Neutrinos de l'Univers

Les neutrinos sont des messagers nous apportant des informations cruciales de l'interieur des étoiles, comme le soleil, ou bien concernant certains phénomènes extrêmes tels que l'explosion de Supernovae de type II. En effet, lors de ces explosions 99% de l'énergie est émise en quelques secondes sous forme de neutrinos de toutes les saveurs. De tels neutrinos ont été observés pour la première fois lors de l'explosion de la Supernova 1987A, située à 50 kpc, dans le Grand Nuage de Magellan. Cette observation a apporté une première confirmation des prédictions théoriques concernant le spectre en temps et en énergie des neutrinos émis.

La mesure des neutrinos émis lors d'une nouvelle explosion nous apporterait des informations cruciales à la fois pour la physique des supernovae et pour la physique des neutrino elle-même. La difficulté principale des modèles d'explosion actuels est qu'une enorme fraction de l'énergie émise est utilisée pour photo-désintégrer le coeur de fer. Par conséquence l'onde de choc qui se forme dans le coeur, suite au collapse gravitationnel de l'étoile, n'arrive pas à éjecter les couches externes de l'étoile. Les neutrinos suivent de très près les différentes phases de l'explosion jusqu'à la formation d'une proto-étoile à neutrons ou bien d'un trou noir. La mesure précise de leur spectre en temps et en énergie nous apporterait des éléments importants pour la la compréhension du phénomène d'explosion, qui représente un défi pour les années à venir. En ce qui concerne les neutrinos, leurs propriétés (e.g. oscillations, moment magnétique) modifient la propagation dans l'étoile et mélangent les spectres à l'émission. Il est donc essentiel de prendre en compte ces aspects pour comprendre à la fois ce qui se passe dans l'étoile et pour extraire l'information relevante du signal produit par une explosion éventuelle. Par exemple on a récemment montré que les neutrinos électroniques pourraient avoir un spectre en énergie plus "chaud" (environ 20 MeV) que celui prévu selon les modèles actuels des supernovae (environ 10 MeV). Ceci est une conséquence de l'effet MSW où le couplage des neutrinos avec la matière dans la supernova modifie le phénomène d'oscillation. En particulier les spectres des neutrinos en sortie de l'étoile dépendent de la valeur des angles de mélange. En mesurant l'énergie moyenne de ces neutrinos on pourrait apprendre si $\sin^2\theta_{13} << 10^{-3}$ ou $\sin^2\theta_{13} >> 10^{-3}$. De même, le couplage du moment magnétique des neutrinos aux champs magnétiques dans la supernova modifierait de façon significative le spectre observé des neutrinos, et de manière différente selon qu'il s'agisse de particules de Majorana ou de Dirac. Si les neutrinos sont des particules de Majorana, on pourrait avoir des changements de chiralité ($\nu_L \leftrightarrow \nu_R$) ainsi que des oscillations ($\nu_{L,R} \rightarrow \bar{\nu}_{L,R}$). Ce phénomène s'ajoute à l'effet MSW.

Les exemples précédents illustrent les liens étroits entre la physique des neutrinos, l'étude des sources astrophysiques et la compréhension de l'Univers. Nombre d'informations cruciales concernant les propriétés des neutrinos proviennent de sources astrophysiques et/ou de la cosmologie. Celles-ci incluent, par exemple, des limites sur le nombre des neutrinos légers, sur leur masse, sur leur temps de vie, ou encore sur leur moment magnétique, qui sont autant d'informations très précieuses pour les expériences sur terre. Il faut cependant noter que ces dernières sont souvent modèle-dépendantes et ne peuvent remplaçer les mesures directes.

Certaines des propriétés des neutrinos d'intérêt astrophysique pourront être étudiées par des expériences en laboratoire dans les années 2004-2015. En particulier, une installation beta-beam de basse énergie permettrait d'avoir des flux intenses et purs de neutrinos dont le spectre est bien connu. Deux configurations sont possibles: soit les ions sont produits, collectés et utilisés en tant que source de neutrinos; soit les ions sont produits, accélérés à basse énergie et collectés dans un anneau de stockage pour produire un faisceau de neutrinos. Une telle installation permettrait de réaliser un programme de physique riche. En particulier, des propriétés intrinsèques tels que le moment magnétique des neutrinos ou bien leur interaction avec les noyaux, d'intérêt pour la physique nucléaire, la physique des neutrinos et l'astrophysique pourrait être étudiées en détail. En particulier, ces réactions jouent un rôle important dans la comprehénsion de la nucléosynthèse des éléments lourds lors du processus r. Le spectre en énergie des neutrinos produits en accélérant les ions à $\gamma = 7 - 14$ couvre le domaine des neutrinos émis par les supernovae de type II. Plusieurs laboratoires disposeront de faisceaux intenses d'ions exotiques et offrent des sites possibles pour une installation beta-beam de basse énergie. Le CERN est particulièrement attrayant, à la fois pour les énergies et les intensités pouvant être atteintes dans le cadre d'un projet de beta-beam de haute énergie.

Plusieurs détecteurs de neutrinos fonctionneront d'ici à 2015 et peuvent être utilisé en tant qu'observatoires

pour les neutrinos provenant des supernovae de type II. Dans l'hypothèse d'une explosion dans notre galaxie, plusieurs dizaines de milliers d'événements seraient collectés par des détecteurs comme SNO, SK ou OMNIS, et environ 10^5 événements pourraient être observés dans un éventuel détecteur de type Mégatonne. De plus, un tel détecteur pourrait permettre l'observation d'explosions extra-galactique. Il est intéressant de remarquer que certains de ces détecteurs pourraient également permettre de mesurer le fond diffus de neutrinos émis lors de l'explosion de supernovae dans le passé.

Position de la France, potentiel humain