



Foreword

Ever since the Man first looked at the stars, he has found himself submerged in an intense radiation of stellar neutrinos. In spite of their abundance in the Universe, neutrinos have remained the most elusive and, probably, the most mysterious of all elementary particles. Their existence was postulated by Wolfgang Pauli in 1930 in order to explain an apparent lack of conservation of energy and angular momentum in nuclear β -decays, but they remained unobservable for many long years. Indeed, their interactions with matter are so weak that they can cross the Earth suffering only marginal attenuation. Only very gradually have physicists learned how to study them systematically. We thus learned that there exist three distinct neutrino species (electron-neutrinos, muon-neutrinos and tau-neutrinos) and we thought that they were all massless. One of the first results of the Large Electron–Positron collider LEP at CERN in 1990 was the absolute determination of the number of light neutrino species.

However, a series of recent discoveries showed that nature can be more subtle. Not only are neutrinos massive, but also the three species are not totally distinct. During their propagation they transform into each other in perpetual oscillations among the three species – a marvelous example of the fundamental laws of quantum mechanics. The precise values of their masses are not yet known; they are smaller than anything we have been able to measure. Many physicists think that they may lead us to new, still unknown, physics. It seems, indeed, that we have not yet uncovered all their secrets.

In this volume we have tried to present the state of the art, both theoretical and experimental, in this new and exciting field. The reader will find comprehensive review articles written by leading experts, which show the progress we have already made and the road that still lies ahead of us.

Jacques Bouchez introduces the subject and describes the mechanism of neutrino oscillations. He summarizes the values of the oscillation parameters between the three species obtained from the present experimental results. Oscillation implies non-vanishing neutrino masses and the possible theoretical implications are presented in the article by Pierre Ramond. He shows that the probable very tiny values of their masses may point the way to new physics at energy scales far beyond the reach of our accelerators.

We then proceed with the two fields which established experimentally neutrino oscillations in the past seven years, solar neutrinos and atmospheric neutrinos. Michel Cribier and Tom Bowles review 40 years of extensive and fascinating studies of the solar neutrinos, starting with the so-called solar neutrino puzzle, i.e. the deficit of experimentally observed neutrinos compared to the predictions of models built by astrophysicists. The solution came in 2001, with the beautiful result from the Sudbury Neutrino Observatory (SNO). SNO proved not only that electron-neutrinos produced in the core of the Sun were oscillating, but also that our understanding of the origin of the energy of the Sun, nuclear reactions initiated by proton–proton fusion, was correct. Takaaki Kajita and Paolo Lipari then address atmospheric neutrinos produced in the upper atmosphere by the interaction of cosmic rays. It has been shown in 1998 by SuperKamiokande that muon-neutrinos produced at the antipodes of the detector had time to oscillate into tau-neutrinos.

Other sources of neutrinos exist on Earth. Neutrinos were discovered in 1956 by Reines and Cowan close to the Savannah River power plant. Thierry Lasserre and Henry Sobel review neutrinos produced by nuclear reactors, up to the results of the Chooz experiment (French Ardennes) which reinforced the SuperKamiokande discovery and of the KamLAND experiment which reinforced the solution of the solar neutrino puzzle. They present also the Double Chooz experiment, which is planned to better constrain or measure the last unknown parameter driving neutrino oscillations. The same detectors are also sensitive to geochemical neutrinos, coming from the terrestrial radioactivity. The future of the neutrinos will come largely from experiments using neutrinos produced by accelerators and this perspective is drawn by Dario Autiero and Yves Déclais. Among the questions to be answered is CP violation in the lepton sector.

Neutrino oscillations proved that neutrinos are massive, but they only determine differences of masses squared. Christian Weinheimer presents the quest for direct determination of the mass with beautiful experiments. Access to the mass but also the important question “is the neutrino its own antiparticle” (i.e., Majorana type or Dirac type) can be solved by observing double

beta decay without neutrinos. Serge Jullian presents the theoretical arguments and all the efforts made by experimentalists to track such rare events by reducing the background to incredibly low levels.

Neutrinos are abundantly produced in the Universe, not only in stars like the Sun. They are witnesses of the death of massive stars when they explode to form a supernova and some tens of neutrinos of the supernova SN1987A were observed in February 1987; this fascinating chapter is unfortunately not present in this volume. But neutrinos are also produced in quasars or active galactic nuclei, consisting of a central black hole, an accretion disk and two jets of energetic particles. Only gamma-rays from these powerful objects have been observed up to now. Stephan Hundertmark and Antoine Kouchner present the projects built to detect these neutrinos, km³ scale detectors in the ice of the South pole or deep in the Mediterranean sea.

Last but not least, the important role played by neutrinos in cosmology is reviewed by Wilfried Buchmüller. Though relic neutrinos issued from the big bang are 300 per cm³ in the Universe, their contribution to the density of the Universe is negligible. However, they influence significantly the formation of large structures, nucleosynthesis and baryogenesis in the early Universe.

Avant-propos

Depuis que l'Homme regarde le ciel, il est irradié en permanence par un flux intense de neutrinos venus des étoiles. Très abondants dans l'Univers, les neutrinos restent les plus insaisissables et, probablement, les plus mystérieuses de toutes les particules élémentaires. Leur existence a été postulée par Wolfgang Pauli en 1930 pour expliquer la non conservation apparente de l'énergie et du moment angulaire dans les désintégrations β , mais ils sont restés inobservés pendant de longues années. En effet, leur interaction avec la matière est si faible qu'ils peuvent traverser la Terre en ne subissant qu'une atténuation marginale. Ce n'est que très progressivement que les physiciens ont appris comment les étudier de manière systématique. Ils ont alors découvert qu'il existait trois espèces différentes de neutrinos (les neutrinos électroniques, les neutrinos muoniques et les neutrinos tauiques) et nous pensions qu'ils avaient une masse nulle. En 1990, un des premiers résultats du grand collisionneur électron-positron du CERN, le LEP, fut précisément de déterminer de manière absolue le nombre de neutrinos légers.

Une série de découvertes récentes a montré que la Nature peut être encore plus subtile. Non seulement les neutrinos ont une masse, mais les trois espèces ne sont pas complètement distinctes. Durant leur propagation, les neutrinos se transforment de l'un à l'autre dans une oscillation perpétuelle entre les trois espèces. Il s'agit d'une magnifique illustration des lois fondamentales de la mécanique quantique. Les valeurs précises de leur masse ne sont pas encore connues, mais elles sont beaucoup plus petites que tout ce qu'on a pu mesurer jusqu'ici. Beaucoup de physiciens pensent que tous ces résultats peuvent nous conduire à une nouvelle physique, au-delà du modèle standard actuel de la physique des particules. Il semble en effet que les neutrinos ne nous aient pas encore dévoilé tous leurs secrets.

Dans ce numéro, nous avons essayé de présenter l'état de l'art, à la fois théorique et expérimental, sur ce passionnant domaine de recherche. Le lecteur trouvera des articles de revue complets écrits par des experts connus, qui montrent à la fois les progrès faits ces dernières années et les perspectives qui s'ouvrent devant nous.

Jacques Bouchez introduit le sujet et décrit le mécanisme de l'oscillation des neutrinos. Il résume les valeurs des paramètres de l'oscillation entre les trois espèces, directement contraintes par les résultats expérimentaux actuels. L'oscillation implique une masse non nulle pour les neutrinos et les conséquences théoriques possibles sont présentées dans l'article de Pierre Ramond. Il montre que les valeurs probablement très faibles des masses sont le signe d'une nouvelle physique à des échelles d'énergie bien au-delà de nos accélérateurs actuels.

Nous abordons ensuite les deux domaines expérimentaux qui ont permis d'établir, au cours de ces sept dernières années, que les neutrinos oscillaient, les neutrinos solaires et les neutrinos atmosphériques. Michel Cribier et Tom Bowles brossent le panorama de 40 années de recherches captivantes sur les neutrinos solaires. Tout a commencé en 1968 avec le célèbre problème des neutrinos solaires, c'est-à-dire le déficit observé expérimentalement par rapport aux prédictions des modèles construits par les astrophysiciens. La solution est venue en 2001, avec le magnifique résultat de l'Observatoire neutrino de Sudbury (SNO). SNO a démontré non seulement que les neutrinos électroniques produits au cœur du Soleil oscillaient, mais aussi que notre compréhension de l'origine de l'énergie du Soleil, des réactions nucléaires initiées par la fusion de deux protons, était correcte. Takaaki Kajita et Paolo Lipari présentent ensuite les neutrinos atmosphériques, produits dans les hautes couches de l'atmosphère par l'interaction des rayons cosmiques. SuperKamiokande a montré en 1998 que les neutrinos muoniques produits aux antipodes du détecteur avaient le temps d'osciller en neutrinos tauiques.

D'autres sources de neutrinos existent sur Terre. Les neutrinos ont été découverts en 1956 par Reines et Cowan auprès du réacteur nucléaire de Savannah River. Thierry Lasserre et Henry Sobel présentent les recherches avec les neutrinos issus des centrales nucléaires, jusqu'au résultat de l'expérience de Chooz (Ardennes), renforcé par la découverte de SuperKamiokande et à celui de KamLAND, qui a conforté la solution de l'énigme des neutrinos solaires. Ils présentent également l'expérience Double Chooz actuellement en préparation. Elle prévoit de mieux contraindre ou de mesurer le dernier paramètre inconnu qui gouverne l'oscillation des neutrinos. Les mêmes détecteurs sont également sensibles aux neutrinos géochimiques, issus de

la radioactivité terrestre. Le futur des neutrinos viendra beaucoup des expériences utilisant les neutrinos produits auprès des accélérateurs et cette perspective est présentée par Dario Autiero et Yves Déclais. Parmi les questions en suspens, la violation de CP dans le secteur leptonique.

Les oscillations des neutrinos ont prouvé que les neutrinos avaient une masse, mais, ne déterminant que des différences de masses carrées, n'ouvrent pas l'accès aux valeurs absolues. Christian Weinheimer présente les belles expériences de mesure directe de la masse. L'accès à la masse, mais aussi la question importante « le neutrino est-il sa propre antiparticule » (c'est-à-dire particule de Majorana et pas de Dirac) peuvent être obtenus par les expériences de désintégration double beta sans neutrinos. Serge Jullian présente les arguments théoriques et tous les efforts faits par les expérimentateurs pour rechercher des événements très rares en réduisant le bruit de fond à un niveau incroyablement bas.

Les neutrinos sont abondamment produits dans l'Univers, pas seulement dans les étoiles comme le Soleil. Ils sont témoins de la mort des étoiles massives lorsqu'elles explosent en supernova, et une vingtaine de neutrinos de la supernova SN1987A ont été observés en février 1987. Ce chapitre fascinant n'est malheureusement pas présent dans ce volume. Mais les neutrinos sont également produits dans les quasars ou noyaux actifs de galaxie, constitués d'un trou noir central, d'un disque d'accrétion et de deux jets de particules d'énergie très élevée. Jusqu'ici, seul le rayonnement gamma de ces objets puissants a été observé. Stephan Hundertmark et Antoine Kouchner présentent les projets en construction pour détecter les neutrinos des quasars, des détecteurs à l'échelle du km^3 dans la glace du pôle Sud ou fond de la Méditerranée.

Pour terminer, le rôle important des neutrinos en cosmologie est présenté par Wilfried Buchmüller. Bien que les neutrinos fossiles issus du big bang soient au nombre de 300 par cm^3 dans tout l'Univers, leur contribution à la densité de l'Univers est négligeable. Pourtant, ils influencent considérablement la formation des grandes structures, la nucléosynthèse et la baryogénèse de l'Univers primordial.

Jean Iliopoulos
Laboratoire de Physique Théorique de l'ENS
24, rue Lhomond
75231 Paris cedex 05
France
E-mail address: ilio@lpt.ens.fr (J. Iliopoulos)

Daniel Vignaud
Astroparticule et Cosmologie (APC)
11, place Marcelin Berthelot
75231 Paris cedex 05
France
E-mail address: vignaud@cdf.in2p3.fr (D. Vignaud)
Available online 23 September 2005