

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 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).

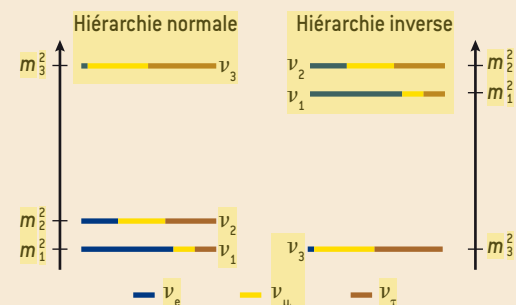
La théorie décrit les neutrinos soit par les trois saveurs, via ce qu'on nomme les états propres d'interaction, soit par trois états propres dits de masse, notés 1, 2, 3, qui sont associés aux masses physiques de ces particules. Un état de masse est une superposition quantique – un mélange – des trois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

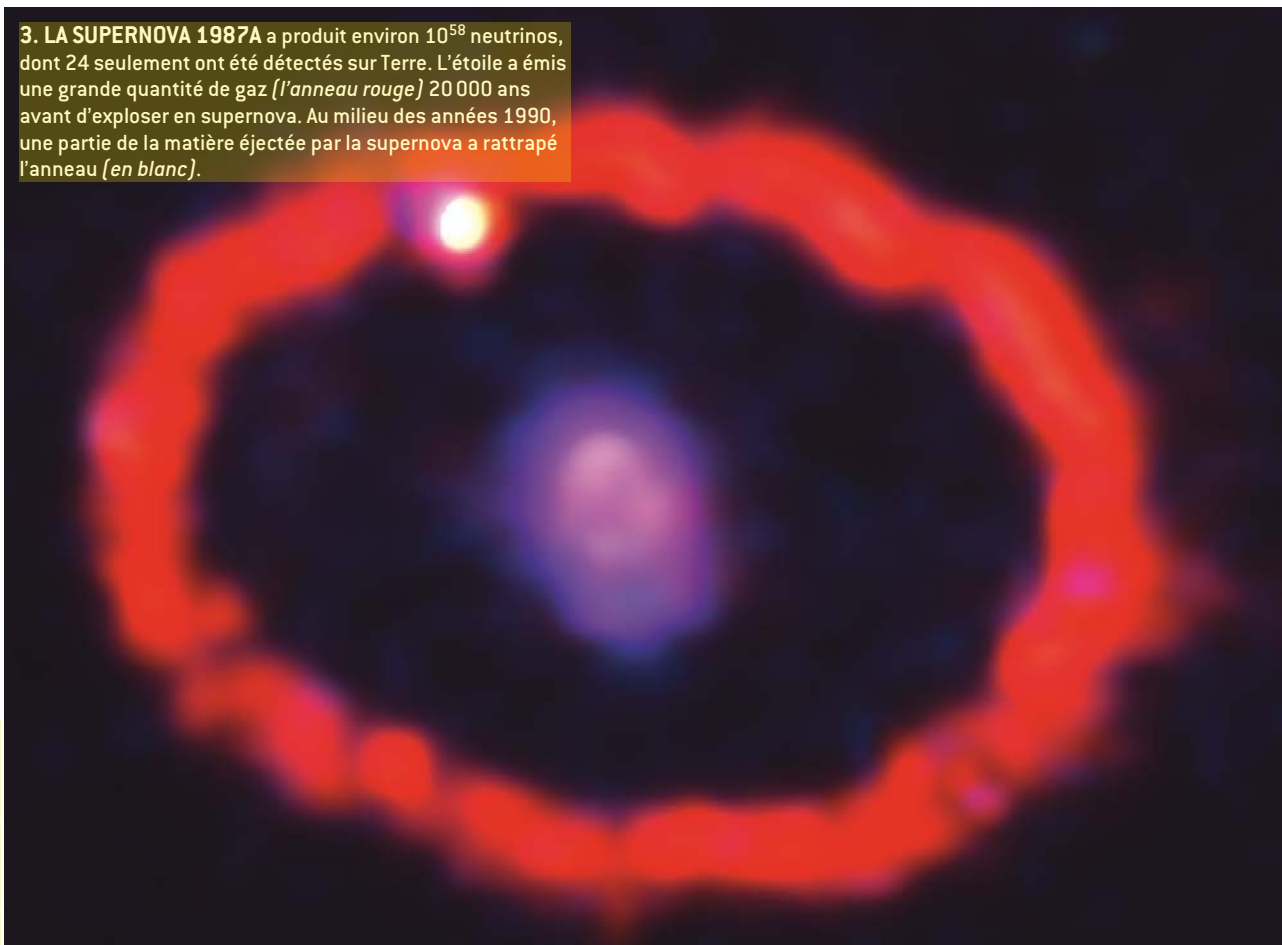
Pour connaître le signe de ces différences, les physiciens profitent du fait que lorsque les neutrinos se propagent dans une matière dense, les probabilités d'oscillations et donc les flux de neutrinos changent. L'observation des neutrinos solaires a permis de déduire que la masse du neutrino ν_2 est 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



3. LA SUPERNOVA 1987A a produit environ 10^{58} neutrinos, dont 24 seulement ont été détectés sur Terre. L'étoile a émis une grande quantité de gaz (*l'anneau rouge*) 20 000 ans avant d'exploser en supernova. Au milieu des années 1990, une partie de la matière éjectée par la supernova a rattrapé l'anneau (*en blanc*).

Center for Astrophysics, Harvard University



à quelques degrés près, limitant ainsi la zone du ciel à scruter avec les télescopes à une aire à peine plus étendue que celle de la pleine Lune.

L'expérience *IceCube*, qui pourrait enregistrer un million de neutrinos, serait la plus performante pour analyser l'évolution du flux de particules au cours du temps. Francis Halzen, de l'Université du Wisconsin à Madison (États-Unis) et à la tête de l'expérience *IceCube*, précise que le dispositif sera capable de reconstruire l'intégralité du flux d'une durée de dix secondes avec une mesure toutes les quelques millisecondes. Les physiciens pourront ainsi déterminer avec une grande précision le moment où se forme l'étoile à neutrons ou le trou noir.

Cependant, les détecteurs actuels ne sont sensibles qu'à un seul type de particules provenant des supernovæ, l'antineutrino électronique (le neutrino et son antiparticule, l'antineutrino, existent sous trois « saveurs » : électronique, muonique et tauique). L'observation d'un seul type de neutrinos revient à prendre une photographie avec un filtre monochromatique.

L'image composée de toutes les couleurs serait beaucoup plus intéressante. Ainsi, pour enrichir la palette des neutrinos détectables, K. Scholberg et des chercheurs canadiens construisent le dispositif HALO (pour *Helium and Lead Observatory*, Observatoire à l'hélium et au plomb) à SNOLAB dans l'Ontario. Le matériau de détection est constitué de 76 tonnes de plomb, ce qui confère à HALO une sensibilité aux neutrinos électroniques. Comme l'expérience est de taille modeste, seule une supernova dans la moitié la plus proche de la galaxie lui sera visible.

D'ici quelques années... ou quelques décennies

Les perspectives sont passionnantes, mais elles ne se concrétiseront que lors de l'effondrement d'un cœur stellaire en supernova dans le voisinage galactique.

Le flux de neutrinos en provenance d'une supernova extérieure à la Voie lactée n'apporterait que très peu d'informations. Par exemple, *Super-Kamiokande* ne détec-

terait qu'une poignée de neutrinos d'une supernova née dans la galaxie d'Andromède, la galaxie de taille comparable à la Voie lactée et qui en est la plus proche, à quelque 2,5 millions d'années-lumière.

S'il est certain que des étoiles vieillissantes, telles Bételgeuse ou Eta Carinae, exploseront dans un futur proche, il est impossible d'être plus précis. Dans ce domaine, le « futur proche » peut correspondre à plusieurs centaines de milliers d'années.

Mais la Voie lactée est peuplée d'un très grand nombre d'étoiles et les chances sont grandes que l'une d'elles explose dans les prochaines décennies. A. Friedland me confiait que s'il devait parier sur ce qui arriverait en premier, une supernova dans la Galaxie ou la construction d'un accélérateur de particules aux États-Unis, il miserait sur l'explosion d'une étoile. Et même si celle-ci est trop éloignée pour que sa lumière nous parvienne, ses neutrinos brilleront intensément dans les détecteurs, un moment qui sera historique pour tous les chercheurs de neutrinos. ■