

observée dans le voisinage de la Voie lactée depuis l'invention du télescope, il y a près de quatre siècles.

Les astronomes orientèrent un grand nombre de télescopes optiques de l'hémisphère Sud dans la direction de l'événement qui se déroulait dans le Grand Nuage de Magellan, distant de 163 000 années-lumière. Ils pointèrent aussi des dispositifs sensibles aux infrarouges et aux ondes radio, ainsi que des instruments à bord de sondes spatiales qui enregistrent les rayonnements ultraviolet et X.

Les théoriciens avaient décrit ce type d'explosions grâce à des modèles. À

l'aide de simulations numériques complexes, les chercheurs avaient esquissé comment une étoile massive et vieillissante s'autodétruit : le cœur de l'astre s'effondre pour former soit une boule dense de neutrons – une étoile à neutrons – soit un trou noir, et les couches externes de l'étoile sont expulsées dans le milieu interstellaire, créant un nuage de débris lumineux. L'analyse des observations de la supernova 1987A a confirmé les grandes lignes de ces modèles.

La découverte de la supernova 1987A a éveillé l'intérêt des astronomes, mais aussi celui des physiciens des particules. Ces derniers ont en

L'ESSENTIEL

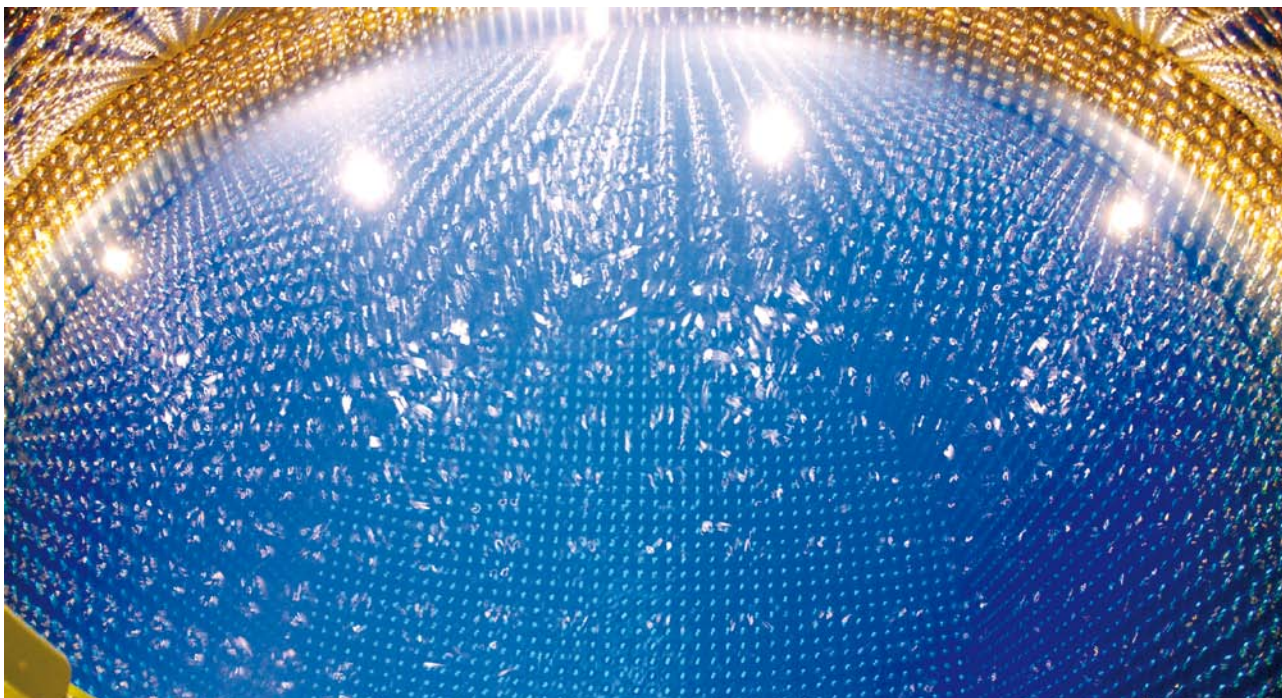
■ Lors de l'explosion d'une étoile en supernova, des photons et des neutrinos sont émis, mais ces derniers sont très difficiles à détecter.

■ En 1987, une vingtaine de neutrinos ont été observés en provenance d'une supernova. Ils ont fourni de précieuses informations sur la fin des étoiles et sur la nature des neutrinos.

■ Les chercheurs guettent la prochaine supernova qui explosera dans la galaxie. Les nouveaux détecteurs capteront des milliers de neutrinos, riches d'enseignement.



1. L'ÉTOILE MASSIVE ETA CARINAE, distante de 7 500 années-lumière et cachée dans un nuage de poussière (à droite et au centre), explosera un jour en supernova. Les astronomes en ont déjà aperçu les prémices en 1843, lorsque cette étoile s'embrasa brièvement.



Kamioka Observatory, Institute for Cosmic Ray Research and University of Tokyo

2. LE DÉTECTEUR SUPER-KAMIOKANDE est situé dans une ancienne mine, au Japon. Sa cuve contient 50 000 tonnes d'eau pure. Un important flux de neutrinos traverse la Terre chaque seconde, mais quelques-uns seulement entrent en collision avec des atomes du liquide, produisant alors un flash lumineux.

effet profité de cette explosion pour étudier les neutrinos, des particules souvent qualifiées de fantomatiques, car elles interagissent très peu avec la matière. La supernova 1987A aurait produit quelque 10^{58} neutrinos, émis dans toutes les directions. Une infime fraction d'entre eux sont arrivés sur Terre et seuls une vingtaine ont pu être détectés. Les physiciens ont montré que ces particules sont riches en informations sur la mort des étoiles et la nature des neutrinos.

Les neutrinos arrivent avant la lumière

Si une telle explosion devait survenir dans la Voie lactée – donc beaucoup plus près que la supernova de 1987 –, un plus grand nombre de neutrinos serait détecté. Leur étude permettrait d'affiner les modèles sur la façon dont une supernova se produit. Mais un tel événement est rare au sein de la Voie lactée. Et il peut survenir à tout moment. Les chasseurs de neutrinos se préparent donc à détecter la prochaine explosion. En outre, ils seront peut-être les premiers à repérer l'événement, bien avant que sa lumière n'atteigne la Terre.

À l'annonce de la découverte de la supernova 1987A, John Bahcall (1934-2005), de l'Institut d'études avancées de Princeton, aux États-Unis, était excité au point d'en perdre le sommeil. Cette observation allait lui permettre de tester l'une de ses idées : il pensait que des signes avant-coureurs de ce cataclysme cosmique, sous la forme de neutrinos, avaient probablement atteint la Terre plusieurs heures avant que les astronomes ne découvrent la supernova à travers leurs télescopes classiques.

D'après les modèles théoriques de l'évolution stellaire, lorsque le cœur de l'étoile massive s'effondre, une quantité gigantesque de neutrinos est produite. Ils emportent près de 99 pour cent de l'énergie de l'explosion. Ces particules s'échappent alors sans encombre de l'étoile, puisqu'ils interagissent rarement avec la matière. Ce n'est pas le cas des photons, qui peuvent mettre des heures, voire des jours, pour s'échapper. Ainsi, les neutrinos quittent la supernova avec une longueur d'avance sur les photons. Ces derniers ne les rattrapent pas avant d'arriver sur Terre, car les neutrinos se déplacent quasiment à la vitesse de la lumière.

À la suite de l'annonce de la découverte de la supernova, Bahcall et deux de ses collègues ont calculé le nombre de neutrinos provenant de l'explosion que les détecteurs sur Terre auraient enregistré avant l'observation de l'événement par les télescopes. Ils ont estimé que quelques dizaines de neutrinos devaient être observés. En moins d'une semaine, ils ont soumis leur résultat à une revue scientifique, afin que leur prévision théorique soit publiée avant que les expérimentateurs n'annoncent leurs résultats d'analyse des données des détecteurs.

L'expérience japonaise *Kamiokande* offrait les meilleures chances de voir les neutrinos de la supernova. Son dispositif consistait en une cuve cylindrique de 16 mètres de hauteur, remplie d'eau pure et entourée de 1 000 phototubes – des détecteurs enregistrant le flash de lumière émis lorsqu'un neutrino interagit avec un atome dans la cuve d'eau.

L'analyse de Bahcall mettait à l'épreuve les modèles décrivant les supernovæ et la physique des neutrinos. L'absence totale de neutrinos dans les données aurait conduit à devoir repenser ces modèles. Or le signal des neutrinos était bien visible dans les don-

nées : les détecteurs de *Kamiokande* avaient enregistré 11 flashes en l'espace de quelques secondes, près de trois heures avant la première observation optique de la supernova au Chili et en Nouvelle-Zélande. De l'autre côté de la planète, un détecteur similaire de neutrinos, IMB (pour Irvine-Michigan-Brookhaven), situé dans une mine de sel sous le lac Érié aux États-Unis, avait enregistré huit flashes au même moment que *Kamiokande*. Plus tard, les chercheurs apprirent qu'une troisième expérience, l'Observatoire de neutrinos à Baksan, dans le Caucase russe, avait détecté cinq neutrinos.

La vingtaine de neutrinos enregistrée n'était qu'une fraction des milliards de milliards de neutrinos ayant traversé la Terre pendant un bref instant et émanant de l'étoile qui a explosé dans le Grand Nuage de Magellan. Un si petit nombre de neutrinos ne semble pas spectaculaire, mais il suffisait pour confirmer les calculs de Bahcall. En outre, la supernova 1987A a été la première source astrophysique de neutrinos étudiée en dehors du Soleil et a conduit à de nombreux résultats. John Beacom, physicien théoricien de l'Université de l'Ohio, souligne que ces neutrinos offrent la possibilité d'étudier l'intérieur des étoiles en fin de vie, ce que les astronomes ne peuvent faire avec les télescopes classiques.

Malgré le faible nombre de neutrinos captés, ceux-ci ont permis de confirmer d'importants aspects de la façon dont une étoile explose. Le nombre et l'énergie des particules correspondaient aux prévisions des modèles. Les physiciens ont, par exemple, exclu des scénarios exotiques où la supernova perd de l'énergie en émettant des particules hypothétiques, nommées axions, ou par des fuites dans des dimensions supplémentaires de l'espace-temps. L'arrivée des neutrinos, étalée sur quelques secondes et non simultanée, indique que les particules ont dû s'échapper d'un petit noyau stellaire dense tel qu'il est décrit dans les modèles.

Les mesures ont par ailleurs fourni des indications sur la nature des neutrinos. En arrivant sur Terre trois heures avant les photons captés par les télescopes, les neutrinos ont voyagé à une vitesse proche de celle de la lumière. Les particules légères se déplaçant plus vite que les particules lourdes, une limite supérieure sur la masse des neutrinos a été établie, égale à 12 électronvolts (en unités d'énergie). Cette masse est si faible que les astrophysiciens ont conclu que, malgré la quantité gigantesque

de neutrinos dans l'Univers, ces particules ne peuvent contribuer de façon prépondérante à la « matière noire », une composante importante de l'Univers dont la nature est inconnue. De plus, quand les médias se sont emballés en 2011 à propos d'une mesure (qui se révéla plus tard erronée) indiquant des neutrinos plus rapides que la lumière, les neutrinos de la supernova fournirent un contre-argument de poids : si les neutrinos se déplaçaient plus vite que la lumière, ils seraient arrivés sur Terre des années, et non quelques heures, avant les photons.

L'espoir d'une explosion stellaire proche

La supernova 1987A a donné un aperçu de ce que les astrophysiciens peuvent apprendre sur l'intérieur des étoiles mourantes. Alex Friedland, du Laboratoire américain de Los Alamos, explique que si 1 000 neutrinos étaient détectés en provenance d'une supernova, on pourrait alors retracer l'ensemble du processus d'explosion et déterminer le destin de l'étoile. De leur côté, les physiciens des particules pourraient étudier le comportement des neutrinos dans des conditions extrêmes qui ne peuvent être reproduites en laboratoire.

Pour observer un tel flux de neutrinos, les chercheurs doivent être témoins d'une supernova se déroulant au sein de la Voie lactée. Aucune supernova n'a été détectée dans la Galaxie depuis celles de 1572 et de 1604, cette dernière ayant été si brillante qu'elle était visible en plein jour. Les observations des vestiges de ces supernovæ suggèrent qu'elles résultent de l'explosion d'une étoile de type naine blanche qui aurait soit absorbé de grandes quantités de matière d'une étoile compagnon, soit fusionné avec une autre naine blanche.

À partir des observations portant sur d'autres galaxies, les astronomes estiment qu'en moyenne, quelques étoiles devraient exploser par siècle au sein de la Voie lactée. Elles ne seraient pas toujours visibles, car la poussière interstellaire absorbe une partie du rayonnement. En revanche, leurs neutrinos arriveraient sur Terre sans obstacle de n'importe où dans la Voie lactée.

Des détecteurs de neutrinos assez sensibles scrutent le ciel depuis 25 ans. Si les estimations sont correctes, une supernova pourrait survenir bientôt dans la Voie lactée. Il ne faut pas manquer cet événement rare, et les physiciens s'y préparent.

■ L'AUTEUR



Ray JAYAWARDHANA occupe la chaire de recherche du Canada en astrophysique

observationnelle et est professeur à l'Université de Toronto.

Cet article est adapté de son livre *Neutrinos Hunters: The Thrilling Chase for a Ghostly Particle to Unlock the Secrets of the Universe*, Scientific American/Farrar, Straus and Giroux, 2013 [© Ray Jayawardhana, 2013].

■ BIBLIOGRAPHIE

M. Hirsch *et al.*, Les neutrinos, messagers de l'inconnu, *Pour la Science*, n° 431, septembre 2013.

W. Hillebrandt, Supernovæ : des explosions énigmatiques, *Pour la Science*, n° 336, octobre 2005.

K. Hirata *et al.*, Observation of a neutrino burst from the supernova SN1987A, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 58, n° 14, pp. 1490-1493, 1987.

J. N. Bahcall *et al.*, Neutrinos from the recent LMC supernova, *Nature*, vol. 326, pp. 135-136, 1987.