

**Texte de la 185^e conférence de l'Université de tous les savoirs donnée le 3 juillet
2000.**

**Astrophysique, physique des particules et astroparticules
par François Vannucci**

Introduction

L'astrophysique est la science qui étudie la nature à l'échelle de l'infiniment grand, jusqu'aux dimensions de l'univers entier, c'est-à-dire quelques 10^{26} m. À l'opposé, la physique des particules explore la matière à l'échelle de l'infiniment petit et permet actuellement de sonder des distances jusqu'à 10^{-18} m. Astrophysique et physique des particules représentent donc les deux frontières de la connaissance humaine.

La physique des astroparticules est une interface entre ces deux extrêmes. Alors que les objets de l'astrophysique sont de tailles macroscopiques, planètes, étoiles, galaxies..., la physique astroparticulaire étudie des objets microscopiques, les particules élémentaires elles-mêmes, mais au lieu de se limiter aux particules produites auprès des accélérateurs, les sources en sont maintenant astrophysiques. En pratique, cette discipline s'est récemment développée grâce aux physiciens des particules qui, pour certains, se sentaient à l'étroit près des accélérateurs, et qui ont transposé leurs techniques de détection pour l'observation des phénomènes violents qui apparaissent dans le ciel.

L'astrophysique utilise comme intermédiaire de l'information, la lumière, c'est-à-dire des photons appartenant à la gamme visible ou proche du visible, détectés grâce à des instruments optiques, plaques photographiques, CCD. La physique astroparticulaire bénéficie d'une panoplie plus large de messagers : photons d'énergies élevées, mais aussi protons ou noyaux atomiques, électrons et neutrinos. Le but de cette physique est double, elle permet à la fois de mieux comprendre les sources de ces rayonnements, c'est-à-dire les phénomènes à l'origine d'accélération gigantesques, mais aussi d'affiner la connaissance des propriétés des particules elles-mêmes produites dans des conditions impossibles à égaler sur terre.

Deux exemples

Les gammas de hautes énergies

Seuls les photons visibles peuvent traverser l'atmosphère sans être absorbés. Pour d'autres longueurs d'onde, l'étude se fait en satellite où les conditions d'observation sont idéales. Mais les satellites ont des dimensions limitées, et les flux de photons de très hautes énergies sont si faibles qu'il faut pouvoir disposer de surfaces de détection importantes pour compter un nombre suffisant d'événements. Dans l'atmosphère, les photons énergiques se multiplient en donnant une gerbe dite électromagnétique qui, à son maximum, peut atteindre des millions de particules, essentiellement des électrons et des positrons. Ceux-ci disposent encore d'une énergie suffisante pour donner le long de leur trajectoire de la lumière qu'on peut détecter grâce à des capteurs couvrant de grande surface. Un dispositif de ce type, appelé Cat, est en opération au pied des Pyrénées. Alors qu'en lumière visible on répertorie des milliards de sources, et qu'en rayonnement X, il en reste quelques milliers, on n'a détecté à ce jour que quatre sources certaines aux énergies allant jusqu'à 10^{14} eV, en particulier un pulsar, le Crabe, et deux noyaux actifs de galaxies Mk 421 et 501 qui ont surpris par la très grande variabilité de leur émission. Le spectre des photons arrivant sur terre renseigne d'autre part sur le milieu traversé.

Les rayons cosmiques chargés

Les rayons cosmiques chargés ont été étudiés depuis le début du 20^{ième} siècle, et si beaucoup de physiciens se sont tournés vers les accélérateurs au milieu du siècle, certains observent à nouveau le ciel qui permet des énergies qu'aucun accélérateur ne peut atteindre. On détecte aujourd'hui des particules, probablement des protons atteignant des énergies de 50 J, l'énergie d'une balle de tennis lors d'un service ! La **figure 1** montre le spectre de ce rayonnement mesuré jusqu'à ces énergies macroscopiques. Quelques rayons cosmiques de plus de 10^{20} eV ont été observés, et ils posent un problème, car ils ne peuvent provenir de sources très lointaines du fait de l'absorption inhérente à la présence du fond cosmologique, mais d'autre part on ne connaît pas de phénomènes d'accélération suffisamment puissants dans les régions proches de nous. Certaines théories les expliquent comme témoins de phénomènes liés au Big-Bang.

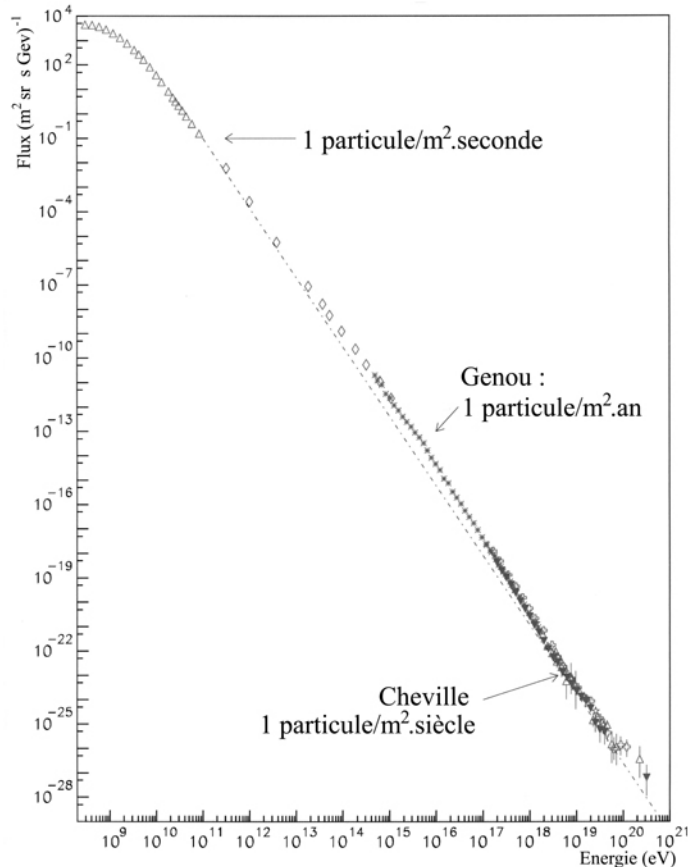


Figure 1 : Spectre des rayons cosmiques mesuré jusqu'aux énergies ultimes.

Pour espérer résoudre l'énigme présente, il faut accumuler des statistiques suffisantes, or ces rayons sont très rares, puisqu'ils bombardent la terre à raison de 1 par km^2 et par siècle. Il faut donc disposer de très grandes surfaces de collection. L'observatoire Auger se donne pour but d'instrumenter $3\,000\ \text{km}^2$ d'un plateau en Argentine. Un rayon cosmique ayant l'énergie considérée ici, produit au total des milliards de particules secondaires, et arrose au sol une surface de quelques $10\ \text{km}^2$. Le détecteur consiste en un réseau de capteurs distants les uns des autres de 1.5 km.

Le mystère des neutrinos

Les neutrinos peuvent être considérés comme les astroparticules « par excellence », car ils sont présents à toutes les échelles de l'univers, ce qui fait du neutrino la particule, hors le photon, la plus abondante. Des sources très puissantes contribuent à cette présence incontournable.

En premier lieu, le soleil. Il nous envoie chaque seconde 60 milliards d'« hélioneutrinos ». sur chaque cm^2 de notre terre. Ils proviennent de réactions de fusion à l'origine de l'énergie qui fait briller notre astre, et les prédictions de flux reposent sur des calculs très élaborés que les théoriciens affirment fiables à quelques pour cent près. Ce flux nous traverse autant le jour que la nuit, car la terre est transparente aux neutrinos.

Une supernova de type IIa éjecte presque toute son énergie en libérant 10^{58} « galactoneutrinos » en quelques secondes. En février 1987 une telle explosion eut lieu à 150000 années-lumière de notre terre, dans le grand nuage de Magellan, et une vingtaine des neutrinos ainsi produits fut interceptée dans de vastes détecteurs souterrains.

Les neutrinos atmosphériques, « géoneutrinos » proviennent du bombardement des rayons cosmiques primaires dont il a été déjà question, sur les couches les plus hautes de l'atmosphère. Les protons interagissent en donnant des pions qui se désintègrent rapidement, ce qui résulte en un flux d'environ 1 neutrino par minute et par cm^2 .

Les neutrinos peuvent aussi provenir de sources extragalactiques encore mystérieuses, telles que noyaux actifs de galaxie, trous noirs..., et ici l'expérimentation en est encore à ses balbutiements.

N'oublions pas l'homme et ses « anthroponeutrinos ». Un réacteur nucléaire EDF produit quelques 10^{20} (anti)-neutrinos par seconde, sans aucun danger pour l'environnement, et les accélérateurs permettent de construire des faisceaux bien maîtrisés qui s'avèrent les mieux adaptés pour les recherches les plus fines concernant les propriétés de ces particules.

Au-delà de toutes ces sources variées, le producteur le plus prolifique fut le Big Bang, il y a 14 milliards d'années. Les astrophysiciens nous enseignent que la grande explosion originelle a laissé 300 « cosmoneutrinos » dans chaque cm^3 de l'Univers. Cette densité semble faible, rapportée aux densités de particules dans la matière ordinaire, mais intégrée sur tout le volume de l'univers, elle donne une population de neutrinos plusieurs milliards de fois plus abondante que celle des protons, neutrons et électrons qui forment les atomes.

Comment s'y retrouver dans toutes ces catégories de neutrinos ? Par chance, les différentes populations s'échelonnent en classes d'énergies bien distinctes. Ainsi, les neutrinos cosmologiques possèdent les énergies les plus faibles, le milli-eV, tandis qu'on attend des énergies atteignant l'Exa-eV pour les neutrinos extragalactiques. Entre ces extrêmes, les neutrinos solaires se concentrent autour de 1 MeV et les atmosphériques autour de 1 GeV. La **figure 2** montre cette hiérarchie d'énergies.

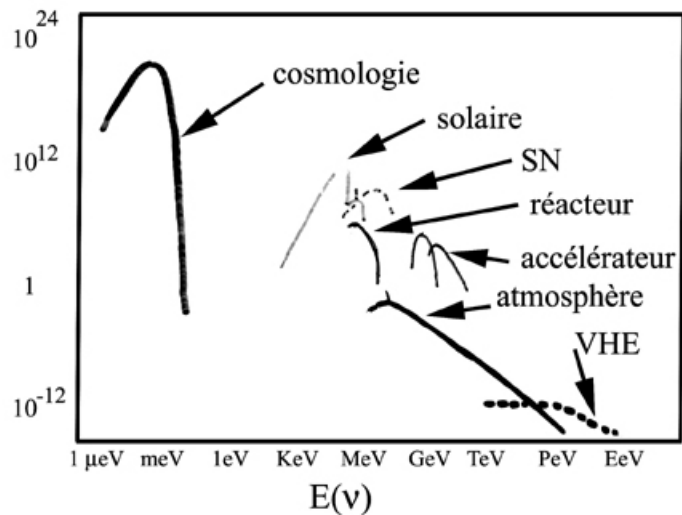


Figure 2 : Distribution en énergies des sources variées de neutrinos.

C'est le paradoxe des neutrinos : ils nous entourent en bataillons innombrables, et pourtant ils ne nous affectent aucunement. Car ils ne subissent que l'interaction dite faible et un seul neutrino de 1 GeV sur 100000 est arrêté dans la traversée de la terre, d'où le qualificatif de fantôme souvent attribué à cette évanescence particule. La probabilité d'interaction est faible mais pas nulle, sinon, on ne saurait rien d'eux. Or, grâce à des flux très intenses obtenus auprès d'accélérateurs puissants, et grâce à des détecteurs très massifs, on dispose aujourd'hui de millions d'interactions de neutrinos enregistrées au cours de plusieurs générations d'expériences qui ont analysé en détail les propriétés de leur couplage avec la matière.

Parfois un neutrino produit, lors de son interaction, un électron identifié : c'est un neutrino électronique ν_e . Parfois l'interaction donne un muon, c'est le neutrino muonique ν_μ qui est ici responsable.

ν_e ν_μ , l'histoire s'arrête-t-elle là ? Le nombre de types de neutrinos existant dans la nature a été mesuré précisément grâce à un accélérateur du CERN : le LEP. Le résultat est sans appel: 2.990 ± 0.016 . Cette mesure provient de l'étude du Z^0 , le boson intermédiaire des interactions faibles neutres, produit lors de collisions $e^+ e^-$ et qui se désintègre quasi-instantanément. La **figure 3** montre la courbe dite d'excitation du boson Z^0 . La largeur de cette courbe en cloche dépend du nombre de neutrinos. Plus il en existe de types différents, plus la courbe est aplatie, et son ajustement permet d'extraire le nombre total de neutrinos

cité plus haut. Ainsi, la nature se contente de 3 neutrinos différents et 3 seulement qu'on appelle ν_e , ν_μ et ν_τ .

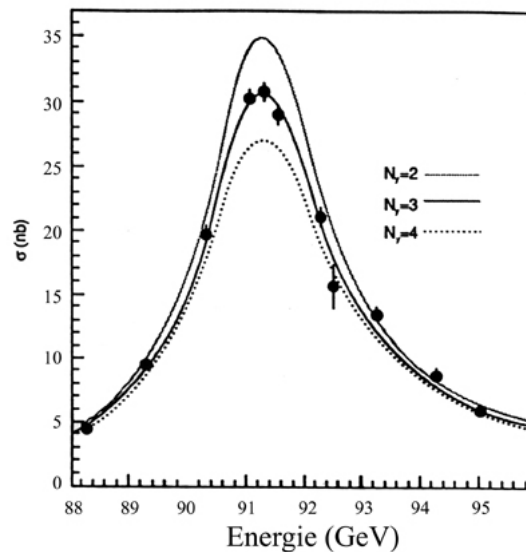


Figure 3 : La courbe « d'excitation » de la résonance Z^0 mesurée au LEP, qui prouve l'existence de seulement trois neutrinos légers différents.

L'expérience SuperKamiokande et les oscillations

Puisqu'il est nécessaire de disposer de détecteurs énormes pour obtenir un nombre suffisant d'interactions, décrivons l'ambitieuse expérience qui a donné les résultats les plus probants dans le domaine des neutrinos solaires et atmosphériques : SuperKamiokande. Construite dans une mine de zinc sous une montagne japonaise près de la petite ville de Kamioka, elle a commencé à prendre des données en avril 1997. Le dispositif consiste en un volume gigantesque, d'environ 35m*35m*40m rempli d'eau purifiée, constamment observé par plus de 11000 tubes photomultiplicateurs, capteurs pouvant détecter la présence de quelques photons visibles. C'est une véritable cathédrale souterraine que montre la **figure 4** pendant la phase de remplissage. On y voit des techniciens sur un canoë effectuant les derniers ajustements des photomultiplicateurs avant que l'eau ne les recouvre.

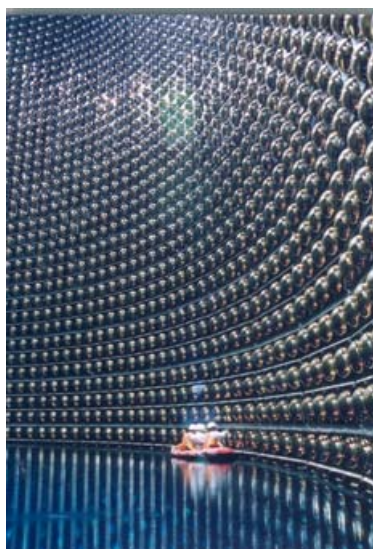


Figure 4 : Photographie du détecteur SuperKamiokande pendant la phase de remplissage (cliché ICRR-Tokyo).

Un neutrino interagissant dans l'eau produit des particules chargées de différents types qui, si elles ont suffisamment d'énergie, donnent dans la traversée de l'eau des photons visibles produits par l'effet appelé Cerenkov. Cet effet s'apparente à l'émission d'une onde de choc électromagnétique, et naît chaque fois qu'une particule se propage dans un milieu à une vitesse supérieure à celle de la lumière. Or, dans l'eau, la lumière se propage à 220000 km/s, et un électron d'énergie 1 MeV dépasse cette vitesse. Un cône lumineux est produit le long de la trajectoire, ce qui résulte en un anneau de photons au niveau des photomultiplicateurs.

Ainsi on mesure le flux des neutrinos solaires au-dessus d'une énergie de 5 MeV, or on ne compte que la moitié du flux prédit par les théoriciens.

Dans la gamme d'énergie entre 100 MeV et quelques GeV, on détecte un signal venant des neutrinos atmosphériques. Dans ce dernier cas, les interactions des neutrinos ν_μ produisent des muons, les interactions des neutrinos ν_e produisent des électrons. Or muons et électrons donnent des anneaux suffisamment distincts pour qu'on puisse compter séparément les ν_μ et les ν_e incidents. La direction de la particule détectée informe d'autre part sur la direction du neutrino qui a donné lieu à l'interaction, du moins aux énergies suffisamment élevées. À nouveau le résultat n'est pas conforme aux prédictions. SuperKamiokande détecte bien les neutrinos électroniques au niveau attendu, mais semble mettre en évidence un manque de neutrinos du type muonique. Et l'expérience avance un argument supplémentaire décisif. Les neutrinos atmosphériques proviennent de toutes les directions, puisqu'ils sont

produits tout autour de la terre. Ceux reconstruits comme venant « d'en haut » naissent dans l'atmosphère directement située au-dessus du site expérimental. Ils ont parcouru environ 10 km avant d'être détectés. Ceux provenant « d'en bas » sont produits aux antipodes et ont donc parcouru de l'ordre de 10000 km avant d'atteindre le dispositif expérimental. Or le déficit se manifeste pour les ν_μ « d'en bas », qui ont traversé toute la terre, c'est-à-dire les neutrinos ayant parcouru de longues distances avant leur détection. La **figure 5** explicite quantitativement le résultat en montrant la distribution en angle zénithal. Le déficit est apparent à $\cos\theta = -1$.

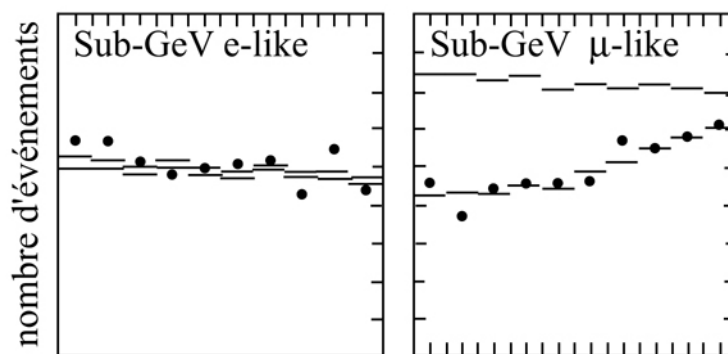


Figure 5 : Distribution en angle zénithal des interactions de neutrinos atmosphériques montrant le déficit des ν_μ montant.

Neutrinos solaires et atmosphériques ont donc bien été mis en évidence, mais dans les deux cas, le flux mesuré présente une anomalie en regard du flux attendu. Le fait de trouver un accord à un facteur 2 près entre des mesures délicates et des prédictions difficiles est déjà une grande réussite. Pourtant les physiciens ne s'en contentent pas et cherchent à comprendre ce désaccord.

On mesure moins de neutrinos que prévu, une partie semble avoir disparu entre la source de production et le point de détection. À moins que certains, au cours de leur voyage, n'aient changé de type. En effet les détecteurs actuels de neutrinos solaires ne sont sensibles qu'aux ν_e et il se pourrait que les ν_e produits à l'intérieur du soleil se soient convertis en ν_μ avant d'atteindre la terre. De même, les indications de SuperKamiokande peuvent s'interpréter comme une conversion de ν_μ en ν_τ qui échappe à la détection, sur des distances de l'ordre du diamètre terrestre.

Ce phénomène dans lequel un type de neutrino se transforme spontanément en un type différent est appelé oscillation. C'est un processus permis en mécanique quantique dès lors que les neutrinos ont une masse. La probabilité du phénomène dépend de la différence des masses carrées entre les neutrinos oscillants. Ce mécanisme revêt beaucoup d'importance, car il permet de sonder des différences de masses très petites, inaccessibles par tout autre moyen. Or la question qui se pose actuellement sur les neutrinos concerne précisément leur masse, et on sait seulement que si elle y a, elle doit être minuscule.

L'interprétation communément admise du déficit des ν_e solaires par le phénomène d'oscillations amène à une relation entre les masses m_1 et m_2 des états propres correspondant aux ν_e et ν_μ : $m_2^2 - m_1^2 = 5.10^{-5} \text{ eV}^2$. Pour les neutrinos atmosphériques, le déficit des ν_μ observé suggère une seconde relation entre les masses des neutrinos oscillants: $m_2^2 - m_1^2 = 3.10^{-3} \text{ eV}^2$. Elle s'applique a priori aux états propres correspondant au couple ν_μ et ν_τ .

La recherche d'oscillations est un domaine très actif, et plusieurs générations d'expériences en ont cherché les effets, soit auprès de réacteurs, soit auprès d'accélérateurs sans les mettre en évidence. La situation actuelle n'est pas entièrement claire et une confirmation du signal revendiqué par SuperKamiokande est attendue. Elle devrait venir de programmes en cours de réalisation, au Japon d'abord, puis au CERN et aux Etats-Unis, et qui nécessitent de grandes distances de vol pour être sensibles à de très petites masses. Ainsi, en 2005, on enverra un faisceau produit à Genève vers le tunnel du Gran Sasso près de Rome, laissant aux neutrinos 730 km pour osciller. Les détecteurs imaginés sont à la mesure du problème.

La fin de la physique ?

Au cours des cent dernières années, les progrès de la connaissance scientifique ont été spectaculaires. Tant aux confins de l'infiniment grand qu'à ceux de l'infiniment petit, environ huit ordres de grandeur ont été gagnés. On discerne aujourd'hui des détails cent millions de fois plus fins qu'il y a cent ans, et on se rapproche de l'instant même du Big-Bang. Les frontières du connu semblent d'ores et déjà avoir atteint leurs limites. En effet, on ne peut penser aller au-delà du Big Bang, et la quête de l'infiniment petit bute de plus en plus contre le mur du gigantisme.

Indéniablement, le 20^{ème} siècle aura été le siècle de la physique. Le 21^{ème} siècle débute avec le déchiffrement du génome humain, et certains annoncent le siècle de la biologie. D'autant que la biologie est riche de promesse, certains esprits téméraires allant jusqu'à envisager l'immortalité, alors que les retombées de la physique des astroparticules semblent illusoire, et que le domaine apparaît comme un simple passe-temps de physiciens.

Pourtant la physique n'a pas révélé tous ses secrets. Nous sommes peut-être à l'aube d'une nouvelle révolution copernicienne. En effet, l'univers est, semble-t-il, rempli à 95% d'une matière sombre, détectée par les vitesses anormales de rotation d'objets célestes (**figure 6**), et d'une énergie sombre résultant d'études de supernovae lointaines et qui indiquent que l'expansion de l'univers est en accélération. Or matière et énergie sombres n'ont, semble-t-il, rien à voir avec notre matière ordinaire. L'essence même de notre monde étudié au cours des derniers siècles semble ne représenter qu'une toute petite partie de l'univers.

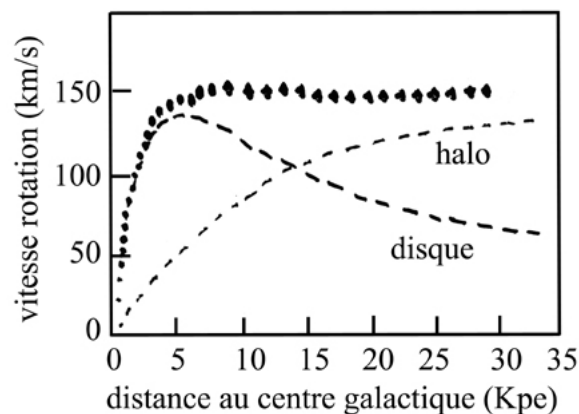


Figure 6 : Évidence de matière sombre révélée par les vitesses de rotation d'objets célestes en fonction de leur distance au centre galactique.

Pendant un temps on espérait que les neutrinos puissent expliquer la matière sombre. En effet, le scénario du Big Bang prédisant une population de neutrinos plusieurs milliards de fois plus abondante que celle des autres particules, une masse avoisinant quelques 10 eV, suffisait pour que la masse totale des neutrinos dépasse celle de la matière visible et donc influence le devenir de l'univers. Un tel scénario était privilégié avant le résultat de SuperKamiokande. Aujourd'hui, l'expérience japonaise semble indiquer une contribution marginale des neutrinos à la masse de l'Univers, quoique avoisinant la masse visible, celle constituée par l'ensemble des étoiles.

La masse sombre est donc recherchée dans d'autres directions : particules hypothétiques telles que axions ou particules supersymétriques. Quant à l'énergie sombre c'est aujourd'hui un mystère complet.

Il reste donc de grandes énigmes que la physique peut et doit résoudre, mais pour certains cette recherche apparaît comme trop ésotérique et coupée des préoccupations jugées importantes. Pourtant, dévoiler les secrets de l'univers est pour l'homme aussi exaltant que composer un poème ou une sonate. La justification d'une telle recherche est à trouver dans l'enrichissement de l'aventure humaine. Il ne faut pas brider la curiosité intellectuelle. La connaissance est un bien précieux, et on peut espérer qu'un jour, quand la science aura répondu à tous les comment de la nature, le pourquoi en deviendra un peu plus clair, or c'est bien là la question essentielle posée à l'homme.

Références :

Winter (K.) éditeur, Neutrino Physics. Cambridge University Press 1991.

Crozon (M.) et Vannucci (F.), Les particules élémentaires. « Que sais-je? » PUF 94

Vannucci (F.), Les neutrinos sur la balance, Images de la Physique/CNRS 1999.