattre sur nos instituts astronomiques (malheureusement avec une bonne semaine de retard après leur parution aux USA). Les conversations de couloir ont rarement été aussi animées. Nous vous proposons ci-après un petit compte rendu de l'histoire de SN 1987A.

(4) ESO = European Southern Observatory ou Observatoire Européen Austral.

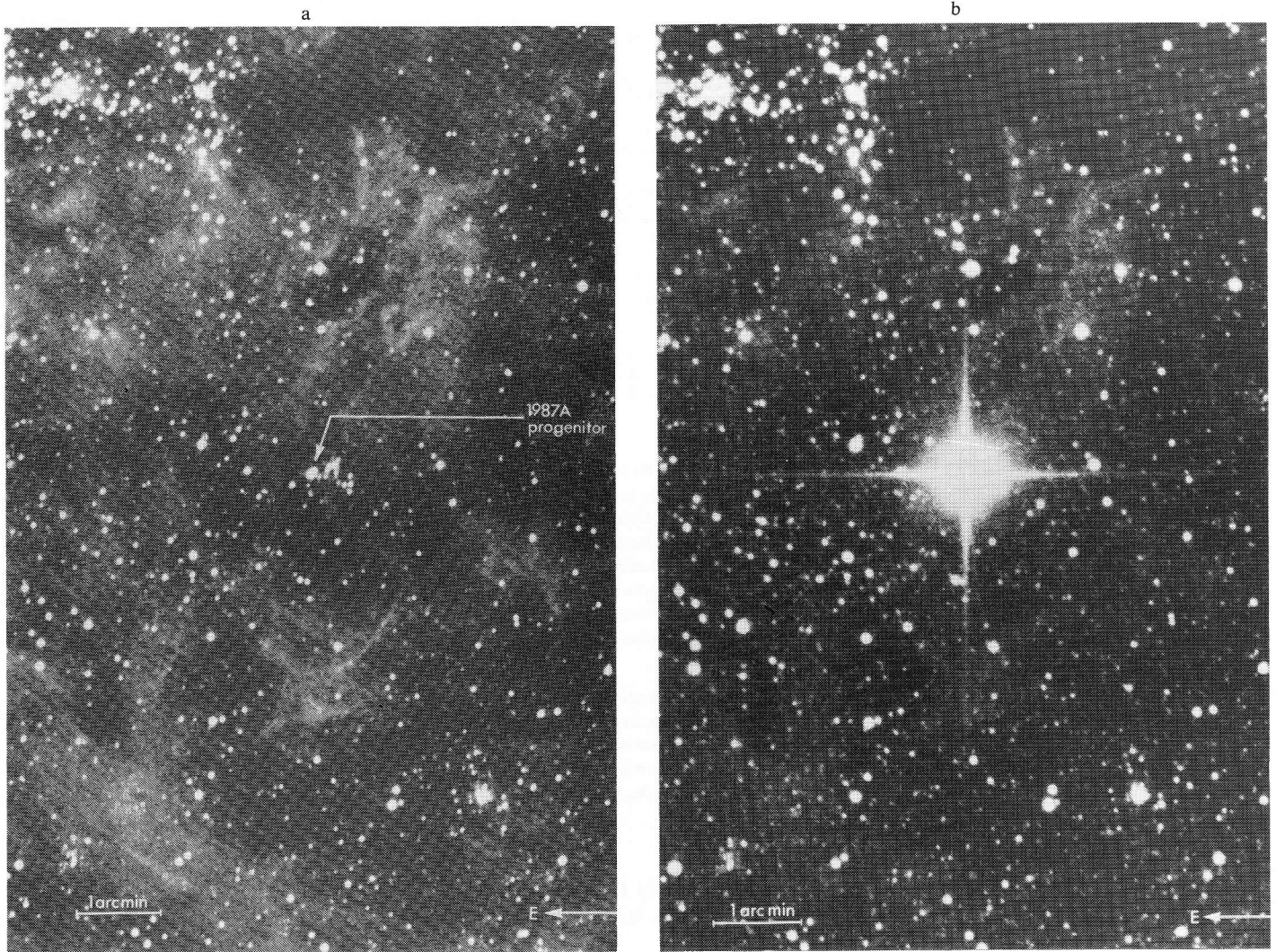
Le Grand Nuage de Magellan : un véritable laboratoire expérimental d'évolution stellaire à la portée de nos instruments

C'est une véritable aubaine que SN 1987A soit apparue dans le GNM. En effet, on peut supposer en première approximation que toutes les étoiles du GNM, et par surcroît SN 1987A, sont situées à la même distance de nous (5). Nous avons donc à la portée de nos instruments un véritable laboratoire expérimental d'étoiles pour lesquelles il est aisé de comparer leur brillance apparente - ou intrinsèque - en fonction de leur température (6). Ce sont de telles mesures observationnelles qui ont montré que les étoiles n'avaient pas n'importe quelle température effective - ou couleur - pour une brillance donnée mais qu'elles occupaient des lieux privilégiés dans un diagramme de type luminosité-température (7). Des astrophysiciens théoriciens ont bien vite montré que ces lieux peuplés d'étoiles correspondent en réa-

(5) Plus exactement, cette distance vaut 165.000 ± 10.000 AL. L'appartenance d'une étoile au GNM est facilement établie sur base de la mesure de sa vitesse radiale qui doit être égale à la vitesse d'éloignement de 260 km/sec du GNM par rapport à nous.

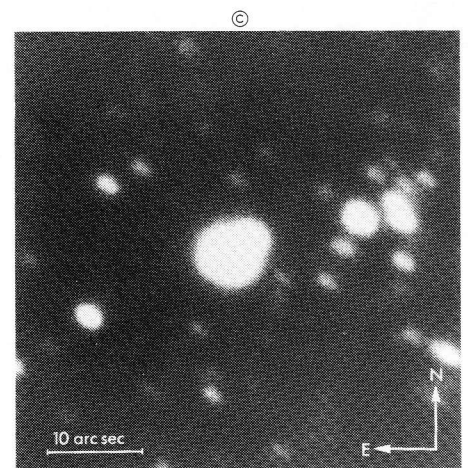
(6) La température effective T d'une étoile peut être déduite à partir de la mesure de sa couleur. Ainsi, on sait que $T \approx 15.000^\circ\text{K}$ pour une étoile bleue, $T \approx 6.000^\circ\text{K}$ pour une étoile jaune comme notre Soleil et $T \approx 3.000^\circ\text{K}$ pour une étoile rouge.

(7) Connue sous le nom célèbre de diagramme « Hertzsprung-Russell »



▲ Fig. 3 a,b,c : Comparaison de photographies avant et après l'explosion de SN 1987A. Cette paire de clichés photographiques (3a et b), obtenus par H.E. Schuster, G. Pizarro et O. Pizarro avec le grand télescope de Schmidt à l'Observatoire Européen Austral (ESO, Chili), illustre l'apparition spectaculaire de la supernova dans le Grand Nuage de Magellan. Entre la prise de ces deux clichés [(3a) à gauche en 1970 et (3b) à droite le 26 février 1987], l'éclat de SN 1987A a augmenté de plus de 2.000 fois. On a aussi pu établir que ces variations de luminosité ont eu lieu en moins de 24 heures. Notons que la croix lumineuse qui apparaît autour de l'image de SN 1987A sur le cliché 3b est un effet optique dû à la diffraction de la lumière de la supernova par le support, en forme de croisillon, de la plaque photographique à l'intérieur du télescope.

► On pensait d'abord que le précurseur de SN 1987A était l'étoile de Sanduleak $-69^{\circ}202$, une supergéante bleue de type B3 indiquée par une flèche sur le cliché de gauche. Cependant, des observations spectroscopiques obtenues avec le satellite IUE (9) dans l'ultraviolet lointain ont révélé que cet objet est resté intact après l'explosion. On peut aussi voir sur l'agrandissement d'un cliché photographique obtenu en lumière rouge (1979, télescope ESO de 3,6 m) que l'étoile de Sanduleak $-69^{\circ}202$ [au centre du cliché (3c)] a une forme allongée suivant la direction SE-NW. Des chercheurs de l'ESO, parmi lesquels R. West, ont pu montrer que la lumière des deux autres compagnons contribuait à former l'image observée mais que ceux-ci ne pouvaient pas être les précurseurs de SN 1987A. Le vrai précurseur se cache peut-être juste derrière Sanduleak $-69^{\circ}202$! [Clichés ESO]



lité à de véritables chemins d'évolution stellaire dont les différents points de départ correspondent à des conditions initiales différentes (masse initiale, composition chimique, etc.). Dans ce contexte, nous savons que si on parvenait à identifier sur d'anciens clichés photographiques l'image de l'objet précurseur de SN 1987A, on ferait un grand pas dans notre compréhension des derniers stades de l'évolution d'une étoile massive. Un très bon candidat précurseur a immédiatement été identifié. Il s'agit d'une étoile supergéante bleue de type B 3 dénommée Sanduleak $-69^{\circ}202$ (8) dont la masse ini-

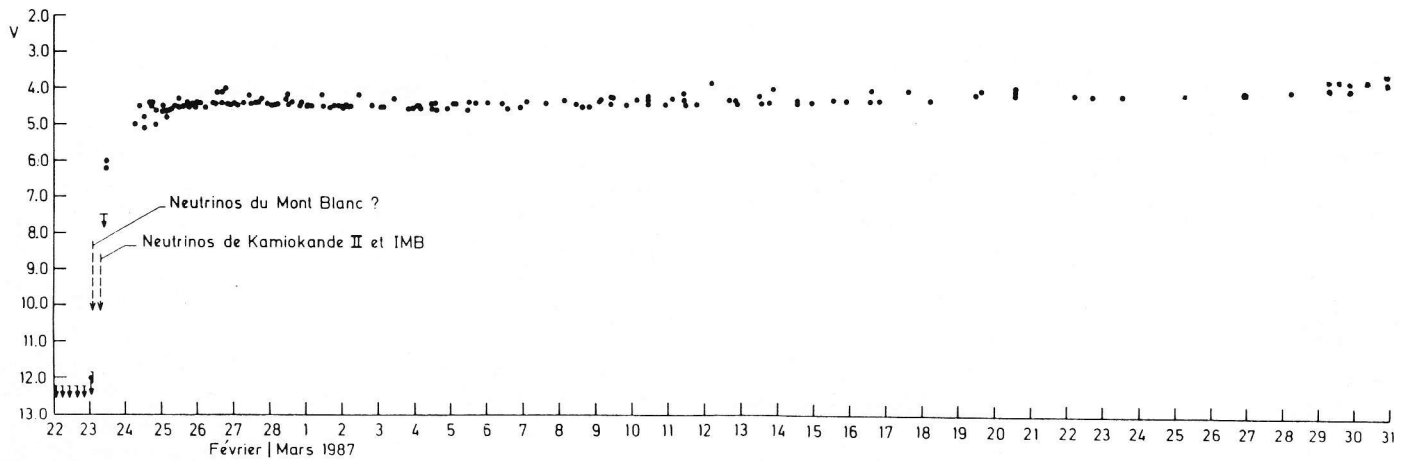
tiale devait être de l'ordre de 30 à 50 fois celle du Soleil. Aux erreurs de mesure près, on peut certifier que la supernova occupe une position apparente dans le ciel identique à celle de Sanduleak $-69^{\circ}202$. Cependant, les choses se sont très vite compliquées. En effet, après que l'éclat de SN 1987A ait fortement diminué dans l'ultraviolet lointain, des astrophysiciens de l'Agence Spatiale Européenne (Villafranca, Espagne) ont constaté

(8) C'est-à-dire la 202^e étoile de déclinaison équatoriale proche de -69° identifiée en 1969 par l'astrophysicien Sanduleak.

que le spectre ultraviolet observé le 2 mars avec le satellite IUE (9) ne ressemblait plus du tout à celui d'une supernova mais bien à celui d'une supergéante bleue de type B. Il semblerait donc que le vrai précurseur de SN 1987A ne soit pas l'étoile de Sanduleak, mais une étoile non encore identifiée (10), située très très près - peut-être un peu derrière - l'étoile supergéante bleue qui, elle, est restée intacte.

(9) International Ultraviolet Explorer.

(10) Les théories de l'évolution stellaire prévoient un précurseur ressemblant davantage à une supergéante rouge qu'à une supergéante bleue !



La naissance d'une supernova... ou la mort d'une étoile massive

De façon générale, on reconnaît deux types distincts de supernovae : les supernovae de type I et celles de type II. Les supernovae de type I sont observées dans les galaxies spirales, elliptiques et irrégulières (11). Après avoir atteint une magnitude visuelle absolue proche de $-18,7$ - c'est-à-dire intrinsèquement 2 milliards de fois plus lumineuses que notre Soleil -, les supernovae de type I présentent un déclin rapide de leur luminosité. Ce type de supernova caractérise certains systèmes d'étoiles binaires dans lesquels une des composantes est une naine blanche (12).

A cause du champ gravifique très intense développé par la naine blanche, celle-ci arrache continuellement de la matière à son compagnon (voir Figure 5). Lorsque la masse de la naine blanche atteint une valeur critique (13), celle-ci s'effondre sur elle-même et il s'ensuit une véritable explosion nucléaire qui détruit littéralement la naine blanche. Les énormes quantités d'énergie libérées lors de ce gigantesque cataclysme rendent compte du phénomène de supernova de type I. Remarquons qu'aucune raie due à l'atome d'hydrogène n'est observée dans le spectre d'une supernova de type I (14).

Il se fait que ces raies ont très vite été détectées dans le spectre de SN 1987 A et on sait par ailleurs que celles-ci sont caractéristiques du spectre d'une supernova de type II. Cependant, alors que les supernovae de type II se rencontrent principalement dans les

(11) Le GNM constitue un bel exemple de galaxie irrégulière (voir Figure 2).

(12) Etoile dont le rayon est comparable à celui de la Terre, mais où règnent des densités volumiques de l'ordre de 1 tonne par cm^3 . Dans un tel objet les atomes se touchent pratiquement. C'est la répulsion mutuelle des électrons autour des noyaux atomiques qui empêche ces objets d'être davantage comprimés.

(13) Environ 1,4 fois la masse du Soleil.

(14) Une naine blanche est en effet complètement dépourvue de ses riches couches d'hydrogène.

▲ Fig. 4 : Courbe de lumière de SN 1987A (du 22 février au 31 mars 1987).

Cette figure représente la magnitude (*) visuelle apparente V de la supernova 1987A en fonction du temps d'observation. Cette courbe de lumière a été construite sur base de nombreux résultats observationnels publiés dans les Circulaires Astronomiques de l'UAI. L'augmentation d'éclat très rapide de SN 1987A entre les 23 et 24 février 1987 ainsi que la très légère augmentation ($\approx 0,5$ mag.) de sa luminosité visuelle en l'espace de plus d'un mois en font une supernova pas comme les autres. Les époques correspondant à la détection des neutrinos extragalactiques (par les équipes des observatoires neutrino du Mont-Blanc, de Kamiokande II et IMB) ont été indiquées sur le diagramme.

(*) L'utilisation d'un système de magnitudes permet de classer les étoiles ainsi que tous les autres objets célestes, selon une échelle logarithmique telle qu'une différence de magnitude d'une unité correspond à un rapport d'intensité lumineuse de 2,5. Ainsi, une étoile de magnitude 4 apparaît 2,5 fois plus brillante qu'une étoile de magnitude 5. Une différence de plus de 8 magnitudes telle qu'elle a été observée pour SN 1987A entre les 23 et 24 février 1987 correspond à une augmentation d'éclat dépassant un facteur 1.500 !

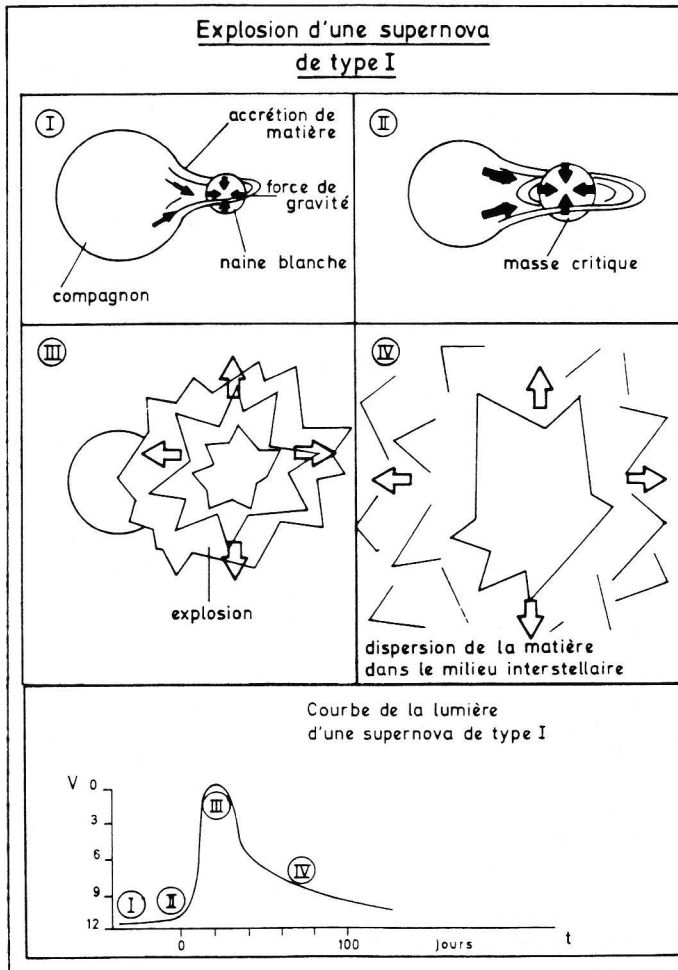
galaxies spirales, SN 1987A est le premier objet de ce type à être observé dans une galaxie irrégulière (voir Figure 2). De plus, après être passée par un maximum d'éclat correspondant en moyenne à une magnitude visuelle absolue de $-16,3$ - environ 250 millions de fois intrinsèquement aussi brillante que le Soleil -, une supernova de type II subit une décroissance d'éclat lente, mais continue. Or, la brillance apparente de SN 1987A semble rester fâcheusement constante (voir Figure 4). De surcroît, adoptant une magnitude visuelle apparente de 4,3 et une distance au GNM de 165.000 AL, on trouve que SN 1987A est environ 7 fois moins lumineuse qu'une supernova standard de type II. D'aucuns espèrent que SN 1987A augmente encore d'éclat, d'autres supposent que la faible métallicité du GNM où s'est formé le pré-curseur de la supernova est responsable de ce comportement bizarre. On ne peut pas exclure non plus que la supernova soit située loin par rapport à nous dans le GNM et que celui-ci l'obscurcit exagérément.

Mais venons-en maintenant au scénario théorique proposé pour rendre compte du phénomène de supernova de type II. Nous savons qu'à la fin de son évolution, une étoile finit par brûler l'entièreté de son combustible nucléaire. Déjà, tout l'hydrogène du noyau stellaire a été transformé en hélium, à son tour cet hélium a été transformé en carbone et oxygène (15) et ainsi de suite... jusqu'à ce qu'une dernière chaîne de réac-

tions nucléaires fusionnent des atomes de silicium en atomes de fer. Dans les conditions de température et de pression qui règnent au sein des étoiles, la structure des atomes de fer empêche ceux-ci de fusionner en éléments plus lourds. A ce moment, l'étoile ressemble à un gros noyau de fer entouré de différentes couches extérieures faites d'éléments plus légers (silicium ..., aluminium, etc. et hydrogène; voir Figure 6). Mais une telle configuration d'étoile est tout à fait instable. La source d'énergie nucléaire étant complètement tarie, les pressions gazeuse et radiative se sont évanouies et l'étoile n'a plus aucun moyen de supporter son propre poids. En moins d'une seconde, l'étoile s'effondre. Si la masse initiale de l'étoile n'est pas trop élevée - de l'ordre d'une masse solaire - ce cataclysme conduira à la formation d'une nébuleuse planétaire avec comme vestige en son centre une naine blanche (12).

C'est très probablement de cette façon que périra notre Soleil, dans approximativement cinq milliards d'années. Si, par contre, l'étoile précurseur est beaucoup plus massive

(15) C'est grâce à l'énergie nucléaire libérée lors de réactions de fusion d'éléments légers (cf. H ou He, etc.) en éléments plus lourds (cf. He ou C et O, etc.) qu'une étoile rayonne, voire même existe. En effet, ce sont les pressions gazeuse et radiative issues de cette source d'énergie nucléaire qui permettent à l'étoile de contrebalancer les effets de sa propre gravité.

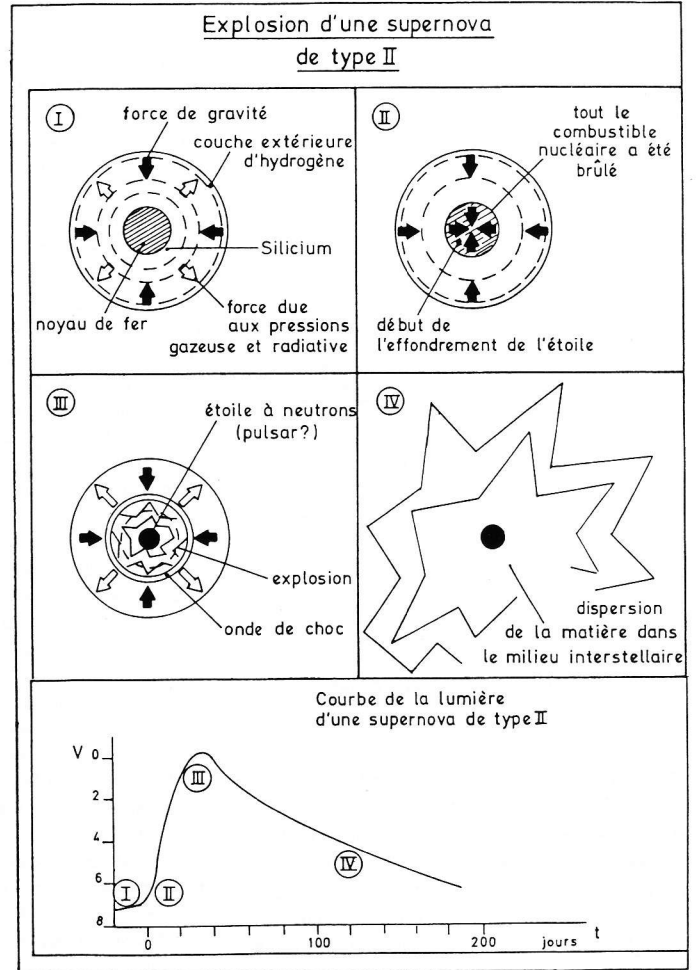


▲ Fig. 5 : Schéma explicatif de la formation d'une supernova de type I. Les astrophysiciens pensent que l'explosion d'une supernova de type I caractérise les systèmes d'étoiles binaires dans lesquels une naine blanche (12) arrache de façon graduelle de la matière à l'atmosphère géante de son compagnon I. Lorsque la masse de la naine blanche atteint une certaine valeur critique (13) II, celle-ci s'effondre sur elle-même et il s'ensuit une véritable explosion thermonucléaire au cours de laquelle la naine blanche est complètement détruite III. Les cendres de celle-ci sont ensuite dispersées dans le milieu interstellaire IV. Ces différentes étapes critiques qui marquent l'évolution d'une première classe d'explosions stellaires ont été indiquées sur une courbe de lumière typique d'une supernova de type I.

- environ 7 masses solaires et plus - l'effondrement du noyau de fer sera tellement violent que les répulsions électroniques entre atomes voisins ne seront plus suffisantes pour empêcher les noyaux atomiques de se toucher. En capturant les électrons, les protons se transforment littéralement en neutrons (16) ... une étoile à neutrons (17) a ainsi été formée ! Suite à l'intense répulsion mutuelle des neutrons, la gravité pourtant très élevée du noyau stellaire ne suffit pas à comprimer davantage l'étoile (18). Le rebond explosif qui s'ensuit engendre une onde de choc tellement énergétique que celle-ci emporte dans une terrible explosion les

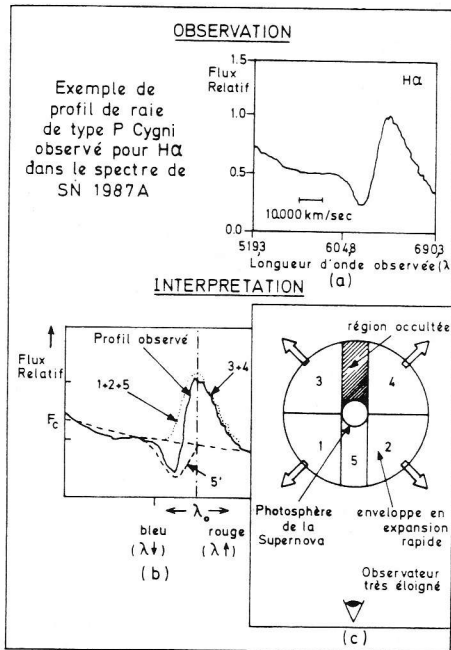
(16) Il est important de mentionner ici que les modèles théoriques d'évolution stellaire prévoient une émission très intense de particules fantomatiques appelées « neutrinos » lors de cette transmutation quasi instantanée des protons en neutrons.

(17) Le rayon d'une telle étoile atteint au plus quelques dizaines de km. Toutefois, la densité volumique d'une étoile à neutrons est gigantesque, de l'ordre de dix millions de tonnes de matière dans un cube de 1 cm de côté !



▲ Fig. 6 : Schéma explicatif de la formation d'une supernova de type II. A la fin de son évolution, une étoile massive présente une structure qui ressemble très fort à la structure en pelures d'un oignon. Faisant suite à une enveloppe superficielle riche en hydrogène, on rencontre des couches successives composées d'éléments de masses atomiques croissantes. Celles-ci représentent les produits de chacune des étapes de la nucléosynthèse stellaire étagée en température qui ont ponctué la vie de l'étoile en alternance avec des phases de contraction gravitationnelle I. La chaîne des réactions de fusion qui produisent de l'énergie nucléaire prend fin dès que les derniers atomes de silicium ont été transformés en atomes de fer. A ce moment, le cœur de fer de l'étoile devient tout à fait instable car c'était l'énergie libérée lors des réactions nucléaires qui empêchait l'étoile de s'effondrer sur elle-même II. L'effondrement du noyau de fer est tellement violent que même les répulsions électroniques entre atomes voisins deviennent insuffisantes pour empêcher les noyaux atomiques de se toucher ... ceci conduit bien sûr à la formation d'une étoile à neutrons. Aussitôt, une onde de choc très énergétique rebondit sur l'étoile à neutrons et emporte dans une explosion cataclysmique les couches extérieures de l'étoile. Des vitesses d'expansion de l'ordre de 20.000 km/sec ont été observées dans le spectre de SN 1987A III. Tous les éléments synthétisés au cœur de l'étoile ainsi que d'autres éléments encore plus lourds (Uranium, Cobalt, ec.) formés lors de l'explosion sont ensuite déversés dans le milieu interstellaire IV. Ce milieu, nouvellement enrichi en éléments lourds, donnera naissance à une nouvelle génération d'étoiles. Nous avons indiqué sur la courbe de lumière représentative d'une supernova de type II les différentes phases critiques survenues dans cette seconde classe d'explosions stellaires.

(18) Seules des étoiles encore beaucoup plus massives (30 à 40 masses solaires) seraient capables de subir un tel autre effondrement. Dans ce cas, l'accélération de la pesanteur est si élevée que ni la lumière, ni aucune autre particule matérielle ne peut plus quitter le noyau stellaire superdense... un trou noir a été formé !



◀ Fig. 7 : Profil de raie de type P Cygni. Nous avons reproduit dans le diagramme (a) une portion du spectre de SN 1987A observé le 27 février 1987 par J. Danziger et R. Fosbury avec un spectrographe Boller & Chivens attaché au foyer Cassegrain du télescope ESO de 3,6 m à l'Observatoire Européen Austral (cf. « The Messenger » 47, 32). L'intervalle spectral choisi illustre le profil de type P Cygni dû à la raie H α de la série de Balmer de l'atome d'hydrogène.

Un profil de raie de type P Cygni est généralement formé d'une composante centrale en émission (cf. les contributions 1 + 2 + 5 et 3 + 4 représentées en (b)) flanquée sur son aile bleue par une composante en absorption (contribution 5' en (b)). La formation d'un tel profil de raie résulte essentiellement de la redistribution en longueurs d'onde (λ) des photons émis dans une transition radiative entre deux niveaux atomiques discrets (cf. la longueur d'onde $\lambda = 656,3$ nm pour la raie H α) à la suite d'importants effets Doppler dus aux mouvements d'expansion rapide d'une enveloppe autour d'un objet central (voir le diagramme (c)). Ainsi, les photons émis par les atomes d'hydrogène qui s'approchent d'un observateur distant (cf. les régions 1, 2 et 5 représentées en (c)) donnent lieu à la formation de la composante bleue en émission. De même, l'émission de photons par les atomes qui s'éloignent de l'observateur (cf. les régions 3 et 4 en (c)) rendent compte de la composante rouge en émission. Enfin, l'absorption du continuum F_c émis par la photosphère de la supernova par les atomes situés entre le disque stellaire et l'observateur (voir la région 5 en (c)) donne naturellement lieu à la formation d'une composante en absorption décalée vers les courtes longueurs d'onde.

Nous avons aussi indiqué dans le diagramme (a) l'intervalle de longueurs d'onde qui correspond à des mouvements Doppler de l'enveloppe en expansion équivalent à 10.000 km/sec. En divisant par deux la largeur Doppler totale du profil observé, on peut ainsi déduire que les mouvements d'expansion de l'enveloppe autour de SN 1987A étaient supérieurs à 18.000 km/sec le 27 février 1987. Une analyse plus approfondie des profils de raies de type P Cygni observées dans le spectre de SN 1987A devrait permettre de déduire les variations du taux de perte de masse au cours du temps, les conditions physiques (température et densité) régnant au sein de l'enveloppe en expansion, la distribution du champ de vitesse et bien d'autres paramètres physiques.

Cette détection de profils de raies de type P Cygni (20) (voir Figure 7) correspond bien sûr au balayage foudroyant de la couche extérieure d'hydrogène par le passage de l'onde de choc énergétique. Des astrophysiciens pensent que d'ici quelques mois, l'enveloppe d'hydrogène en expansion rapide pourrait atteindre de telles dimensions qu'on devrait la résoudre spatialement au moyen de grands télescopes optiques travaillant dans des conditions optimales de turbulence.

Avant de terminer ce paragraphe, mentionnons encore que si les observations optiques

(20) Ce type de profil de raie a été principalement étudié dans le spectre de l'étoile P Cygni, une ancienne nova (XVII^e) qui subit encore aujourd'hui d'importantes pertes de matière.

de SN 1987A sont en bon accord avec les caractéristiques spectrales d'une supernova de type II, des spectres enregistrés dans l'ultraviolet lointain au moyen du satellite IUE (9) ont montré que SN 1987A ressemblait à la fin du mois de février davantage à une supernova de type I que de type II. SN 1987A est donc une supernova quelque peu exotique pour laquelle de très nombreux chercheurs s'efforcent de reconstituer le puzzle.

SN 1987A, une « sonde » aux portes de notre Galaxie

Avec une magnitude visuelle de 4 à 4,5, SN 1987A apparaît aujourd'hui comme étant l'objet le plus brillant du GNM. Il est près de 10.000 fois plus lumineux que les autres étoiles les plus brillantes du Nuage... on peut même dire que SN 1987A est l'objet extragalactique le plus brillant à jamais avoir été observé aussi près de notre Galaxie (voir Figure 1). La supernova du GNM constitue donc un objet de tout premier choix afin d'étudier les structures physique et dynamique des nuages de matière interstellaire et intergalactique situés le long d'une ligne de visée, longue de 165.000 AL. De nombreuses raies en absorption formées dans le milieu interstellaire du GNM et de notre Galaxie, dans le halo de notre Galaxie et dans l'espace intergalactique ont déjà été détectées dans des spectres à haute résolution obtenus au moyen du satellite IUE (9) et du spectrographe coude échelle associé au télescope CAT de l'Observatoire Européen Austral (4). Ainsi, six composantes multiples d'une même raie de magnésium (MgI) et d'autres dues au nickel (NiII), au zinc (ZnII) et au silicium (SiIV) ont été identifiées dans le spectre ultraviolet du SN 1987A. Plus de 22 composantes en absorption dues au calcium (CaII), 13 composantes associées au sodium (NaI) et 2 au potassium (KI) ont été mesurées dans les spectres couvrant le domaine visible avec une résolution record de 100.000.

La brillance de SN 1987A devrait aussi permettre la détection de raies en absorption très faibles dues à des isotopes traceurs dont les abondances sont d'origine cosmologique (21) (cf. ⁷Li) ou liées à l'évolution chimique de notre Galaxie (cf. le rapport ¹³C/¹²C). Bien que de telles études aient été effectuées pour les régions proches de notre système solaire ($\lesssim 300$ AL), l'apparition de SN 1987A permettra d'étendre celles-ci aux frontières de notre Galaxie, voire même au GNM. Ce dernier point est particulièrement intéressant car on pense que le GNM est chimiquement beaucoup plus jeune que notre Galaxie.

(21) De telles observations pourraient donc servir à contraindre les modèles théoriques qui décrivent les toutes premières phases de formation de notre Univers.

couches extérieures de l'étoile, riches d'abord en éléments tels que le silicium..., l'aluminium, etc. et finalement, l'hydrogène. On pense que c'est lors du passage de l'onde de choc dans les couches extérieures les plus profondes qu'apparaissent des températures et pressions tellement élevées que les éléments les plus lourds (19) - l'uranium et les transuraniens y compris - peuvent se former. Il semble d'ailleurs que la partie de la courbe de lumière qui suit le maximum de luminosité d'une supernova soit en partie contrôlée par les énormes quantités d'énergie libérées lors de la désintégration d'éléments lourds très instables - cf. les isotopes du nickel et du cobalt - synthétisés dans les toutes premières phases de l'explosion.

Il est très important de signaler que des mouvements d'éjection de matière atteignant des vitesses supérieures à 20.000 km/sec ont été mesurés pour les raies d'hydrogène de la série de Balmer dans le spectre de SN 1987A.

(19) A l'exception de l'hydrogène et dans une certaine mesure l'hélium qui sont le résultat d'une nucléosynthèse primordiale, il n'y a aucun doute que la plupart des autres éléments (tels que le calcium de nos os, le fer de notre hémoglobine, l'oxygène que nous respirons, l'iode de l'air marin, etc.) ont été fabriqués il y a plusieurs milliards d'années au cœur d'étoiles proches, réduites aujourd'hui au stade de naines blanches. Cependant d'autres éléments plus rares, tels que l'or des bijoux que nous portons, l'uranium de nos réacteurs nucléaires, le cobalt utilisé en médecine thérapeutique, etc., doivent avoir été synthétisés lors de l'explosion proche d'une - ou plusieurs - supernovae. Dans ce contexte, le Soleil apparaît comme étant une étoile de deuxième ou troisième génération, née comme chacun de nous, des cendres d'une supernova. Il est d'ailleurs tout à fait probable que l'onde de choc produite par le gaz et la poussière interstellaire comprimés de la supernova ont entraîné la condensation de notre propre système solaire.

SN 1987A ... et une estimation de l'âge de notre Univers

Si nous nous imaginions un instant que tous les marins du globe emportent avec eux sur leur navire une bougie allumée, nous pourrions facilement concevoir qu'un observateur se trouvant sur une côte puisse estimer la distance de n'importe quel navire visible au-dessus de l'horizon. Ainsi, si une des bougies visées apparaissait être un million de fois plus faible qu'une autre située à une distance standard, par exemple, de 1 m, l'observateur concluerait que le bateau observé se trouve à une distance de 1 km (22). En procédant exactement de la même façon, les astrophysiciens parviennent à déterminer la distance de galaxies et de quasars très éloignés. Pour ce faire, ils s'arment de patience et tentent de repérer par exemple l'explosion d'une supernova au sein de ces galaxies et/ou quasars. La bougie est représentée dans cet exemple par le maximum de luminosité de la supernova observée. Toutefois, de sérieux désaccords existent sur la valeur à adopter pour la luminosité absolue (23) du maximum de lumière d'une supernova de type I et de type II. Etant donné que la distance qui nous sépare de SN 1987A est déterminée avec une précision relative meilleure que 10 %, on pourra calculer la luminosité absolue de cette bougie standard dès que l'on connaîtra son éclat apparent au maximum de luminosité. En se servant d'observations précédentes ou futures de supernovae de type II dans des galaxies ou des quasars pour lesquels il est possible de mesurer leur vitesse de récession, nous pourrions déterminer la valeur actuelle du taux d'expansion de l'Univers, c'est-à-dire fixer la valeur de la constante de Hubble H_0 . Si, par exemple, la valeur trouvée est $H_0 = 50 \text{ km/sec/Mpc}$, on déduit facilement que suite à l'expansion de l'Univers, le temps mis par une galaxie pour parcourir une distance de 1 Mpc (24) à la vitesse de 50 km/sec vaut approximativement 19,5 milliards d'années.

A cause de l'action des forces mutuelles d'attraction gravifique, les vitesses relatives de récession des galaxies n'ont pu que diminuer depuis l'explosion initiale de l'Univers (le Big Bang). Le temps réel de parcours calculé ci-dessus consiste donc en une limite supérieure de l'âge de notre Univers. On peut ainsi comprendre comment la détermination de la luminosité absolue du maximum de lumière de SN 1987A pourra servir à mieux contraindre l'âge de notre Monde (25). En utilisant la loi de Hubble qui lie la distance

(22) En représentant par B_1 et B_2 l'éclat des bougies respectivement situées à des distances d_1 et d_2 , on trouve évidemment que $B_2/B_1 = (d_1/d_2)^2$ et par conséquent $d_2 = \sqrt{B_1/B_2} \cdot d_1$.

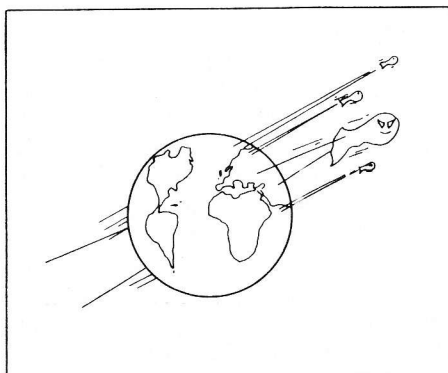
(23) C'est-à-dire la luminosité du maximum de lumière d'un tel objet se trouvant à une distance standard de 10 parsecs (1 parsec = 3,262 AL).

(24) 1 Mpc = 1.000.000 parsecs = 3.262.000 AL.

d'un objet participant à l'expansion de l'Univers à sa vitesse de récession, on pourra dès lors aussi revoir toutes les distances aux innombrables galaxies et quasars pour lesquels aucune supernova n'a encore été observée... mais pour lesquels une simple mesure du « redshift » ou décalage vers le rouge a été effectuée (26).

A l'affût de neutrinos en provenance de SN 1987A

Le neutrino est une particule élémentaire émise par des noyaux atomiques lors de désintégrations radioactives de type β . C'est donc une particule qui est sensible à la force faible... mais à aucune autre force. Etant donné que seule la force faible peut le faire entrer en collision avec d'autres particules, le neutrino possède une très faible probabilité d'interagir avec la matière. Ainsi des neutrinos traversent sans cesse notre corps et même la Terre toute entière sans presque jamais s'en rendre compte (voir Figure 8). Jusqu'à ce jour, on ne sait pas non plus si les neutrinos possèdent une masse au repos. C'est à juste titre que les neutrinos ont été appelés « particules fantomatiques ».



▲ Fig. 8 : Des particules élémentaires fantomatiques : les neutrinos.

Le 23 février 1987 vers 7h35m TU, chacun de nous a été traversé par approximativement un million de milliards de neutrinos en provenance de l'explosion de SN 1987A. Toutefois, il est vraisemblable qu'un seul des neutrinos parmi tous ceux qui sont passés au travers d'un millier d'individus ait eu quelque chance d'interagir avec un des noyaux de nos corps humains. On comprend dès lors aisément que la plupart de ces particules fantomatiques aient aussi pu traverser la Terre sans s'en rendre compte. Pour comparaison, le nombre de neutrinos solaires qui nous traversent chaque seconde est d'environ cent mille milliards !

(25) Dans une Circulaire Astronomique de l'UAI publiée le 7 mars 1987, de Vaucouleurs estime que SN 1987A est une supernova de type II présentant actuellement un prémaximum de lumière. Il ajoute que celui-ci sera suivi d'un maximum de luminosité atteignant une magnitude visuelle apparente $m_v \approx 2,5 \text{ mag}$. si la constante de Hubble vaut 100 km/sec/Mpc, correspondant à un âge maximum de l'Univers $T \approx 10$ milliards d'années

et $m_v \approx 1,0 \text{ mag}$. si la constante de Hubble vaut 50 km/sec/Mpc, correspondant à $T \approx 20$ milliards d'années.

(26) cf. *Ciel et Terre*, Vol. 100, p. 153, 1984.

Bien que les neutrinos aient d'abord été mis en évidence expérimentalement au sein de grands réacteurs nucléaires construits par l'homme, l'intérieur de notre Soleil en produit d'énormes quantités (27) au cours des réactions de fusion d'éléments légers en éléments lourds (15). La détection et la mesure du flux de neutrinos solaires qui parvient sur terre devraient nous permettre en principe de dresser une véritable cartographie des régions centrales (28) du Soleil et aussi de quantifier les processus physiques qui s'y déroulent. Toutefois, ces mesures sont très difficiles à réaliser à cause de la très petite section efficace d'interaction des neutrinos avec la matière. Raymond Davis Jr. a été un des premiers physiciens à avoir estimé le flux des neutrinos solaires. Pour ce faire, Davis s'est servi d'un grand réservoir enfoui au fond d'une mine d'or, contenant plus de 400 m³ d'un composé chloré qui réagit environ une fois par semaine avec les neutrinos solaires. Le flux calculé à partir de ces rares détections, et confirmé par d'autres expériences indépendantes, présente une déficience notable de neutrinos par rapport aux prédictions théoriques. Afin d'expliquer pourquoi on détecte beaucoup moins de neutrinos solaires que prédit, des explications très audacieuses ont été avancées par des physiciens des particules élémentaires : certains aiment penser que les neutrinos oscillent entre différents états, d'autres prétendent que les neutrinos sont des particules instables et que celles-ci se désintègrent en des laps de temps inférieurs à celui que met la lumière pour voyager du Soleil à la Terre. Comme nous allons le voir, la détection récente de neutrinos extragalactiques en provenance de SN 1987A devrait permettre de mieux guider les excès d'une pensée parfois très imaginative.

Il a déjà été mentionné précédemment (16) qu'une émission intense de neutrinos aurait dû avoir lieu au moment très précis de la « neutronisation » du précurseur de SN 1987A. Or il se fait qu'une équipe de physiciens italo-soviétiques travaillant à l'Observatoire Neutrino du Mont-Blanc ont enregistré le passage de 5 neutrinos en provenance de SN 1987A. Cette détection a eu lieu le 23 février 1987 pendant une durée de 7 secondes à partir de 2h52m37s TU (cf. Figure 4) et la probabilité que cet événement soit dû au hasard a été évaluée à un effet de chance possible se présentant une fois tous les 10.000 ans (29). Il est toutefois malheureux de constater qu'aucune autre détection simultanée de neutrinos extragalactiques par

(27) On estime qu'environ 3 pourcent de l'énergie solaire est émise sous forme de neutrinos.

(28) Ces régions sont tout à fait opaques et inaccessibles dans le domaine des radiations électromagnétiques γ , X, UV, visible, IR, radio, etc.

(29) cf. les Circulaires astronomiques de l'UAI nos 4323 (28 février 1987) et 4332 (6 mars 1987).

des appareillages plus performants situés aux quatre coins de la terre n'ait été annoncée. Mais un autre fait exceptionnel est apparu ! Une observation de 11 neutrinos en provenance de SN 1987A a eu lieu le 23 février 1987 au sein d'un des plus grands détecteurs situé dans la mine de zinc de Kamioka, à l'ouest du Japon (30). Ces événements ont eu lieu aux environs de 7h35m TU pendant un laps de temps de 13 secondes et avec des énergies comprises entre 7,5 et 36 Mev (31). L'Observatoire Neutrino de Irvine - Michigan - Brookhaven (IMB, Ohio), situé dans une mine de sel sous le lac Erié, a confirmé la détection de 8 neutrinos en provenance du GNM, le 23 février 1987 à 7h35m41s TU. La durée d'enregistrement a été de 6 secondes et les énergies mesurées sont comprises entre 20 et 40 Mev (32) (voir Figure 4). John Bahcall et ses collaborateurs ont estimé que l'Observatoire Neutrino du Mont-Blanc a une capacité 25 fois moindre de détecter des neutrinos que celui de Kamiokande II et donc l'absence de détection du passage des neutrinos de 7h35m TU au Mont-Blanc est en parfait accord avec les autres données observationnelles.

Etant donné que les modèles théoriques décrivant la formation d'étoiles à neutrons dans des explosions de supernovae de type II prévoyaient un délai de seulement quelques heures entre le moment d'émission des neutrinos et l'arrivée de l'onde de choc au niveau de la photosphère (33), nous concluons que les détections simultanées de neutrinos en provenance de SN 1987A dans les expériences de Kamiokande II et IMB constituent un véritable succès pour les théories décrivant

(30) Cf. la Circulaire de l'UAI n° 4338 (10 mars 1987).

(31) 1 Mev = 10^6 électron-volts = $1,602 \cdot 10^{-6}$ ergs.

(32) Cf. la Circulaire de l'UAI n° 4340 (11 mars 1987).

(33) Ce moment coïncide bien sûr avec la forte augmentation de luminosité de la supernova.

(34) La dispersion des temps d'arrivée des neutrinos extragalactiques peut être facilement expliquée si on suppose que les neutrinos possèdent une masse au repos. En effet, des neutrinos massifs, s'ils existent, devraient voyager à des vitesses inférieures à la vitesse de la lumière, de telle façon que les temps d'arrivée de neutrinos d'énergies différentes doivent être légèrement différents. En se basant sur cet argument, Bahcall et Glashow ont déduit une limite supérieure de 11 eV pour la masse au repos des neutrinos.

Remarquons qu'il existe aussi une explication plus prosaïque pour rendre compte de la différence entre les temps d'arrivée des différents neutrinos extragalactiques : plutôt que de nous arriver directement du cœur neutronique de la supernova, les neutrinos auraient subi plusieurs diffusions dans des régions très chaudes et très denses de la supernova. La différence des chemins parcourus par les neutrinos expliquerait la dispersion observée pour les temps d'arrivée.

la physique des intérieurs stellaires. L'ensemble de ces observations supporte aussi l'idée que les neutrinos qui nous sont parvenus de la supernova ont nécessairement dû voyager avec des vitesses très proches de celle de la lumière. En accord avec les résultats de la théorie de la relativité restreinte d'Einstein, ceci implique que la masse du neutrino est soit nulle, soit extrêmement petite (34). De plus, on peut certifier que, par rapport à un système de référence lié à l'observateur terrestre, le temps de vie des neutrinos est supérieur à 165.000 ans. La déficience du flux de neutrinos solaires observée à la surface de la Terre ne peut donc être due à un effet de vie trop éphémère de ces particules.

Au vu des résultats qui précèdent, nous concluons que l'astronomie des neutrinos vient de connaître un essor extraordinaire. Il est certain que la mise en place d'Observatoires « neutrino » beaucoup plus sensibles devraient non seulement conduire à une meilleure compréhension de la fin de l'évolution des étoiles massives, mais aussi de celle de notre Univers tout entier (35).

SN 1987A et nos futures espérances

Personne ne peut en fait prévoir avec certitude ce que la supernova du Grand Nuage de Magellan nous réserve pour demain. Explosera-t-elle de nouveau, restera-t-elle une supernova sous-lumineuse ou symbolisera-t-elle un nouveau type de cataclysme stellaire inconnu jusqu'ici ? Pour le savoir des astrophysiciens du monde entier ont mobilisé tous les moyens d'observation existants. Ainsi, de multiples détecteurs de neutrinos et d'ondes gravitationnelles sont en alerte et les satellites Solar Max (36), EXO-

(35) On sait que si les neutrinos s'avéraient être distribués dans l'Univers d'une façon beaucoup plus continue que la matière visible (étoiles, galaxies, amas de galaxies, etc.) et que si la masse - au moins de certaines - de ces particules fantomatiques était supérieure à une valeur critique, notre Univers arrêterait un jour son mouvement d'expansion et s'effondrerait sur lui-même jusqu'au point d'une nouvelle singularité (modèle d'Univers oscillant).

(36) Le satellite Solar Max a été principalement conçu pour l'observation continue du spectre électromagnétique du Soleil.

(37) EXOSAT est un satellite européen construit par l'Agence Spatiale Européenne et observant les rayons X dans le domaine des énergies 0,04-80 keV.

(38) Le satellite astronomique japonais Astro-G (Ginga = « Galaxie ») a été placé sur orbite autour de la Terre le 5 février dernier. Ce satellite, qui est encore dans une phase de test et de calibration intensifs, est pourvu de détecteurs de rayons X et gamma.

(39) La sonde Voyager 2 poursuit en réalité sa course vers les confins du système solaire. Elle devrait passer aux abords de Neptune dans un peu plus de deux ans.

SAT (37) et Ginga (38) restent à l'écoute d'une éventuelle émission de rayons gamma et de rayons X, caractéristiques des vestiges d'une explosion énergétique. Le satellite IUE (9), la sonde spatiale Voyager 2 (39) et la plupart des télescopes optiques de l'hémisphère austral enregistrent de façon quasi continue l'évolution des variations photométriques et spectrales de SN 1987A. Des signaux radio en provenance de SN 1987A ont déjà été captés en Australie et les radioastronomes ont l'espoir de peut-être pouvoir détecter des pulsations radio de très courtes périodes (≤ 1 sec.) émises par un hypothétique pulsar (40) qui se serait formé lors de l'explosion du 23 février. Tout le monde attend, en quelque sorte, la levée du rideau qui devrait coïncider avec le moment où l'enveloppe chaude ($T > 6.000^\circ\text{K}$) en expansion rapide autour de SN 1987A devient suffisamment transparente pour permettre l'identification précise de l'objet très dense qui se cache en son sein.

L'intérêt de l'étude astrophysique de SN 1987A est donc très grand ! Des astrophysiciens belges participent déjà à ces recherches passionnantes et il n'y a aucun doute que de nouveaux résultats spectaculaires seront annoncés très prochainement. Ce sujet d'étude sera aussi très certainement à l'ordre du jour de la « nouvelle maîtrise en astronomie et géophysique » organisée à l'Institut d'Astrophysique de l'Université de Liège à partir de l'année académique 1987-1988 (41).

(40) Un pulsar est une étoile à neutrons fortement magnétisée en rotation très rapide (plus d'un tour par seconde) sur lui-même. Un pulsar est caractérisé par une émission radio engendrée par effet synchrotron. Celui-ci implique l'existence d'électrons rapides qui en se déplaçant en spirales autour des lignes de force du champ magnétique intense émettent ce rayonnement radio. La rotation du pulsar produit une modulation périodique du signal radio de façon analogue à l'effet d'un phare en mer. Vu la très faible taille d'une étoile à neutrons (17), celle-ci ne peut pas être très lumineuse dans le domaine visible. C'est pourquoi les pulsars ne sont détectables par leurs pulsations radio qu'au moyen de grands radiotélescopes.

(41) Des renseignements à ce sujet peuvent être obtenus auprès de Madame Arlette Noels, à l'Institut d'Astrophysique de l'Université de Liège (tél. : 041/52.99.80).

Remerciements

Je remercie très vivement Myriam Macours-Houssonloge, Jacqueline Bosselois et Armand Kransvelt pour la dactylographie du manuscrit et la réalisation des figures qui illustrent cet article. Bravo aussi à l'ESO pour son initiative de diffuser des communiqués de presse accompagnés de belles photographies de façon à bien informer rapidement toute la communauté astronomique. ■