

Des neutrinos pour mieux voir

Graciela Gelmini, Alexander Kusenko et Thomas Weiler

Les neutrinos ne sont plus seulement des objets étranges de la physique fondamentale.

Ces particules fantomatiques deviennent partie intégrante des outils de l'astronomie.

L'ESSENTIEL

✓ Les neutrinos traversent très facilement la matière et peuvent révéler le cœur des étoiles ou d'autres lieux extraordinaires du cosmos qui nous sont, autrement, cachés.

✓ Cette propriété de passe-muraille signifie aussi que les neutrinos sont très difficiles à détecter. Cela fait moins d'un an que les instruments sont assez sensibles pour détecter sans équivoque des sources cosmiques de neutrinos.

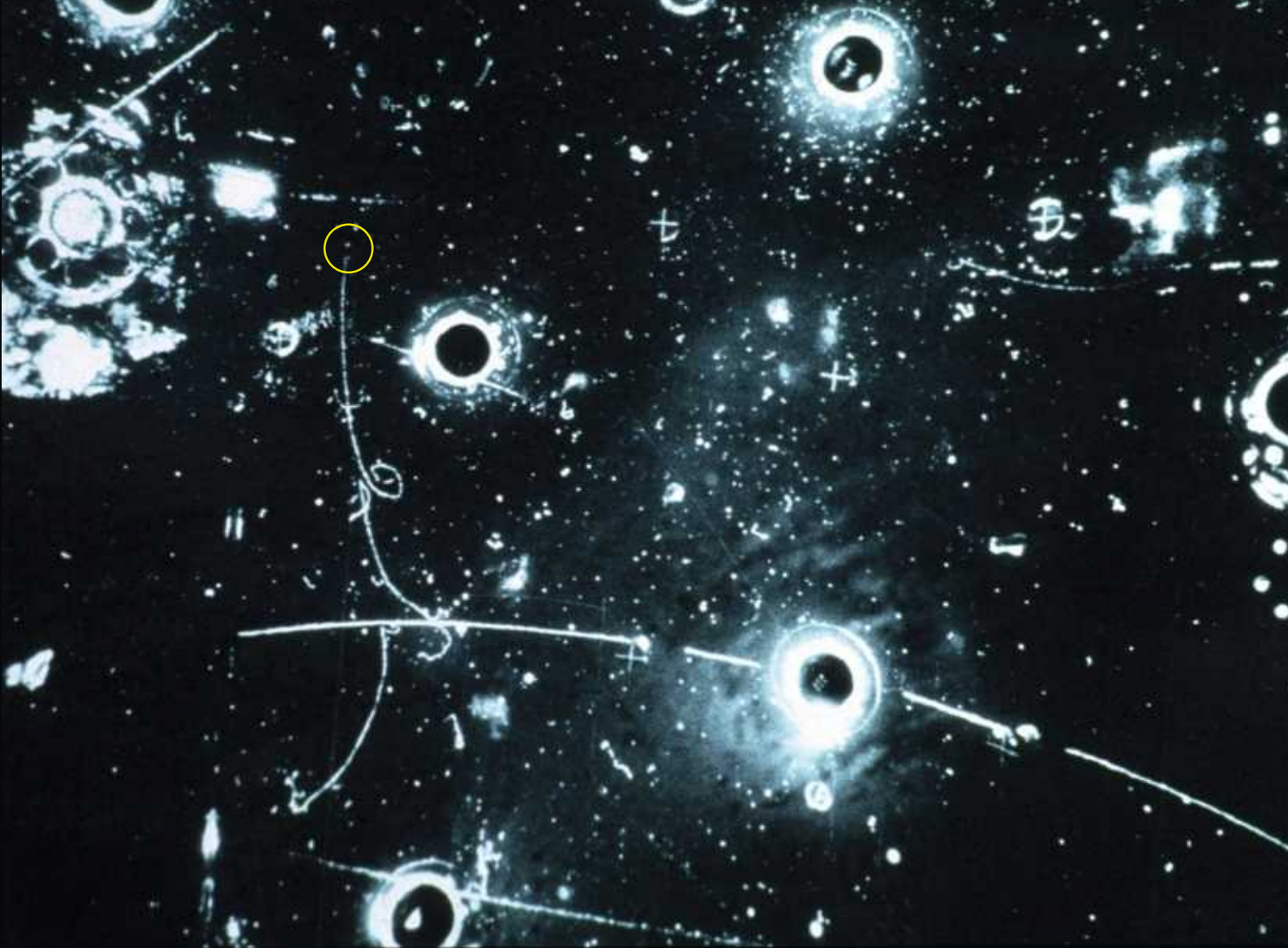
✓ Les neutrinos se présentent sous différents types et peuvent se métamorphoser en vol. Cette propriété particulière apporte de l'information supplémentaire sur leurs origines cosmiques.

Quand la Fondation Nobel décerna en 2002 à Ray Davis et Masatoshi Koshihira le prix Nobel de physique, elle aurait pu choisir de mettre en avant n'importe lequel de leurs nombreux succès. R. Davis s'était rendu célèbre en détectant les neutrinos du Soleil, premiers exemplaires extraterrestres de ces particules insaisissables ; M. Koshihira en avait détecté d'autres qui provenaient de la grande explosion de supernova de 1987. Leurs travaux, un tour de force expérimental, ont contribué à établir que les neutrinos, dont les physiciens pensaient que leur masse était nulle, avaient en fait une petite masse. Mais la Fondation Nobel honora R. Davis et M. Koshihira avant tout pour avoir inauguré une nouvelle discipline scientifique : l'astronomie des neutrinos.

Avec leurs travaux, les neutrinos sont passés du statut de nouveauté théorique à celui d'outil pour scruter l'Univers. Les scientifiques étudiaient les neutrinos dans le cadre de l'exploration du monde des particules élémentaires ; ils peuvent main-

tenant les utiliser pour lever le voile sur certains des mystères de l'Univers. Les astronomes ont conçu et construit de vastes télescopes à neutrinos grâce auxquels ils espèrent faire de grandes découvertes. Ces observatoires ont déjà capté des dizaines de milliers de neutrinos et ont réalisé des images du Soleil en neutrinos. Les neutrinos issus d'autres sources cosmiques sont difficiles à distinguer de ceux produits dans la haute atmosphère terrestre, mais les instruments pourraient y parvenir d'ici une année environ.

À partir de là, on peut s'attendre à un flot de découvertes, et une particule autrefois considérée comme inobservable pourrait devenir indispensable. Les neutrinos peuvent révéler des phénomènes auxquels la lumière est aveugle. Quand on étudie le Soleil en lumière visible, on ne voit que sa surface, c'est-à-dire les quelques centaines de kilomètres de gaz les plus externes. Bien que l'énergie qui alimente la lumière solaire ait pour origine les réactions nucléaires au cœur du Soleil, la



lumière solaire elle-même est absorbée et réémise des milliards et des milliards de fois par les couches de gaz intermédiaires, et c'est seulement très près de la surface qu'elle peut s'échapper de l'étoile. En revanche, avec des «yeux à neutrinos», on voit directement le moteur central de la fusion : la partie (un pour cent en volume) la plus profonde et la plus chaude du Soleil. Les neutrinos qui y sont créés traversent les couches externes du Soleil presque comme si elles étaient vides.

Les neutrinos nous permettront également de regarder en profondeur dans les supernovæ, dans d'autres explosions stellaires telles que les sursauts de rayons gamma, et dans les disques qui tourbillonnent autour des trous noirs supermassifs. Les observatoires en cours de construction devraient apercevoir environ une supernova par an dans la cinquantaine de galaxies les plus proches de nous. Ils pourraient également voir quelques-uns des sursauts gamma qui se produisent par centaines chaque année, sans parler d'éven-

tuels objets célestes plus exotiques. Mais comme n'importe quel outil puissant, les neutrinos exigent un temps d'adaptation. Ils obligent les astronomes à aborder leur sujet d'étude sous un angle nouveau.

Très peu réactifs, mais révélateurs

Pour un physicien des particules, un neutrino est semblable à un électron, à part son absence de charge électrique, qui le rend insensible aux forces électriques et magnétiques. Étant électriquement neutres, les neutrinos traversent la matière solide, ne jouent aucun rôle dans la physique des atomes ou des molécules, et sont presque totalement invisibles.

Les différents types de neutrinos connus participent à l'«interaction faible», responsable de la désintégration radioactive bêta et de la fusion des éléments lourds. Mais cette force est, comme son nom l'indique, d'intensité très faible et n'a qu'une très courte portée. Ainsi, les neutrinos interagis-

sent à peine avec les autres particules. Pour les détecter, les physiciens et les astronomes doivent scruter de grands volumes de matière, en recherchant les rares événements où un neutrino laisse une trace. Si les neutrinos cosmiques ont collectivement autant d'énergie que les rayons cosmiques (les protons et les ions qui bombardent notre planète), comme s'y attendent les astronomes, il faudra un kilomètre cube de matière pour en capturer un échantillon significatif. Les observatoires les plus grands s'approchent de cette taille (voir l'encadré page 54).

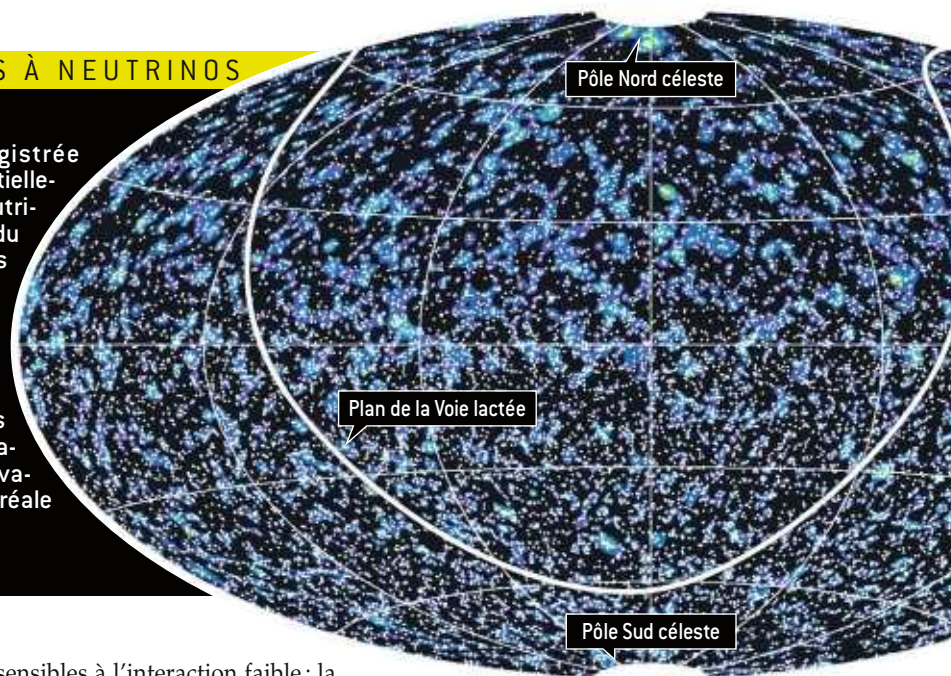
Les physiciens ont également postulé l'existence d'autres neutrinos, qualifiés de «stériles», qui ne seraient même

UN NEUTRINO INVISIBLE entre dans une chambre à bulles par le haut et expédie un électron (*entouré de jaune*) sur une trajectoire tortueuse (*ligne sinueuse*). Cette image emblématique, réalisée dans la chambre à bulles Gargamelle du CERN en 1972, a contribué à valider le modèle standard de la physique des particules et a ouvert la voie à l'utilisation des neutrinos en astronomie.

SI VOUS AVIEZ DES LUNETTES À NEUTRINOS

LE CIEL VU EN NEUTRINOS...

...pourrait ressembler à cette image, enregistrée d'avril 2008 à mai 2009 par l'observatoire partiellement achevé *IceCube*. Les près de 20 000 neutrinos détectés (*points*) proviennent à la fois du cosmos et de la haute atmosphère terrestre. Les zones en couleurs indiquent la probabilité avec laquelle les accumulations de neutrinos peuvent être interprétées comme un excès dû à une source cosmique de neutrinos. Quand il sera totalement opérationnel, *IceCube* devrait être en mesure d'identifier les sources astronomiques sans ambiguïté. La Terre étant presque transparente aux neutrinos peu énergétiques, l'observatoire à neutrinos voit à la fois la voûte céleste boréale et australe.



pas sensibles à l'interaction faible ; la force de gravité serait leur principal lien avec le reste de l'Univers. Détecter ces neutrinos est un défi encore plus grand (voir l'encadré page 57).

Si peu réactifs soient-ils, les neutrinos n'en jouent pas moins un rôle actif sur la grande scène du cosmos. Ce sont d'inévitables sous-produits des désintégrations bêta, processus qui chauffent les débris d'étoiles explosées et l'intérieur des planètes, et constituent une étape intermédiaire cruciale dans la fusion nucléaire au sein d'une étoile. Les neutrinos sont également déterminants dans l'un des deux principaux types de supernovae, celles qui résultent de l'implosion d'une étoile massive à la fin de sa vie. Cette implosion comprime le cœur de l'étoile jusqu'à des densités nucléaires et libère 10^{58} neutrinos en l'espace de 10 à 15 secondes.

Ces neutrinos comptent pour 99 pour cent de l'énergie totale dégagée par le cataclysme. Leur observation nous permet donc de voir les 99 pour cent du phénomène qui échappent aux télescopes ordinaires, en particulier les premières étapes, décisives. La détection des neutrinos de la supernova de 1987 a confirmé la théorie de l'effondrement stellaire. Les détecteurs maintenant disponibles seront en mesure de nous livrer un film en temps réel de l'effondrement de l'étoile, du rebond qui s'ensuit et de son explosion.

Quelle que soit leur origine, les neutrinos n'ont aucun mal à atteindre la Terre. Ils peuvent traverser l'Univers entier même quand leur énergie est très élevée. Ce n'est pas le cas pour la lumière. La forme

de lumière la plus énergétique, les rayons gamma, est atténuée par le rayonnement du fond diffus cosmologique (la brume de micro-ondes laissées par le Big Bang) ainsi que par la lumière des étoiles et les ondes radio qui se sont accumulées. Les photons gamma ayant une énergie de 100 téraélectronvolts (TeV) ne franchissent pas plus de quelques dizaines de millions d'années-lumière. Les rayons cosmiques énergétiques sont eux aussi bloqués.

Les neutrinos constituent par conséquent l'un des rares moyens dont disposent les astronomes pour étudier les phénomènes les plus puissants de la nature. Ils sont peut-être difficiles à attraper, mais ils en valent la peine.

D'une saveur à l'autre

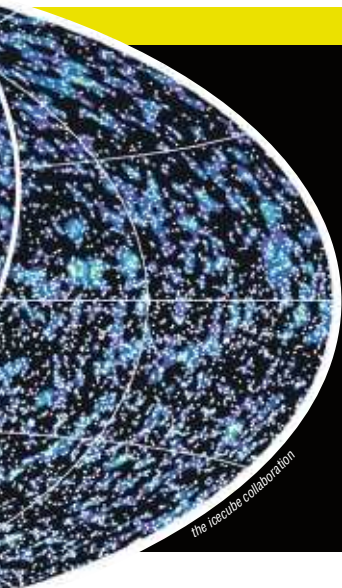
Très peu interactifs, les neutrinos se distinguent aussi par leur étrange capacité à se métamorphoser. Comme toutes les particules élémentaires de matière, il en existe trois versions, ou « saveurs », différentes. L'électron (e) a deux jumeaux plus lourds, le muon (μ) et le tau (τ), et à chacun est associé un neutrino : le neutrino électronique (ν_e), le neutrino muonique (ν_μ) et le neutrino tauique (ν_τ).

Mais alors que l'électron, le muon et le tau ont des masses bien définies, ce n'est pas le cas des trois saveurs de neutrinos. Si l'on mesure la masse d'un neutrino de saveur donnée, on obtient l'une parmi trois masses possibles au hasard, avec une certaine probabilité pour chacune. Réci-

LES AUTEURS

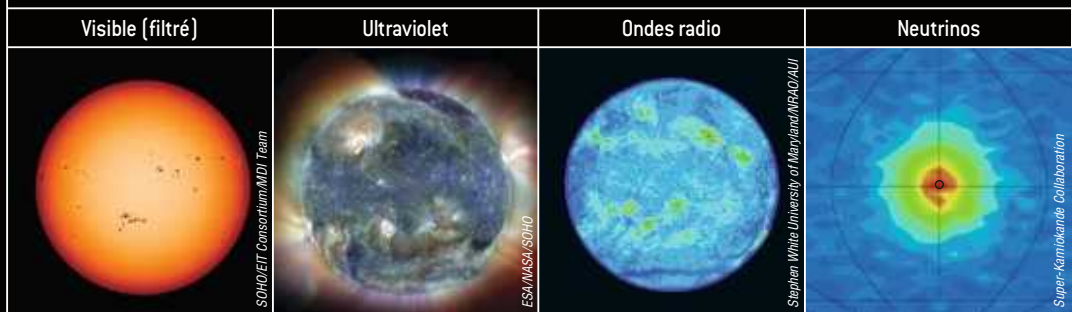


Graciela GELMINI est professeur de physique à l'Université de Californie à Los Angeles, où travaille également Alexander KUSENKO. Tous deux font partie de l'équipe de l'Observatoire Pierre Auger. Thomas WEILER est professeur de physique à l'Université Vanderbilt, à Nashville dans le Tennessee (États-Unis). Il est membre de l'équipe de l'EUSO (*Extreme Universe Space Observatory*).



« VOIR » LE SOLEIL

Les astronomes ont observé le Soleil à toutes les longueurs d'onde de la lumière, et maintenant ils l'ont vu en neutrinos. L'image est floue, car l'expérience Super-Kamiokande qui l'a obtenue a une résolution de 26 degrés, alors que le Soleil ne fait que 0,5 degré sur le ciel (*cercle noir*), mais elle constitue néanmoins une étape importante. Contrairement à la lumière qui ne montre que la surface du Soleil, les neutrinos révèlent le cœur de l'astre.



proquement, si l'on mesure la saveur d'un neutrino de masse donnée, on obtient une réponse possible parmi trois, avec une certaine probabilité. Un neutrino peut avoir soit une masse déterminée, soit une saveur déterminée, mais pas les deux en même temps. Les états de masse bien définies des neutrinos sont notés ν_1 , ν_2 et ν_3 , qui sont des états distincts de ν_e , ν_μ et ν_τ .

Saveur ou masse, il faut choisir

Les neutrinos vont ainsi à l'encontre de nos intuitions élémentaires concernant les objets. Un ballon de basket pèse 650 grammes et une balle de baseball, 140. Mais si ces balles se comportaient comme des neutrinos, un ballon de basket pèserait parfois 650 grammes, et parfois 140.

Un neutrino ν_1 interagissant dans un détecteur peut ainsi se manifester comme un neutrino ν_e , ν_μ ou ν_τ avec des probabilités que l'on peut calculer.

La saveur détermine comment les neutrinos prennent part à l'interaction faible, tandis que la masse détermine comment ils se propagent à travers l'espace. Par exemple, la désintégration bêta produit des neutrinos d'une seule saveur, ν_e . Tant que les particules se déplacent à travers l'espace, leur saveur n'a pas d'importance; c'est leur état de masse qui dicte leur comportement. Le ν_e est un mélange de ν_1 , ν_2 et ν_3 , dans des proportions que, pour des raisons techniques, les physiciens nomment « angles de mélange ». Au lieu d'un seul type de particules, les physiciens doivent dès lors en suivre trois. Finalement,

les neutrinos réagissent avec la matière du détecteur, et là c'est à nouveau la saveur qui importe. Si les proportions relatives des états de masse sont restées inchangées, elles se réadditionneront pour donner la même saveur qu'au départ (qui, pour la désintégration bêta, est ν_e).

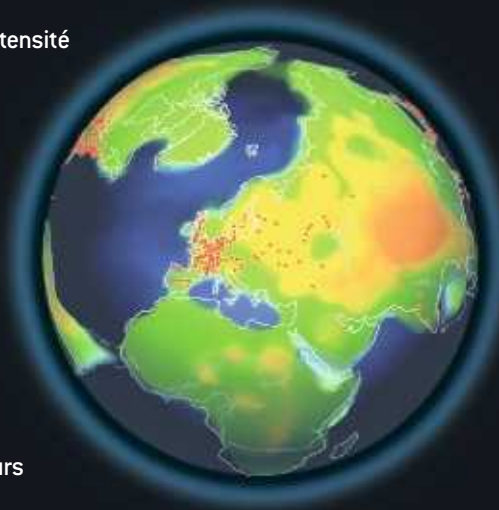
Mais ce n'est pas nécessairement le cas. Quand les particules se propagent comme états de masse, elles deviennent vulnérables à de nouveaux effets susceptibles de modifier les angles de mélange et de changer ainsi la saveur. C'est ce processus qui entraîne la métamorphose des neutrinos.

En vertu des principes de la mécanique quantique, chaque état de masse

correspond à une onde dotée d'une certaine longueur d'onde. Les trois ondes correspondant aux états de masse se chevauchent et interfèrent. Pour utiliser une métaphore acoustique, un neutrino est analogue à une onde sonore constituée de trois sons purs (ondes sinusoïdales). Comme le sait toute personne ayant déjà accordé un instrument de musique, la superposition d'ondes sonores de fréquences (ou de longueurs d'onde) légèrement différentes résulte en des « battements », c'est-à-dire que l'intensité sonore varie périodiquement. Dans le cas des neutrinos, une différence de masse agit comme une différence de fréquences, et les battements se traduisent par une

LA TERRE À LA LUMIÈRE DES NEUTRINOS

Comme le montre ce dessin où les couleurs indiquent l'intensité des émissions, notre propre planète émet des neutrinos. La radioactivité naturelle est l'une des sources, et les géophysiciens ont commencé à utiliser les observations de neutrinos pour déterminer la répartition des isotopes radioactifs. D'autres sources de neutrinos sont les collisions de rayons cosmiques dans la haute atmosphère, les réacteurs nucléaires et les accélérateurs de particules.



George Reiseck

oscillation de la saveur avec la distance (voir l'encadré page 56).

Le Soleil, par exemple, produit des neutrinos électroniques (ν_e). Avant d'atteindre la Terre, ils se sont transformés en un mélange des trois saveurs. Les expériences pionnières de R. Davis et M. Koshiba n'étaient sensibles qu'aux neutrinos électroniques, si bien qu'ils sont passés à côté des neutrinos muoniques et tauïques en lesquels beaucoup des neutrinos électroniques s'étaient transformés durant leur voyage. Il a fallu attendre 2001 et 2002 pour qu'un détecteur sensible aux trois saveurs de neutrinos, l'Observatoire de neutrinos de Sudbury, au Canada, détecte un échantillon représentatif de particules.

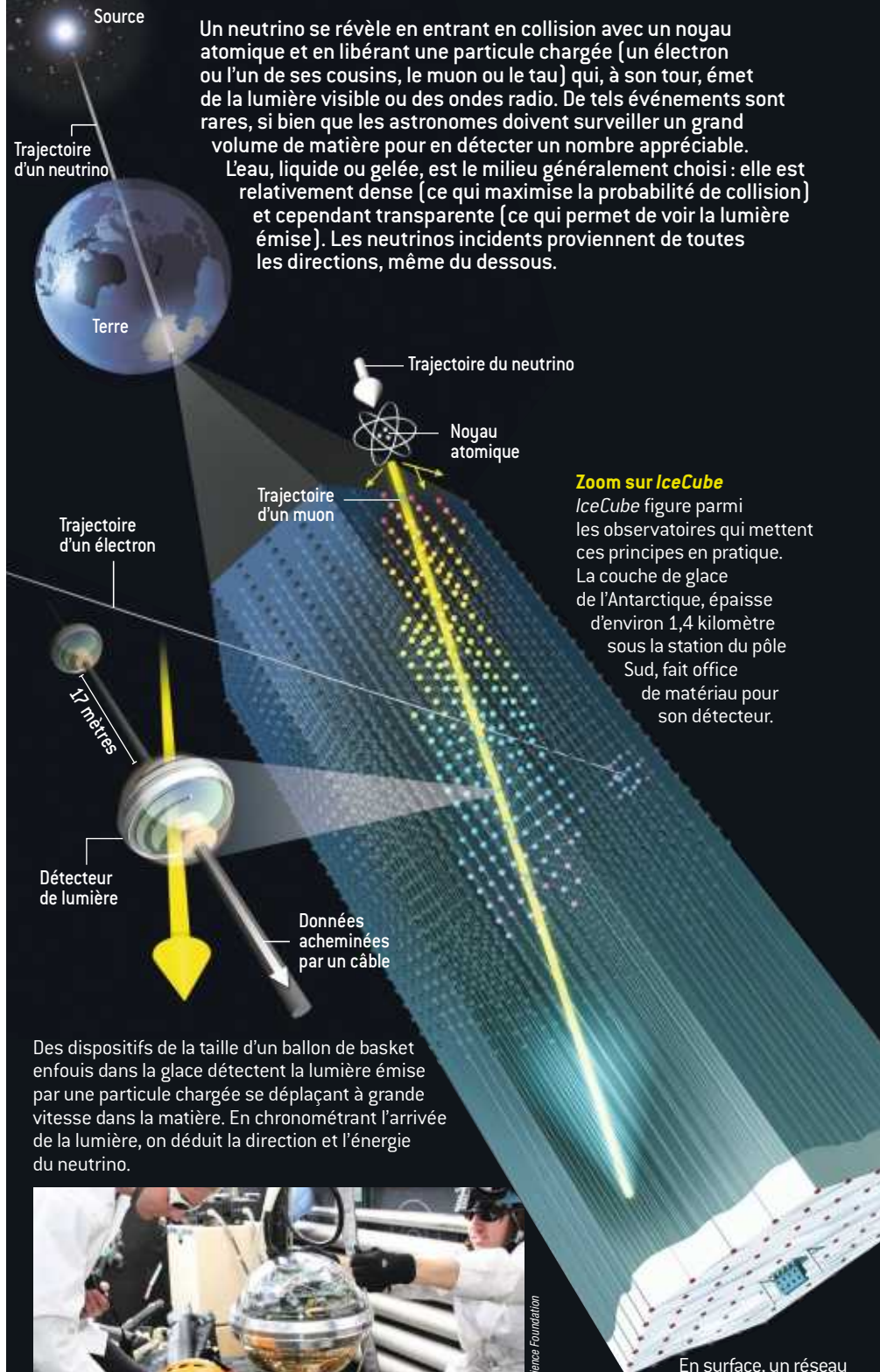
Un autre exemple bien établi de transformation de neutrinos se produit quand des neutrinos sont créés dans la haute atmosphère de la Terre. Les rayons cosmiques entrent en collision avec des noyaux atomiques de l'air. Ces collisions créent des particules instables, notamment des pions (ou mésons π) qui se désintègrent par la suite en neutrinos électroniques et muoniques. Ces neutrinos se propagent alors dans l'atmosphère et dans l'intérieur de notre planète sous forme d'états de masse. Plus ils ont parcouru de distance au moment où ils sont détectés, plus les neutrinos muoniques ont eu tendance à se transformer en neutrinos tauïques. Par conséquent, les observatoires de neutrinos voient deux fois moins de neutrinos muoniques provenant du dessous (c'est-à-dire ayant voyagé depuis l'autre côté de la planète, à l'antipode) que venant du dessus (ayant voyagé directement de la haute atmosphère jusqu'au sol).

Des proportions particulières

Pour les astronomes, la saveur est aux neutrinos ce que la polarisation est à la lumière: une propriété qui peut porter de l'information. Une source céleste peut émettre de la lumière avec une polarisation donnée; de la même façon, elle produit des neutrinos de certaines saveurs, et en mesurant la saveur, les astronomes peuvent remonter aux processus à l'œuvre dans la source. L'idée est d'inverser, par la pensée, la métamorphose subie par les neutrinos au cours de leur voyage.

Si nous étions capables de mesurer avec précision l'énergie d'un neutrino et la distance qu'il a parcourue, nous pour-

UN DRÔLE DE TÉLESCOPE



Des dispositifs de la taille d'un ballon de basket enfouis dans la glace détectent la lumière émise par une particule chargée se déplaçant à grande vitesse dans la matière. En chronométrant l'arrivée de la lumière, on déduit la direction et l'énergie du neutrino.



Reina Maruyama / National Science Foundation

Les scientifiques ont commencé leurs travaux durant l'été austral 2005-2006 et espèrent les achever l'été prochain. À l'aide d'eau chaude sous pression, ils creusent des trous de 2,5 kilomètres de profondeur et descendent les photodétecteurs sur un câble.

IceCube :
1 000 mètres

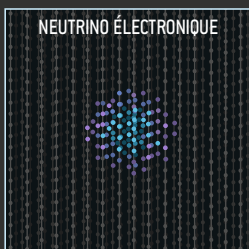
Tour Eiffel : 324 m



SPÉCIFICATIONS DE L'OBSERVATOIRE	CONCEPTION
SUPER-KAMIOKANDE Lieu : Nord de Nagoya, Japon Volume du détecteur : 50 000 mètres cubes Date de mise en service : 1996 Résolution angulaire : 26 degrés Domaine énergétique : 10^8 à 10^{12} eV	Des photodétecteurs tapissent une gigantesque cuve d'eau dans une mine de zinc. Les physiciens ont proposé de l'agrandir d'un facteur 20, pour créer Hyper-Kamiokande.
OBSERVATOIRE PIERRE AUGER Lieu : Sud de Mendoza, Argentine Volume du détecteur : 30 000 km ³ [couverture du télescope], 20 000 m ³ [détecteurs au sol] Date de mise en service : 2004 Résolution angulaire : 0,5 à 2 degrés Domaine énergétique : 10^{17} à 10^{21} eV	Essentiellement un détecteur de rayons cosmiques, Auger capte aussi les neutrinos de haute énergie grâce à un réseau de 1 600 petites cuves d'eau. De plus, des télescopes ultraviolets recherchent les collisions de particules dans l'atmosphère.
ANITA (Antarctic Impulse Transient Array) Lieu : Base McMurdo, Antarctique Volume du détecteur : 1 000 000 km ³ Date des vols : 2006-2007, 2008-2009 Résolution angulaire : 1 à 2 degrés Domaine énergétique : 10^{17} à 10^{21} eV	Un ballon vole au-dessus de l'Antarctique durant un mois en recherchant les ondes radio attribuables à des collisions de neutrinos très énergétiques avec la calotte glaciaire.
ANTARES (Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental RESearch) Lieu : Mer Méditerranée, près de Marseille Volume du détecteur : 0,05 km ³ Date de mise en service : 2008 Résolution angulaire : 0,3 degré Domaine énergétique : 10^{13} à 10^{16} eV	Douze lignes de photodétecteurs ancrés au fond de la mer traquent les collisions dans l'eau. Il s'agit de l'un des trois projets pilotes de KM3NeT, un télescope à neutrinos d'un kilomètre cube, dont la construction est prévue de 2012 à 2015.
ICECUBE Lieu : Pôle Sud Volume du détecteur : 1 km ³ Date prévue d'achèvement des travaux : 2011 Résolution angulaire : 1 à 2 degrés Domaine énergétique : 10^{11} à 10^{21} eV	Quatre-vingt six lignes de photodétecteurs (et parfois des antennes radio) sont enfouies dans la glace à l'aide d'un puits de forage. C'est une version à plus grande échelle de l'expérience AMANDA.
EUSO (Extreme Universe Space Observatory) Lieu : Station spatiale internationale Volume du détecteur : 1 000 000 km ³ d'air [équivalent à 1 000 km ³ de glace] Date prévue d'achèvement des travaux : 2015 Résolution angulaire : 1 à 2 degrés Domaine énergétique : 10^{19} à 10^{21} eV	Un télescope ultraviolet du module expérimental japonais scrutera l'atmosphère de la Terre pour y trouver des traces de particules chargées.

De quel type de neutrino s'agissait-il ?

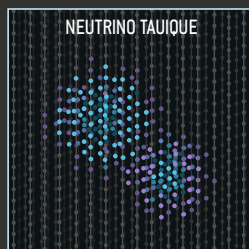
Chaque type, ou saveur, de neutrino libère sa particule correspondante : un neutrino électronique libère un électron, un neutrino muonique un muon, et un neutrino tauïque un tau. Lorsque la trace lumineuse du neutrino est bien détectée, on peut déterminer la saveur du neutrino.



L'électron interagit avec les atomes et dépose son énergie en illuminant un volume presque sphérique.



Le muon, moins interactif, parcourt un kilomètre ou plus, en créant un cône de lumière.



Le tau se désintègre très vite. Sa création et sa disparition créent deux sphères de lumière.

Jean Christensen

George Rehsack, Jessica Hüppi

rions savoir à quel point du cycle d'oscillations il est parvenu et nous pourrions calculer les proportions relatives des trois saveurs. Mais on ne dispose pas d'une telle précision. Sur de grandes distances et des temps longs, les neutrinos oscillent tant de fois que l'on ne peut pas suivre l'évolution du mélange de saveurs : tout nous semble brouillé. Au lieu de cela, on prend une moyenne statistique, décrite par une « matrice de propagation des saveurs ». À partir de cette matrice, les astronomes peuvent déduire des valeurs observées le rapport initial des saveurs.

Remonter à la nature initiale des neutrinos

Par exemple, on pense que de nombreux neutrinos proviennent de collisions photon-proton à des énergies extrêmes. Ce processus se produit dans des accélérateurs de particules de dimensions cosmiques (dans les ondes de choc des vestiges de supernovae et dans les jets qui s'échappent des trous noirs de toutes tailles) ainsi que dans l'espace lointain, là où les rayons cosmiques heurtent de plein fouet le fond de rayonnement diffus. Ces collisions produisent des pions chargés, qui se désintègrent en muons et en neutrinos muoniques. Chaque muon se désintègre à son tour en un électron, un neutrino électronique et un neutrino muonique. Le flux de neutrinos résultant est ainsi constitué d'une part de ν_e , deux parts de ν_μ , et pas du tout de ν_τ , soit des rapports de saveurs égaux à 1:2:0. En prenant les valeurs appropriées dans la matrice de propagation, on trouve que ces rapports évoluent pour donner 1:1:1. Si une expérience terrestre détecte autre chose que les rapports 1:1:1, c'est que la chaîne de désintégration des pions ne peut pas être la source de ces neutrinos.

Dans certains cas, le pion peut perdre de l'énergie en heurtant d'autres particules ou par émission de rayonnement au cours d'une trajectoire curviligne dans un champ magnétique. Le muon produit par sa désintégration devient alors non pertinent en tant que source de neutrinos de haute énergie, et les rapports initiaux de saveurs sont en fait de 0:1:0. D'après la matrice de propagation, les rapports au niveau de la Terre seront de 4:7:7 plutôt que de 1:1:1. Si une expérience trouve que les rapports de saveurs sont de 1:1:1 pour les neutrinos de basse énergie, mais

LA MÉTAMORPHOSE DES NEUTRINOS

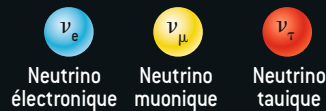
Contrairement à d'autres types de particules, les neutrinos se métamorphosent (les physiciens disent : « oscillent ») en voyageant dans l'espace. Les astronomes doivent inverser mentalement le processus pour en déduire la nature initiale des neutrinos et le phénomène qui les a produits.

Conflit d'identités

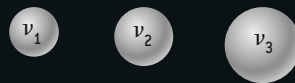
Si le neutrino a cette étrange faculté de se métamorphoser, c'est parce qu'il a deux identités. Il est doté d'une masse parmi trois possibles, et revêt une saveur parmi trois. Mais une saveur donnée n'implique pas une masse donnée, et vice-versa.

Un objet ordinaire a des propriétés fixes. Une balle est soit un ballon de basket pesant 650 grammes, soit un ballon de foot pesant 430 grammes, soit une balle de baseball pesant 140 grammes. Si ces balles se comportaient comme des neutrinos, le poids et le type de balle seraient indépendants (ce qui ne manquerait pas de consterner les arbitres) et la balle pourrait changer de type au cours de la passe...

La saveur détermine comment la particule interagit avec la matière.



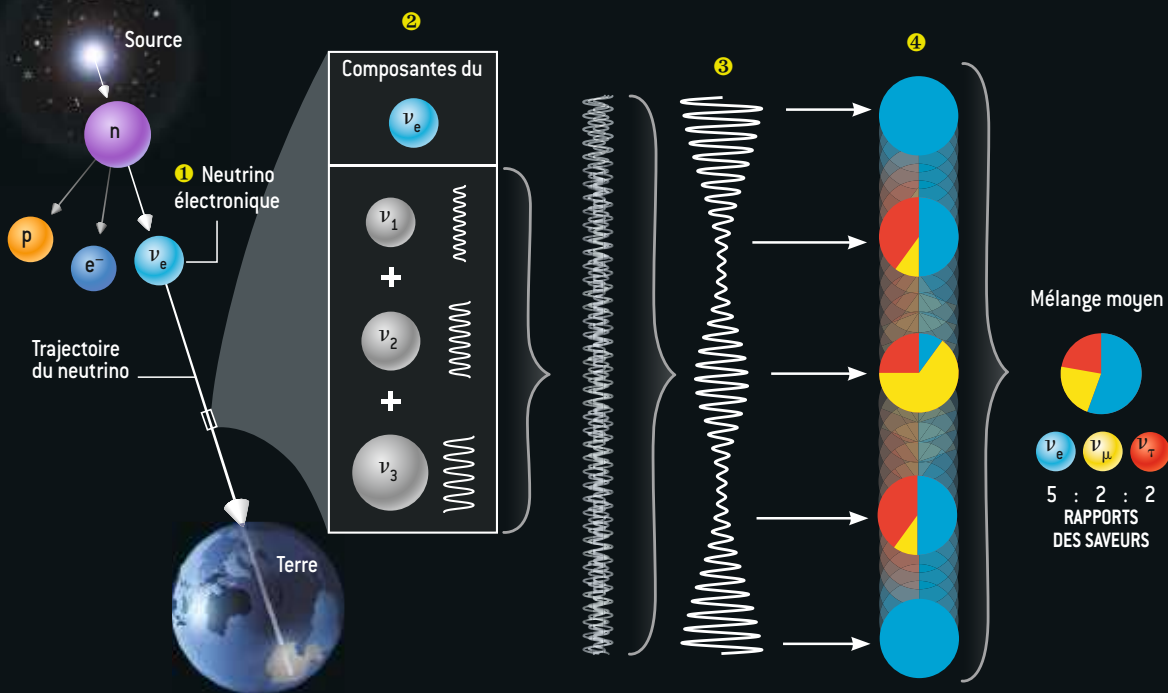
La masse détermine comment la particule se propage dans l'espace.



Oscillation des saveurs

Quand il est créé ou détecté, un neutrino a une saveur déterminée. Par exemple, la désintégration bêta d'un neutron crée un neutrino électronique ①. Ce neutrino n'a pas de masse déterminée, il est un mélange des trois possibilités, représentées par la somme de trois ondes de longueurs d'onde différentes ②. Au cours de la propagation du neutrino, les ondes se déphasent, si bien qu'elles

ne s'additionnent plus pour donner la saveur d'origine, mais un mélange des trois saveurs ③. Le mélange varie durant le voyage du neutrino ④. Ici, le mélange moyen est de 5 : 2 : 2, ce qui signifie qu'un détecteur a cinq chances sur neuf de le voir comme un neutrino électronique et quatre chances sur neuf de voir un neutrino muonique ou tauique.



Mélanges de saveurs

Les processus astrophysiques produisent des mélanges de saveurs avec des proportions caractéristiques, que les astronomes peuvent déduire en tenant compte de l'oscillation. Les neutrinos muoniques et tauiques nous parviennent toujours en proportions égales, une conséquence de leur symétrie intrinsèque.

Source	Rapports au niveau de la source	Rapports au niveau de la Terre
Désintégration du neutron	$1\nu_e : 0\nu_\mu : 0\nu_\tau$	$5\nu_e : 2\nu_\mu : 2\nu_\tau$
Désintégration du pion (complète)	$1 : 2 : 0$	$1 : 1 : 1$
Désintégration du pion (incomplète)	$0 : 1 : 0$	$4 : 7 : 7$
Désintégration de matière noire (exemple)	$1 : 1 : 2$	$7 : 8 : 8$
Fluctuations quantiques de l'espace-temps	Quelconques	$1 : 1 : 1$
Désintégration de neutrino (ν_1 le plus léger)	Quelconques	$4 : 1 : 1$
Désintégration de neutrino (ν_3 le plus léger)	Quelconques	$0 : 1 : 1$

George Ritsack, Jan Christensen

de 4:7:7 pour les neutrinos de haute énergie, les astronomes pourront déduire la densité de particules et l'intensité du champ magnétique de la source.

Les neutrinos peuvent également provenir de ce qu'on appelle des sources de faisceaux bêta. Dans les accélérateurs de particules cosmiques, des noyaux atomiques animés d'une vitesse élevée peuvent échanger des pions ou simplement se disloquer, ce qui produit un faisceau de neutrons rapides. Les neutrons subissent une désintégration bêta et émettent ainsi un faisceau d'électrons et de neutrinos électroniques, les rapports de saveurs étant de 1:0:0. Après traitement par la matrice de propagation, les rapports prévus au niveau de la Terre sont de 5:2:2.

Quel que soit le mélange initial de saveurs, les deux saveurs ν_μ et ν_τ arrivent sur Terre en proportions égales. Cette égalité, qui reflète une symétrie plus fondamentale que les physiciens n'ont pas encore expliquée, est remarquable parce que des neutrinos tauïques seront toujours détectés par les télescopes alors qu'aucune source astrophysique connue n'en produit.

Sonder les sources de rayons cosmiques

Les rapports de saveurs permettent de discriminer le fonctionnement d'objets célestes comme aucune autre source d'information ne peut le faire. En complément des rayons gamma et des rayons cosmiques, les neutrinos aideront à décrypter le mécanisme dynamique et le bilan énergétique des dynamos les plus puissantes de la nature. Ils peuvent déterminer si les accélérateurs de particules cosmiques sont purement électromagnétiques (auquel cas aucun neutrino n'est produit) ou s'ils font intervenir des particules lourdes (des neutrinos en émergent alors). Ils pourraient même contribuer à résoudre un mystère qui figure sur la liste des dix principales interrogations de tout astronome : comment sont produits les rayons cosmiques les plus énergétiques ? Certains rayons cosmiques sont si puissants qu'ils semblent défier les lois connues de la physique. Les neutrinos ont le pouvoir de sonder l'intérieur des objets qui les émettent.

Ils peuvent aussi révéler d'autres processus naturels. La désintégration des particules de matière noire pourrait produire des neutrinos dans des rapports de 1:1:2, qui évoluent pour donner approximative-

La fécondité des neutrinos stériles

Les astronomes pensaient autrefois que les neutrinos pourraient constituer la mystérieuse matière noire de l'Univers. Cette idée est tombée en désuétude quand les neutrinos se sont révélés trop légers – un millionième de la masse de l'électron, au plus. Mais les scientifiques gardent ouverte la possibilité qu'il existe des neutrinos non encore observés, nommés neutrinos stériles car insensibles à l'interaction faible, neutrinos qui seraient suffisamment lourds pour faire office de matière noire.

On pourrait penser que ces hypothétiques neutrinos stériles sont impossibles à détecter ; mais, il n'y a pas si longtemps,

on en disait autant des neutrinos ordinaires. Une piste est qu'ils pourraient avoir des effets caractéristiques sur les objets astronomiques. Par exemple, ils pourraient être émis par les explosions de supernovæ. Du fait que ces explosions sont par nature asymétriques, il y aurait davantage de neutrinos projetés dans une direction que dans les autres, et le vestige stellaire reculerait dans la direction opposée à des vitesses de plusieurs centaines de kilomètres par seconde. De fait, les astronomes observent effectivement un tel recul, qui reste un mystère.

De plus, les neutrinos stériles pourraient être instables

et se désintégrer en photons X. Le télescope spatial à rayons X *Chandra* a découvert une faible émission de rayons X suggérant un neutrino stérile ayant le centième de la masse de l'électron, et la mission *Suzaku* (toujours en rayons X) a observé un faible signal qui pouvait provenir d'un neutrino stérile. Les désintégrations de neutrinos stériles pourraient également avoir ionisé l'hydrogène de l'Univers primordial, ou même contribué à briser la symétrie de l'Univers en favorisant la matière par rapport à l'antimatière. Cependant, les indices sont pour le moment trop ténus pour que l'on puisse tirer la moindre conclusion.

ment 7:8:8. Dans certaines théories de la gravité quantique, la trame même de l'espace-temps ondule aux échelles microscopiques. Les neutrinos de très haute énergie ont des longueurs d'onde très courtes qui pourraient être sensibles à ces fluctuations. Les fluctuations pourraient agir en brouillant les saveurs, conduisant à des rapports observés de 1:1:1. Si les physiciens mesurent des rapports différents de 1:1:1, ils pourront éliminer certaines classes de théories et déterminer les niveaux énergétiques auxquels les effets de la gravité quantique entrent en jeu.

Un autre processus exotique est la désintégration d'un neutrino lourd en une variété plus légère, ce qui modifierait le rapport des saveurs. À partir de l'étude des neutrinos solaires, les physiciens ont déterminé que ν_1 est plus léger que ν_2 , mais ils ignorent lequel, de ν_1 ou de ν_3 , est le plus léger des trois. Si les astronomes trouvaient des rapports de saveurs de 4:1:1, cela signifierait que les neutrinos sont effectivement instables et que ν_1 est le plus léger. Des rapports de 0:1:1 donneraient l'avantage à ν_3 .

L'astronomie a débuté par l'observation de l'Univers en lumière visible. Elle s'est progressivement étendue aux domaines des rayonnements infrarouge, micro-ondes, radio, X et gamma. Les neutrinos prolongent cette tendance ; la décennie qui vient sera l'âge d'or de l'astronomie des neutrinos. ■

✓ BIBLIOGRAPHIE

G. B. Gelmini, **High energy cosmic rays**, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 171{1}, article 012012, 29 juin 2009 [arxiv.org/abs/0903.4716].

A. Kusenko, **Sterile neutrinos: the dark side of the light fermions**, *Physics Reports*, vol. 481{1-2} pp. 1-28, 2009 [arxiv.org/abs/0906.2968].

F. Halzen et S. R. Klein, **Astronomy and astrophysics with neutrinos**, *Physics Today*, vol. 61{5}, pp. 29-35, mai 2008.

S. Pakvasa *et al.*, **Flavor ratios of astrophysical neutrinos: implications for precision measurements**, *Journal of High Energy Physics*, article n° 5, 1^{er} février 2008 [arxiv.org/abs/0711.4517].

Th. Stolarczyk, **Le neutrino, particule ordinaire ?**, Le Pommier, 2008.