Document du groupe de travail
Propriétés des neutrinos

Groupe de travail

Dario Autiero (IPNL, Lyon), Alain Méric de Bellefon (PCC, Paris), Jacques Bouchez (DAPNIA, Saclay), Jean-Eric Campagne (LAL, Orsay), Christian Cavata (DAPNIA, Saclay), Hervé De Kerret (PCC, Paris), Dominique Duchesneau(LAPP, Annecy), Jacques Dumarchez (LPNHE, Paris), Ioannis Giomataris (DAPNIA, Saclay), Thierry Lasserre (DAPNIA, Saclay), Stephane Lavignac (SPht, Saclay) Thomas Patzak(PCC, Paris), Fabrice Piquemal (CENBG, Bordeaux), André Rougé (LLR, Palaiseau), Xavier Sarazin(LAL, Orsay), Sylvaine Turck-Chièze (DAPNIA, Saclay), Cristina Volpe (IPNO, Orsay)

Synthèse

La physique des neutrinos vient de connaître une décade riche en découvertes. Alors que le Modèle Standard, le paradigme actuel de la physique des particules, impose des neutrinos de masse nulle, les observations combinées des déficits de neutrinos solaires, atmosphériques, de réacteurs et d'accélérateurs conduisent à l'affirmation aujourd'hui solide que les 3 neutrinos connus ont des masses non nulles, différentes entre elles et très petites. Loin d'être un aboutissement, cette découverte est en réalité le point de départ d'un très riche programme de recherches et de mesures pour élucider les nombreuses inconnues restant dans ce chapitre de la physique et passer des indications actuelles à des mesures de précision.

Les questions soulevées par ce premier signe d'une physique au delà du Modèle Standard sont nombreuses et fondamentales:
Les neutrinos n'ont pas des masses nulles, mais quelles sont ces masses? Combien de saveurs de neutrinos participent aux oscillations observées? Les neutrinos sont-ils leurs propres anti-particules? Y-a-t-il, comme dans le secteur des quarks, violation de CP dans le secteur leptonique? Quel est le mécanisme générateur des masses des neutrinos? etc ...

Le programme de recherche des 10 ans à venir doit tenter de répondre à ces questions.

Les expériences d'oscillation n'étant sensibles qu'à des différences de masses carrées, la réponse à la première question ne peut être abordée directement que par 2 types de mesure: l'étude précise de la fin du spectre de désintégration β du tritium ou la recherche de double désintégration β sans neutrino. Près de 30 ans de recherches sur le spectre β du tritium ont abouti aux meilleures limites actuelles $m_{\nu_e} < 2.3eV$ (en fait une moyenne pondérée des masses des neutrinos,). Des projets existent pour gagner un ordre de grandeur en sensibilité, mais comme aucune équipe française n'a jusque là été impliquée dans ces recherches à l'instrumentation très délicate, il n'est pas souhaitable d'engager aujourd'hui un effort en ce sens.

La recherche de double désintégration β sans neutrino a l'avantage non seulement de tester l'échelle de masse absolue des neutrinos (la période des processus est inversement proportionnelle à la masse effective des neutrinos, une autre moyenne pondérée des masses des neutrinos), mais surtout elle est la seule capable de répondre à la question de savoir si les neutrinos sont leurs propres antiparticules. Et cette réponse est essentielle non seulement pour notre compréhension des neutrinos mais aussi pour notre compréhension de l'origine de la masse. Deux classes de techniques expérimentales sont utilisées ou envisagées: les expériences calorimétriques (semi-conducteurs ou bolomètres) et les expériences de tracking. Les espériences en cours (en particulier NEMO3 en France) sont de taille modeste (quelques kg d'isotope double β: ^{76}Ge, ^{130}Te, ^{100}Mo ...) et atteignent ou vont atteindre des sensibilités de 0,2 à 0,5 eV. Pour descendre vers 0,05 - 0,1 eV et tester l'hypothèse d'un spectre quasi-dégénéré de masse des neutrinos, il est nécessaire de passer à des expériences incluant de l'ordre de 100 kg d'isotope double β, avec une réduction associée des bruits de fond. Cette étape nécessite une phase de $R\&D$, mais peut être atteinte dans les 10 ans que couvre cette prospective. En Europe le réseau ILIAS/IDEA coordonne les développements et il est sans doute souhaitable de maintenir les 2 techniques complémentaires, et dont l'expertise est européenne, opérant sur différents isotopes: bolomètres segmentés (ex. CUORE) et tracking (ex. SuperNEMO). L'effort français doit être soutenu dans ce cadre. Pour aller au delà et tester le scenario de hiérarchie de masse inverse à l'échelle suggérée par les neutrinos atmosphériques (20 à 50 meV) il faut envisager des expériences sur au moins une tonne d'isotope double β: cela nécessitera une importante $R\&D$ sur la production des isotopes et sur les techniques expérimentales.

Les expériences d'oscillations ont établi le fait que les neutrinos ont des masses non nulles et se mélangent: plus de 30 ans d'expérimentations délicates ont permis ces découvertes majeures. Majeures mais encore imprécises et incomplètes : les différences de masses carrées mesurées avec les neutrinos solaires et atmosphériques ne permettent pas de préciser la hiérarchie dans le spectre des neutrinos, et seuls 2 des 3 angles de la matrice de mélange ont été déterminés. Le programme des 10 ans à venir doit donc confirmer et compléter notre compréhension du mélange des neutrinos et de leur hiérarchie de masse, et déterminer si la symétrie CP est violée par les neutrinos, comme elle l'est par les quarks.

Une confirmation directe et sur accélérateur du résultat obtenu avec les neutrinos atmosphériques fait l'objet d'une expérience majeure (OPERA) dans laquelle des groupes français sont très engagés: elle a pour but d'observer l'apparition de ν_τ dans le faiceau de ν_μ envoyé du Cern vers le Gran Sasso. Cette expérience, technologiquement très difficile, est en phase de construction et doit bénéficier d'un soutien continu. Ses premiers résultats sont attendus avant 2010. Dans le domaine des neutrinos solaires, les résultats récents ont donc tranché en faveur d'une solution où les oscillations ont lieu de façon résonante dans le soleil (effet MSW) avec un grand angle de mélange. Une ultime confirmation devrait venir de la mesure de la raie du ^7Be: c'est l'objet de l'expérience Borexino, à laquelle participe une équipe française. Au delà, une mesure précise de l'ensemble du spectre des neutrinos solaires (en particulier les neutrinos pp) reste à réaliser. Elle permettrait de mettre des contraintes sur des phénomènes secondaires comme l'influence du champ magnétique solaire sur le moment magnétique du soleil. Si des progrès astrophysiques dans ce domaine sont attendus dans les 5 prochaines années, l'investissement des physiciens des particules français est peu important et le restera sans doute.

La première pièce manquante de la matrice de mélange des neutrinos est l'angle θ_{13}, pour lequel nous savons seulement qu'il est plus petit que 10^o (résultat de l'expérience CHOOZ). Sa valeur est non seulement importante en soi, mais elle conditionne l'observabilité d'une

éventuelle violation de la symétrie CP par les neutrinos. Différentes approches sont possibles, voire complémentaires, pour mesurer ce paramètre.
- D'une part, les expériences de confirmation sur accélérateur des oscillations de neutrinos atmosphériques atteindront une sensibilité de l'ordre de 5^o (vers 2010).
- D'autre part une expérience auprès d'un réacteur nucléaire (de type CHOOZ améliorée) peut gagner jusqu'à un ordre de grandeur en sensibilité sur $sin^2 2\theta_{13}$ à échéance assez courte (vers 2010). Plusieurs projets sont à l'étude dans le monde, dont un sur le site de CHOOZ et qui a fait l'objet d'une proposition d'expérience: Double-CHOOZ, avec la participation de groupes français. Bâti sur l'expérience acquise avec CHOOZ, en particulier sur la maîtrise et la réduction des bruits de fond, le projet peut assez rapidement déboucher, s'il bénéficie d'un bon soutien d'EDF et d'une collaboration renforcée.
- Plus sensibles mais à un peu plus long terme (premiers résultats attendus vers 2012 pour le projet T2K au Japon), les projets de recherche d'oscillations à grandes distances avec des superfaisceaux ouvrent la possibilité, en cas de résultat positif, d'une étude plus détaillée ouvrant la voie à la mesure de la violation de CP. Deux projets se développent dans le monde: T2K au Japon et NUMI-off axis aux Etats Unis. Les groupes européens ont majoritairement privilégié T2K dont la dynamique et le calendrier semblent plus fiables.

Avant même de connaître le résultat de ces projets, il est clair que la meilleure sensibilité à l'ensemble des paramètres des oscillations sera obtenue grâce à des expériences alliant un détecteur de la classe megatonne à un faisceau alimenté par un proton driver de quelques megawatts. Des *R&D* intenses sont nécessaires (et entamées au Japon, aux USA et en Europe) sur les faiseaux de protons, d'ailleurs communs à d'autres domaines de physique nucléaire et de physique des particules. De même des *R&D* sont indispensables pour les détecteurs souterrains qui devront être polyvalents et se préoccuper de durée de vie du proton, de neutrinos solaires, de neutrinos de supernovae ou de neutrinos atmosphériques. Là encore des études sont menées au Japon, aux USA et en Europe. En Europe, le Cern décidera en 2010 de l'opportunité de se doter d'un faisceau de protons de très haute intensité et d'un superfaisceau de neutrinos et les foreuses devraient achever le percement du tunnel de secours du Fréjus en 2009 ... et être disponibles pour y creuser la caverne d'un détecteur megatonne. Il est donc essentiel que les groupes européens - en particulier français - consacrent un effort soutenu à la préparation de ces possibilités.

Si l'angle θ_{13} est trop petit et pour une étude détaillée de la violation de CP, seules des machines plus performantes comme les usines à neutrinos et les beta-beams (faisceaux d'ions radioactifs) permettront de bien séparer les effets de matière des oscillations proprement dites. Ces machines ultimes doivent être inscrites dans un programme de développement international: en Europe, le réseau CARE (et ses branches BENE ou HIPPI) coordonne cet effort. Il est important que les groupes français continuent d'y collaborer.

L'ensemble des programmes défendus ci-dessus est placé dans un cadre à 3 neutrinos actifs: il ignore donc l'indication positive d'une oscillation vue par l'expérience LSND et qui ne serait compatible avec les autres résultats qu'au prix d'un neutrino stérile supplémentaire. Ce résultat est actuellement en cours de vérification par l'expérience MiniBooNE à Fermilab. Aucun groupe français n'y est associé, mais il est évident que si le résultat de LSND était confirmé, il bouleverserait complètement le paysage et les groupes français s'associeraient pour participer à caractériser ce phénomène.

Au delà de leurs propriétés intrinsèques, l'étude et la détection des neutrinos permet d'aborder d'autres domaines comme la physique nucléaire, l'astrophysique ou la cosmologie. Les neutrinos solaires ont été à cet égard particulièrement riches. L'étude des supernovae, de ce point de vue multidisciplinaire, pourrait dans les 10 ans qui viennent se révéler aussi productive. Il n'existe pas de modèle viable d'explosion de SN de type II et l'observation des spectres précis en temps et en énergie des quelques 10^5 neutrinos d'une SN galactique dans un détecteur megatonne serait cruciale pour contraindre ces modèles. Mais des mesures spécifiques d'interactions de neutrinos avec des noyaux d'intérêt astrophysique sont aussi nécessaires pour progresser sur la compréhension de la nucléosynthèse des éléments lourds par exemple. Des faisceaux d'ions radioactifs intenses seront disponibles dans les années à venir et devraient être utilisés à cet effet. Les faisceaux et les detecteurs restent à concevoir.

Enfin, il faut rappeler que l'effort théorique a joué un role fondamental dans la physique du neutrino (développement du formalisme des oscillations incluant les effets de propagation dans la matière, calcul du flux des neutrinos solaires, effet des neutrinos sur la nucléosynthèse primordiale ...). Dans une période expérimentale à venir très dense, ces efforts doivent être soutenus voire même amplifiés, en particulier en France, autour de la phénomenologie des neutrinos (oscillations, mais aussi calcul des éléments de matrice nucléaire pour la double désintégration β), de la connection des masses des neutrinos avec l'asymétrie matière-antimatière de l'univers (à travers la leptogénèse) ou du mécanisme de génération des masses. Les échanges avec les expérimentateurs, par exemple à travers la structure d'un GDR doivent être renforcés pour permettre l'intégration des résultats et développements à l'ensemble des disciplines touchées par la physique du neutrinos.