

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.

Avec ses collègues, Kate Scholberg, de l'Université Duke, a mis au point le Système d'alerte avancée des supernovæ (SNEWS pour *SuperNova Early Warning System*), un réseau coordonné de détecteurs de neutrinos et d'observatoires qui transmet rapidement un signal quand une explosion d'étoile est repérée dans la Galaxie. Toutes les expériences capables de détecter les neutrinos provenant d'une supernova – telles que *IceCube* en Antarctique, *LVD* et *Borexino* en Italie, et la version améliorée et plus volumineuse de *Kamiokande*, *Super-Kamiokande*, au Japon – sont reliées à un centre informatique au Laboratoire américain de Brookhaven. Si plusieurs détecteurs de neutrinos mesurent un signal en même temps, il y a de grandes

chances qu'une supernova ait explosé dans le voisinage galactique.

Si l'intervalle de temps entre les signaux émis par deux détecteurs est inférieur à dix secondes, le système SNEWS transmet une alerte aux autres observatoires dans le monde. K. Scholberg et ses collègues espèrent ainsi que les télescopes terrestres ou spatiaux pourront enregistrer le rayonnement électromagnétique – la lumière visible, les ondes radio ou les rayons X – de la supernova le plus tôt possible, et ainsi suivre les tout premiers instants du processus. Avec un grand nombre de personnes mobilisées pour regarder dans un maximum de directions, les chances d'observer le début de l'explosion augmentent.

Les détecteurs de neutrinos mesureront le nombre de particules, leur énergie et l'évolution de ces grandeurs au cours du temps. À l'aide de ces informations sur le déroulement de l'explosion, les physiciens pourront par exemple déterminer si l'effondrement du cœur de l'étoile forme soit un trou noir, d'où rien – pas même les neutrinos – ne s'échappe, soit une étoile à neutrons. Si un trou noir apparaît, le flux de neutrinos devrait s'interrompre brutalement. Si une étoile à neutrons est le produit final, les résidus de l'étoile continuent d'émettre des neutrinos pendant une dizaine de secondes, le temps que la matière se refroidisse. Le flux de neutrinos décroîtrait progressivement au lieu de s'arrêter d'un coup.

Une supernova galactique fournirait aussi des informations sur les caractéristiques intrinsèques des neutrinos. Par exemple, les physiciens sont confrontés au problème de la « hiérarchie des masses des neutrinos ». Il existe trois types de neutrinos, de masses différentes. Or les expériences actuelles ne permettent pas de mesurer directement ces masses, mais seulement leurs différences. Si l'on veut classer les neutrinos par masse croissante, deux configurations sont possibles (voir l'encadré ci-contre). Les neutrinos d'une supernova permettront de préciser quelle hiérarchie est la bonne.

Des neutrinos au comportement exotique ?

Par ailleurs, au cœur d'une supernova, la densité de neutrinos est si élevée que ces particules pourraient interagir, alors qu'elles s'ignorent totalement dans les conditions usuelles. Les neutrinos pourraient alors manifester des comportements exotiques tels que des « oscillations » collectives dont la compréhension est encore incomplète. Les observations pourraient aussi fournir des indices sur ce qui se cache au-delà du modèle standard décrivant les particules élémentaires et leurs interactions.

Parmi les expériences opérationnelles aujourd'hui, *Super-Kamiokande* pourrait détecter plusieurs milliers de neutrinos provenant d'une supernova explosant au centre de la Galaxie, à environ 25 000 années-lumière de nous. À partir d'un tel flux, les physiciens seront capables d'estimer la direction d'où viennent les neutrinos

La hiérarchie des masses des neutrinos

Le modèle standard comprend trois types, ou saveurs, de neutrinos : neutrino électronique (ν_e), neutrino muonique (ν_μ), neutrino tauique (ν_τ). Ces saveurs caractérisent leur interaction avec la matière.

Mais quelle masse est celle de ces particules ? Le flux de neutrinos d'une supernova dans la Galaxie apporterait sur cette question des informations précieuses.

Dans les tout premiers instants de la supernova, le flux est dominé par des neutrinos électroniques issus de la conversion des protons en neutrons, lors de la formation de l'étoile à neutrons.

Si les neutrinos avaient une masse nulle, la composition du flux resterait identique. Or les physiciens ont découvert que les neutrinos subissent un processus d'oscillation d'une saveur à

l'autre, qui n'est possible que si les neutrinos sont dotés d'une masse (qui est très faible).

La théorie décrit les neutrinos soit par les trois saveurs, via ce qu'on nomme les états propres d'interaction, soit par trois états propres dits de masse, notés 1, 2, 3, qui sont associés aux masses physiques de ces particules. Un état de masse est une superposition quantique – un mélange – des trois états d'interaction, et inversement.

Des observations ont mis en évidence le phénomène d'oscillation des neutrinos,

confirmant que ceux-ci ont une masse non nulle. Mais ces expériences ne mesurent que les différences des carrés des masses ($7,6 \times 10^{-5}$ électronvolt carré entre les états 1 et 2 ; $2,4 \times 10^{-3}$ électronvolt carré entre les états 2 et 3).

Pour connaître le signe de ces différences, les physiciens profitent du fait que lorsque les neutrinos se propagent dans une matière dense, les probabilités d'oscillations et donc les flux de neutrinos changent. L'observation des neutrinos solaires a permis de déduire que la masse du neutrino ν_2 est supérieure à celle de ν_1 , mais il faut des densités plus élevées (telles que celles qu'on trouve dans une supernova) pour mesurer le signe de la différence avec le neutrino ν_3 , ce qui donnerait la hiérarchie complète parmi les deux possibles (voir la figure), autrement dit, cela préciserait si le neutrino électronique contribue surtout à l'état le plus léger (à gauche) ou à un des plus lourds (à droite).

– Pasquale Dario Serpico
LAPTH, CNRS

