

Le programme neutrino

Depuis la découverte des neutrinos, l'existence d'une masse non nulle pour ces particules a suscité un intérêt toujours grandissant. De telles masses associées à des transitions entre les différents saveurs de neutrinos (qui doivent en général les accompagner) seraient un signe de Grande Unification. Dans l'approche théorique actuelle du Modèle Standard, elles seraient reliées à l'échelle d'énergie intermédiaire, entre l'échelle de brisure de symétrie électrofaible et l'échelle de Planck, où interviendrait la nouvelle physique. Par des mesures à des énergies présentement disponibles, les neutrinos peuvent donc faire progresser les théories de Grande Unification. L'intérêt pour la masse de neutrinos est aussi un intérêt cosmologique : le neutrino est le seul candidat pour la matière cachée chaude dont l'existence ne soit pas hypothétique.

L'observation du phénomène d'oscillations des neutrinos permet de déceler expérimentalement à la fois des transitions de saveur et des masses non-nulles parmi les neutrinos. L'annonce en 1998 de l'observation d'une oscillation $\nu_m - \nu_t$ par l'expérience de Super Kamiokande a encore davantage rehaussé l'intérêt dans ce domaine de recherche.

Depuis 1991, le laboratoire est engagé dans les recherches d'oscillations de neutrinos auprès des accélérateurs du CERN par sa participation à l'expérience NOMAD. Cette expérience est motivée par l'espoir que le ν_t (le plus lourd dans la hiérarchie de masse supposée des neutrinos) aurait une masse "cosmologique" de quelques électrons-volts ce qui conduirait à des oscillations avec apparition de ν_t dans le faisceau ν_m du CERN.

Expérience NOMAD auprès du faisceau de neutrinos du SPS du CERN

Participation du LAPP

Physiciens : J-M. Gaillard, G. Bassompierre, M. Gouanère, J-P. Mendiburu, P. Nédélec, H. Pessard, D. Sillou

Doctorants : V. Valuev, A. Krasnoperov

Stagiaire : C. Girard

Collaboration

Collaboration internationale regroupant 24 instituts dont 3 laboratoires français : LAPP Annecy, LPNHE Université Paris 6 et 7, CEA-DAPNIA Saclay

Dates clés

1991: Acceptation de l'expérience par les Comités du CERN

1994: Début des prises de données

1998: Fin de la prise de données

Abstract

The NOMAD (WA96) experiment is searching for the neutrino oscillations $\bar{\nu}_\mu \leftrightarrow \bar{\nu}_\tau$ and $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ at the CERN Wide Band neutrino beam. The LAPP group has in charge the operation and the exploitation of the Transition Radiation Detector (TRD) of the experiment, which is used to separate electrons and pions with a pion rejection factor greater than 1000. It is fully operational since 1994 and it has immediately demonstrated its excellent performance for the signature of electrons for the efficient rejection of other charged particles.

We have developped the software programs for TRD and for the particle identification. We have also important responsibilities in the general reconstruction programs of the experiment and in the processing of data and Monte-Carlo. The group is involved in the analysis of the data, looking for both oscillations $\bar{\nu}_\mu \leftrightarrow \bar{\nu}_\tau$ and $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ with a special emphasis on both the electronic and 1 prong hadronic channels.

L'expérience NOMAD

L'expérience NOMAD recherche les oscillations de neutrinos $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ et $\bar{\nu}_\mu \leftrightarrow \bar{\nu}_\tau$ auprès du faisceau de neutrinos large bande du CERN. Elle utilise une cible active d'environ 3 tonnes, constituée de 44 chambres à dérive de faible densité ($\rho < 0.1 \text{ g/cm}^3$), totalisant une longueur de radiation ($1X_0$), ce qui lui confère une granularité de l'ordre de 150 μm .

La recherche du τ produit par courant chargé (CC) : $\nu_\tau + N \rightarrow \tau + X$, se fait par l'identification de ses produits de désintégration et par l'application de critères topologiques et cinématiques. Ainsi l'expérience NOMAD est sensible à environ 85% des modes de désintégration du τ . Nous pouvons en particulier mesurer la désintégration électronique, mais il faut pour cela disposer d'une excellente signature des électrons : un facteur de rejet pion/électron de 10^5 pour l'ensemble du détecteur est en fait nécessaire. Ce facteur est atteint grâce à l'association de plusieurs détecteurs, dont le détecteur de rayonnement de transition (TRD) qui contribue pour un facteur de 10^3 au taux de rejection.

La mesure de l'oscillation $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ se fait par la recherche d'un excès de ν_τ par rapport à la composition du faisceau. Cette recherche est rendue possible grâce là aussi à l'excellente identification des électrons que permet le détecteur, notamment le TRD.

Le détecteur à rayonnement de transition

Le détecteur à rayonnement de transition est installé dans l'aimant de NOMAD juste derrière les chambres à dérive qui constituent la cible de NOMAD. Le TRD comprend 9 modules constitués chacun d'un radiateur, qui produit en moyenne 3 photons de rayonnement de transition de quelques keV, pour un électron de 10 GeV, et d'un plan de détection composé de 176 tubes verticaux (les «pailles») remplis d'un mélange gazeux xénon-méthane. Les modules sont regroupés par paires, sauf le dernier. Chaque ensemble est suivi d'une chambre à dérive, qui permet de suivre les traces chargées jusque dans le calorimètre.

Le LAPP a conçu et réalisé la structure mécanique générale et mené la construction des 9 plans du TRD, tandis que les radiateurs étaient réalisés au CERN. Sur chacun des 9 cadres métalliques a été installé un radiateur de 315 feuilles de polypropylène de $3 \times 3 \text{ m}^2$. Pour chacun des 9 plans de détection la confection et la mise en place des 176 pailles, le tissage des fils, la réalisation de la connectique d'alimentation en gaz ainsi que l'installation des cartes d'électronique de lecture ont été réalisés au LAPP.

Le groupe a assuré en collaboration avec le CERN, la réalisation de la station de purification et de recyclage du mélange gazeux. A la fin de la prise de données, cette station a été réutilisée par l'expérience BaBar à SLAC.

L'électronique de lecture a été réalisée conjointement avec le CERN tandis que l'électronique de détection du signal a été conçue et réalisée au LAPP. Le groupe a également construit et ajusté le système de surveillance du détecteur (*Slow Control*) ainsi que la calibration de l'électronique qui permet de contrôler en permanence l'ensemble de la chaîne de lecture du signal. Il a mis au point des procédures de calibration en énergie du détecteur qui utilisent des sources de Fe^{55} fixées sur les plans de détections. Enfin le groupe a développé un programme de simulation de l'ionisation dans les couches minces de gaz ainsi que du rayonnement de transition, qui a été interfacé avec GEANT.

Le TRD a parfaitement fonctionné pendant toute la durée de la prise de données, entre 1994 et 1998. Il a démontré ses excellentes performances, avec un facteur de rejet électron/pion qui dépasse 1000 pour 90% d'efficacité aux électrons, dans le domaine d'impulsion requis, entre 1 et 50 GeV/c. Les performances du TRD sont telles que deux projets d'expériences du CERN, envisagent de le réutiliser.

Un travail original de séparation électron-pion a été réalisé autour de l'identification des particules dans le cas de topologies complexes, pour lesquelles plusieurs particules chargées se chevauchent dans le TRD (comme par exemple dans le cas de la matérialisation d'un photon en une paire e^+e^-). Ces études sont essentielles pour réduire les bruits de fond produits par les empilements de hadrons dans le TRD.

Responsabilités

Jusqu'en 1998, le groupe du LAPP a été responsable :

- du suivi du détecteur TRD, du monitoring en muons, de la calibration et de la transmission de ces données de calibration vers la base de données de NOMAD, ainsi que du contrôle des paramètres de fonctionnement et du mélange gazeux.
- de la maintenance et du développement des programmes généraux de reconstruction de NOMAD, pour les différentes plateformes (DEC/OSF, Sun/Solaris, PC-PentiumII/Linux)
- du traitement des données, de la reconstruction, du filtrage et de la production des DST, ainsi que de la distribution de l'information sur Internet aussi bien pour les données expérimentales que pour les événements Monte-Carlo.

Analyses

Le groupe est fortement impliqué dans l'analyse des données, à la fois dans la recherche de l'oscillation $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ dans le canal pion et dans les analyses des événements contenant des électrons, $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$ et $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ dans le canal électron, pour lesquelles le TRD est essentiel. L'ensemble des analyses auxquelles le groupe participe sont effectuées en aveugle.

• Recherche d'un signal d'oscillation $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ dans le canal électron.

L'étude des bruits de fond ainsi que leur réduction constitue une part importante de l'analyse. Sur la base des données de 1995, 1996 et 1997 on a pu calculer une limite sur la probabilité d'oscillation, que l'on peut convertir en limites sur les

deux paramètres de l'oscillation que sont Δm^2 , la différence des masses carrées des deux neutrinos ($\Delta m^2 = m^2(\nu_\tau) - m^2(\nu_\mu)$) et $\sin^2(2\theta)$, où θ est l'angle de mélange entre les deux saveurs de neutrinos.

• Recherche d'un signal d'oscillation $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ dans le canal hadronique 1 trace chargée.

Les études de rejet des bruits de fond des canaux électroniques ont été utilisées dans l'analyse des canaux hadroniques de désintégration du τ , notamment dans la discrimination des courants neutres (NC) et du signal. Les derniers résultats, incluant l'ensemble des prises de données ne fait apparaître aucun signal. Ceci permet de mettre une limite sur la probabilité d'oscillation (incluant les 4 années de prise de données) :

$$P(\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau) < 2.1 \cdot 10^{-3}$$

En combinant les limites sur les probabilités d'oscillations obtenues pour les différents canaux de désintégration du τ (e , μ , 1π et 3π), on obtient, pour l'analyse des données collectées en 1995, 96 et 97 :

$$P(\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau) < 0.6 \cdot 10^{-3}$$

ce qui correspond, dans la limite des grands Δm^2 (c'est-à-dire lorsque la probabilité d'oscillation n'est plus sensible qu'à l'angle de mélange) à :

$$\sin^2(2\theta) < 1.2 \cdot 10^{-3} \text{ avec } 90\% \text{ de confiance}$$

ou encore, dans la limite du mélange maximum :

$$\Delta m^2 < 1.2 \text{ eV}^2/c^4$$

Les résultats sont résumés sur la figure 1.

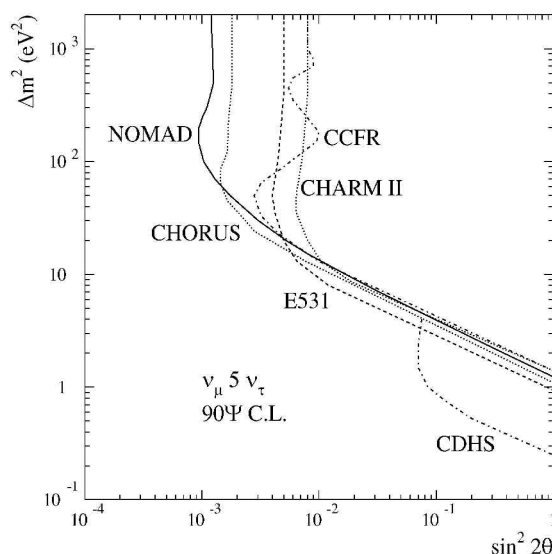


Fig. 1 : Contours d'exclusion ($\Delta m^2, \sin^2(2\theta)$) pour la recherche d'oscillation $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$. La limite de NOMAD (à 90 % de confiance) est indiquée.

• Recherche d'un signal d'oscillation $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$

Cette étude revêt un intérêt particulier depuis que l'expérience LSND de Los Alamos a publié des résultats indiquant un signal d'oscillation $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$.

Dans NOMAD cette étude s'effectue par la recherche d'un excès d'événements ayant un électron primaire dans l'état final.

La figure 2 montre la sensibilité de l'expérience NOMAD.

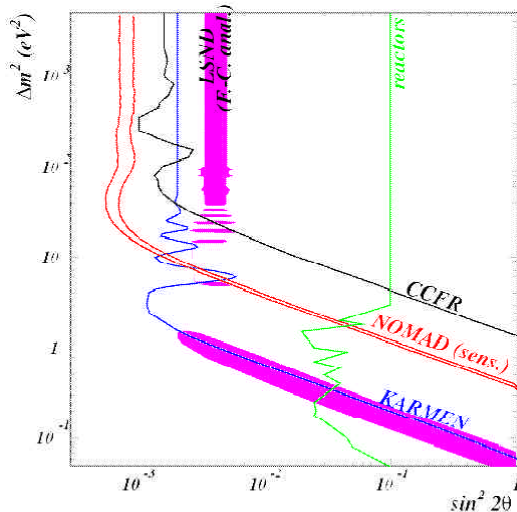


Fig. 2 : Contours d'exclusion ($\Delta m^2, \sin^2(2\theta)$) pour la recherche d'oscillation $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$. La surface sombre indique la région autorisée par LSND. La sensibilité de l'expérience NOMAD est aussi indiquée.

Sur la base des données de 1995 l'expérience NOMAD a exclu une partie de la région autorisée par LSND. La limite préliminaire pour les grands Δm^2 est :

$$\sin^2(2\theta) < 2.0 \cdot 10^{-3} \text{ avec } 90\% \text{ de confiance.}$$

Le groupe travaille particulièrement à la compréhension et à la réduction des erreurs systématiques, notamment à la compréhension du faisceau de neutrinos.

Des informations complémentaires peuvent être obtenues sur internet: <http://nomadinfo.cern.ch>.

Réseau de formation

Historique

C'est autour de l'expérience NOMAD, peu après la proposition d'expérience, en 1991, que des premiers contacts sont établis entre l'équipe NOMAD du LAPP et un groupe du Laboratoire des Problèmes Nucléaires du JINR-Dubna. Ces liens se sont renforcés à partir de 1994, essentiellement autour du travail effectué en commun pour les tests et la réalisation d'un détecteur à rayonnement de transition dans lequel un des membres du groupe de Dubna, W. Valuev, s'est beaucoup impliqué. Dans le même temps, un autre membre de ce groupe, B. Popov, travaillait en étroite collaboration avec le LPNHE Paris 6.

C'est la raison pour laquelle il a été demandé dès juillet 1994 au Ministère de l'Education Nationale, la création du Réseau de Formation et de Recherche entre ces trois laboratoires: JINR (Dubna)-LAPP (Annecy-le-Vieux)-LPNHE (Paris 6). Le réseau a été créé en février 1996 et a pu débuter en septembre 1996.

Bilan

Les participants au réseau ont travaillé sur l'expérience NOMAD, plus particulièrement sur les points suivants:

- Mise en œuvre du détecteur à rayonnement de transition, tests en faisceau, calibrations, développement des algorithmes d'analyse.
- Algorithmes de reconstruction dans les chambres à dérive (Paris 6).
- Analyse des données, en particulier recherche d'oscillation dans les voies $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$ et $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$.

Deux thèses de doctorat ont été effectuées dans le cadre du réseau :

- Search for $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ neutrino oscillations in the $\tau \rightarrow e \nu_e \nu_\tau$ decay channel in the NOMAD experiment at CERN, B. Popov, thèse préparée à l'Université de Paris 6 (sous la direction du Dr. Letessier-Selvon) et soutenue le 12 mai 1998 au LPNHE.
- Recherches des oscillations de neutrinos $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$ dans l'expérience NOMAD, V. Valuev, thèse soutenue au LAPP le 7 juillet 1998 avec félicitations du jury.

Une troisième thèse (A. Krasnoperov) est en cours d'achèvement.

Rapports internes NOMAD

Results of $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$ analysis of 1995 and 1996 Data

A. Bueno, R. Cousins, A. Krasnoperov, P. Nédélec, Yu. Nefedov, A. Rubbia, D. Sillou, V. Valuev, T. Vinogradova, Memo n° 98-016

The PADS t to one prong inclusive hadron channel analysis of the 95, 96 and 97 data

A. Bueno, P. Nédélec, Y. Nefedov, A. Rubbia, D. Sillou, V. Valuev, Memo n° 98-025

The PADS $t \rightarrow e$ analysis of the 1995, 1996, and 1997 Data

A. Bueno, R. Cousins, P. Nédélec, Yu. Nefedov, A. Rubbia, D. Sillou, V. Valuev, T. Vinogradova, Memo n° 98-026

Study of electron identification efficiency in NOMAD

A. Krasnoperov, D. Sillou, V. Valuev, Memo n° 99-007

Update of the PADS t to one prong inclusive hadron channel analysis (95, 96, 97 and 98 Data)

A. Bueno, P. Nédélec, Yu. Nefedov, J. Rico, A. Rubbia, D. Sillou, V. Valuev, Memo n° 99-013

Voir aussi liste des publications et communications à des conférences en fin de rapport.

