

L'information scientifique de référence maintenant sur tablette et smartphone !



Téléchargez gratuitement
l'application sur App Store et Google Play.
et feuillotez gratuitement le numéro en cours.



Avec l'application « Pour la Science », retrouvez dès leur sortie le mensuel *Pour la Science* à 4,49 € et son trimestriel *Dossier Pour la Science* à 5,49 € en version numérique optimisée pour tablette : lecture intuitive, sommaire interactif, contenus enrichis, feuilletage hors connexion, etc.

Disponible sur
App Store

DISPONIBLE SUR
Google play



Flashez ce QR code
avec votre mobile
ou votre tablette
pour télécharger
immédiatement
l'application.



Découvrez aussi l'application « Cerveau & Psycho » pour retrouver
le magazine *Cerveau & Psycho* et son trimestriel *L'Essentiel Cerveau & Psycho*

Dans l'attente de la prochaine supernova galactique

Ray Jayawardhana

Quand une étoile explose en supernova, beaucoup de neutrinos, particules difficiles à détecter, sont émis. Les astrophysiciens espèrent capter ceux d'une supernova proche pour mieux comprendre la mort des étoiles.



Au petit matin du 24 février 1987, à l'Observatoire de Las Campanas, au Chili, Ian Shelton, astronome de l'Université de Toronto, développait sa dernière plaque photographique de la nuit avant d'aller se coucher. Il avait passé la nuit à observer et photographier – avec un temps d'exposition de trois heures – le Grand Nuage de Magellan, une galaxie satellite de la Voie lactée. Alors qu'il retirait la plaque photographique du bain révélateur pour s'assurer que l'image apparaissait correctement, quelque chose attira son regard : un point lumineux anormal à côté de la nébuleuse de la Tarentule, ainsi nommée à cause de sa forme qui évoque une araignée. Était-ce juste un défaut dans la plaque ? Pour s'en assurer, I. Shelton sortit de la coupole qui abrite le télescope afin d'observer à l'œil nu le ciel, limpide dans l'air sec de cette région montagneuse. Dans le Grand Nuage de Magellan, il vit une étoile brillante qui était absente la veille. Il s'empressa de partager sa découverte avec ses collègues dans un autre bâtiment de l'Observatoire.

I. Shelton discutait de l'apparition de cette nouvelle étoile avec les astronomes Barry Madore et William Kunkel lorsque l'ingénieur chilien Oscar Duhalde signala qu'il avait vu l'étoile quelques heures plus tôt, alors qu'il était sorti pour prendre l'air. Tous les quatre parvinrent à la conclusion qu'il s'agissait d'une supernova, un phénomène correspondant à l'explosion d'une étoile, qui peut briller plus qu'un million de soleils durant plusieurs mois. Aucun autre objet astronomique n'était capable de changer aussi rapidement de luminosité : indiscernable la veille, visible à l'œil nu le lendemain. I. Shelton et O. Duhalde avaient ainsi découvert une supernova dans une galaxie satellite de la Voie lactée.

Quelques heures plus tard, le phénomène était observé par un astronome amateur en Nouvelle-Zélande. Avertis les uns après les autres, les astrophysiciens, partout sur la planète, accueillirent avec enthousiasme la découverte, car la « supernova 1987A », comme on l'a nommée, était la première supernova

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

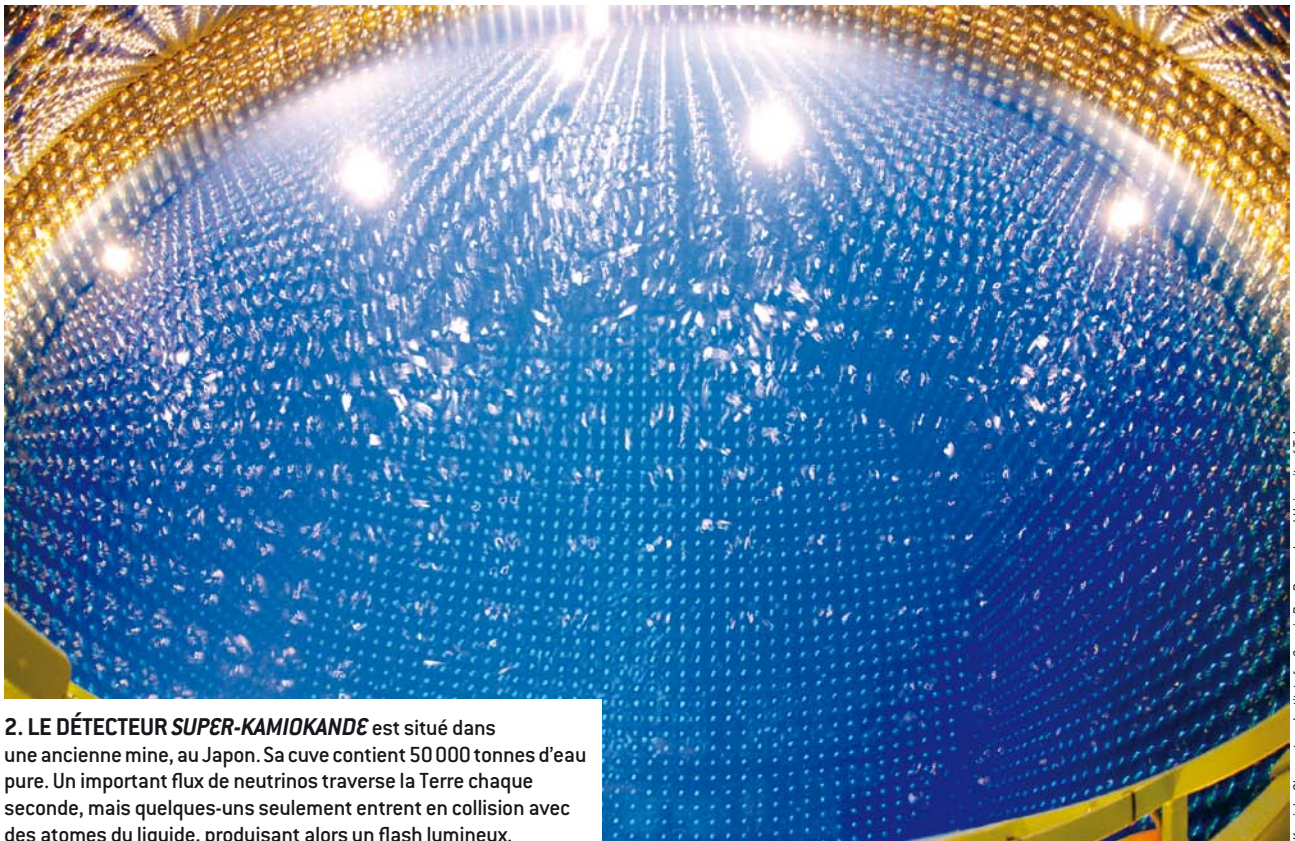
■ Lors de l'explosion d'une étoile en supernova, des photons et des neutrinos sont émis, mais ces derniers sont très difficiles à détecter.

■ 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.

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).

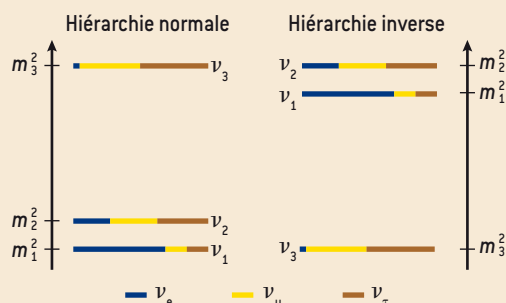
La théorie décrit les neutrinos soit par les trois saveurs, via ce qu'on nomme les états propres d'interaction, soit par trois états propres dits de masse, notés 1, 2, 3, qui sont associés aux masses physiques de ces particules. Un état de masse est une superposition quantique – un mélange – des trois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

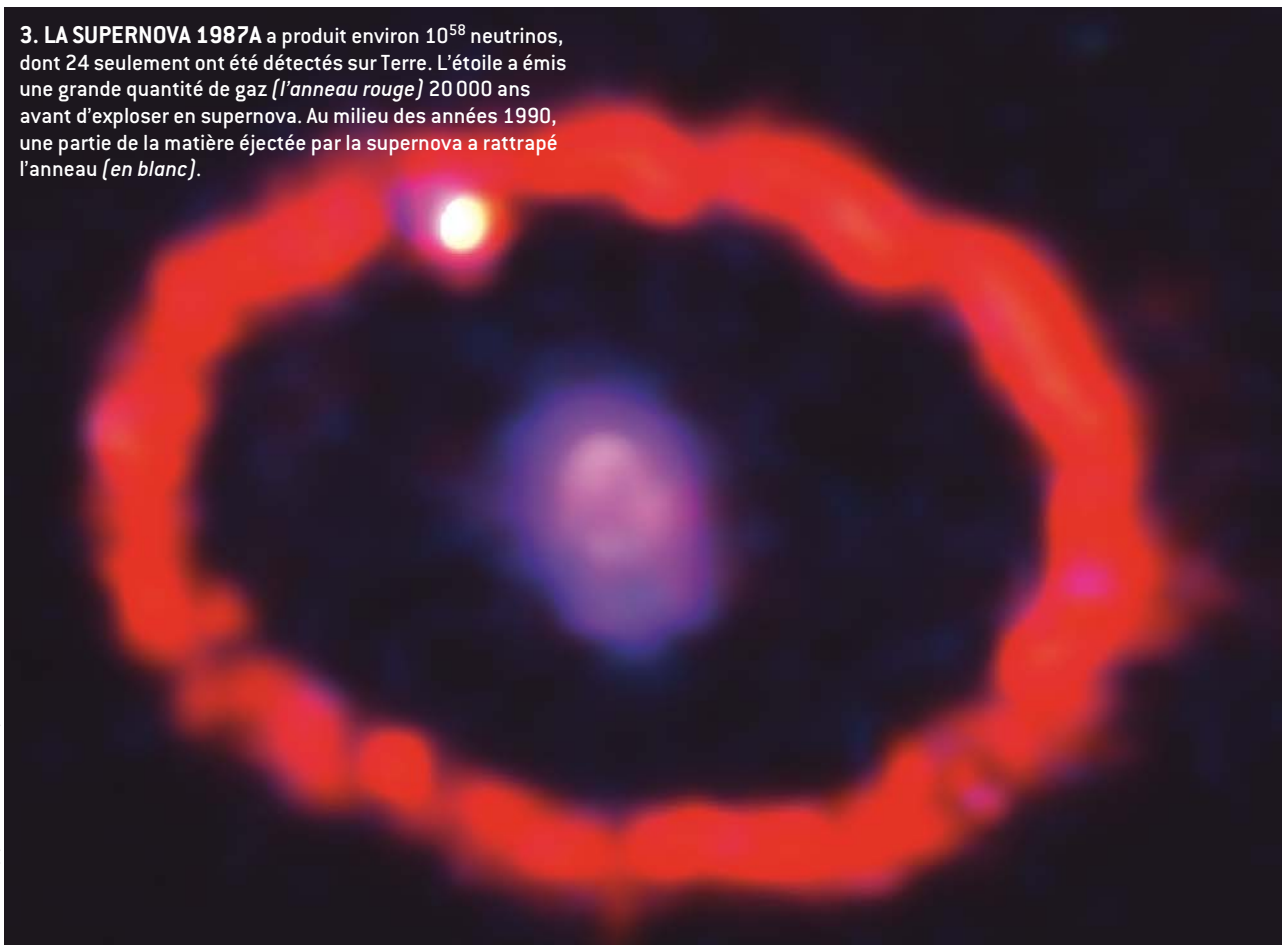
Pour connaître le signe de ces différences, les physiciens profitent du fait que lorsque les neutrinos se propagent dans une matière dense, les probabilités d'oscillations et donc les flux de neutrinos changent. L'observation des neutrinos solaires a permis de déduire que la masse du neutrino ν_2 est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

Traquer des fossiles au GPS

Robert Anemone et Charles Emerson

Jusqu'à présent, la chance était le principal auxiliaire des prospecteurs de fossiles. Avec la mise au point d'une méthode de recherche des gisements de fossiles par satellite, la géolocalisation pourrait prendre le relais.