

Expérience NOMAD auprès du faisceau de neutrinos du SPS du CERN

Participation du LAPP

Expérimentateurs : G. Bassompierre, J-M. Gaillard, M. Gouanère, A. Krasnoperov, J-P. Mendiburu, **P. Nédélec**, H. Pessard, D. Sillou

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 a neutrino experiment looking for the neutrino oscillations $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ and $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$ at the CERN Wide Band neutrino beam. The experiment started collecting data in 1994 until the end of the neutrino beam in 1998. The large data samples (several millions events) were used to study neutrino interactions in details, leading to new limits on neutrino oscillations and improved measurements in more conventional physics (i.e. heavy quark production).

The LAPP group was responsible for the Transition Radiation Detector (TRD) of the experiment, which was used to separate electrons and pions with a pion rejection factor greater than 1.000. It was already fully operational at the beginning of the data taking, and its excellent performances for the signature of electrons and its efficient rejection power against the other charged particles were used in all the NOMAD analysis.

The group was involved in the analysis of the data, looking for both oscillations $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$ and $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ with a special emphasis on the $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$ search.

L'expérience Nomad

L'expérience NOMAD recherche les oscillations de neutrinos $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ et $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$ auprès du faisceau de neutrino 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 rejet.

La mesure de l'oscillation $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$ se fait par la recherche d'un excès d'événements ν_e observés par rapport aux prévisions concernant la composition en ν_e 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 de Nomad

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 le calibrage 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 calibrage en énergie du détecteur qui utilisent des sources de Fe^{55} fixées sur les plans de détection. 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 1.000 pour 90% d'efficacité aux électrons, dans le domaine d'impulsion requis, entre 1 et 50 GeV/c.

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.

Les performances du TRD sont telles que l'expérience NA48 du CERN, a décidé de le réutiliser pour son projet d'expérience NA48/2.

Analyses

Le groupe du LAPP a été fortement impliqué dans l'analyse des données, à la fois dans la phase de reconstruction des événements (sous la responsabilité d'un membre du groupe) que dans le travail d'analyse, avec un intérêt particulier pour des événements contenant des électrons dans l'état final. Cela nous a amené à particulièrement nous intéresser à l'analyse $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$ pour laquelle le TRD est essentiel. On notera que l'ensemble des analyses auxquelles le groupe participe ont été effectuées en aveugle.

a) Recherche d'un signal d'oscillation $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$.

La recherche de l'oscillation de neutrino $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ s'effectue dans quasiment la totalité des modes de désintégration du τ .

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, 1997 et 1998, nous avons 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 carré 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.

L'analyse des canaux hadroniques de désintégration du τ fait appel à l'utilisation de fonctions de vraisemblance multidimensionnelles afin d'optimiser la sensibilité aux oscillations.

Les études de rejet des bruits de fond menées pour l'étude des canaux électroniques ont été utilisées dans l'analyse des canaux hadroniques de désintégration du τ , notamment pour la discrimination des courants neutres (NC) et du signal.

L'analyse des canaux électronique et muonique n'a pas été modifiée depuis 1999. Les derniers résultats, combinant tous les canaux de désintégration, incluant l'ensemble des prises de données, ne font apparaître aucun signal. Ceci nous a permis de mettre une limite sur la probabilité d'oscillation :

$$P(\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau) < 1.63 \cdot 10^{-4}$$

ce qui, exprimé en termes d'oscillation à deux saveurs, 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 :

$$\sin^2(2\theta) < 1.63 \cdot 10^{-4} \text{ (avec 90\% de confiance)}$$

ou encore, dans la limite d'un mélange maximum entre saveur :

$$\Delta m^2 < 0.7 \text{ ev}^2/\text{c}^4$$

Les résultats sont résumés sur la Figure 1.

b) Recherche d'un signal d'oscillation $\nu_e \leftrightarrow \nu_\tau$

Les résultats des analyses ci-dessus peuvent être interprétées en termes d'oscillations $\nu_e \leftrightarrow \nu_\tau$ en prenant en considération la fraction de neutrinos ν_e ($\sim 1\%$) contenus dans le faisceau.

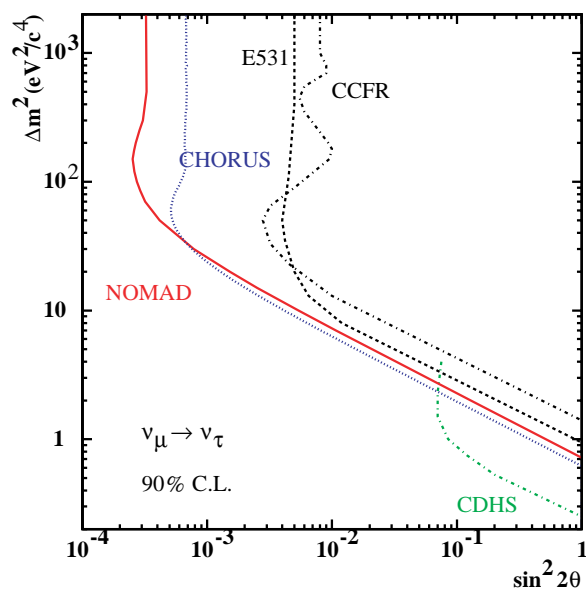


Figure 1 : Contours d'exclusion ($\Delta m^2, \sin^2(2\theta)$) pour la recherche d'oscillation $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$. La limite NOMAD (à 90 % de confiance) est indiquée et comparée aux autres expériences

Les incertitudes sur cette composante introduisent une erreur systématique supplémentaire. La probabilité d'oscillation obtenue permet de mettre des limites (avec 90% de confiance) sur l'angle de mélange : $\sin^2(2\theta) < 1.5 \cdot 10^{-2}$, ou sur l'écart entre masses : $\Delta m^2 < 0.7 \text{ ev}^2/\text{c}^4$. La Figure 2 montre les courbes d'exclusion.

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

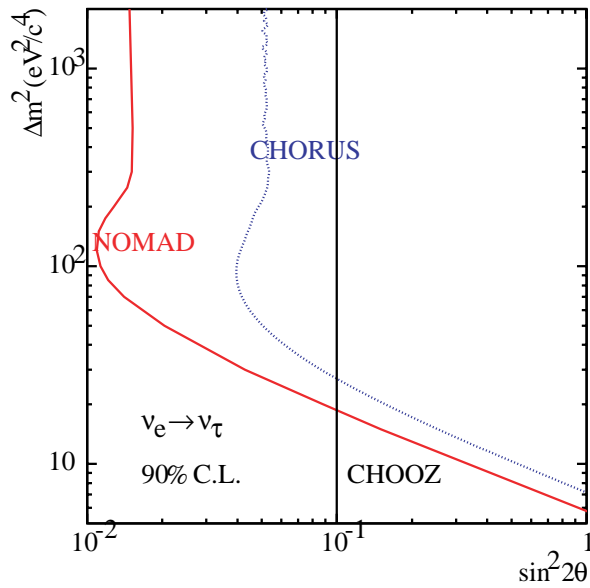


Figure 2 : Contours d'exclusion (Δm^2 , $\sin^2(2\theta)$) pour la recherche d'oscillation $\nu_e \leftrightarrow \nu_\tau$. La limite NOMAD (à 90 % de confiance) est indiquée et comparée aux autres expériences

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. Cette étude fait appel de façon très poussée au TRD. Les premiers résultats " officiels " obtenus sur la base de l'ensemble des données (1995-1998) ont été présentés cet été à la conférence EPS (1998) par V. Valuev. L'oscillation de neutrino n'est pas confirmée par NOMAD (thèse de A. Krasnoperov) dans sa zone de sensibilité. NOMAD exclu la région d'oscillation à grand Δm^2 ($\Delta m^2 > 10 \text{ eV}^2/\text{c}^4$) permise par LSND, comme indiqué sur la Figure 3.

La limite obtenue est dans la limite des grands Δm^2 :

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

et pour un mélange maximal on obtient :

$$\Delta m^2 < 0.4 \text{ eV}^2/\text{c}^4$$

Réseau de formation et de recherche JINR-LAPP-LPNHE

a) 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 de Recherches 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, V. 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 VI.

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 VI).

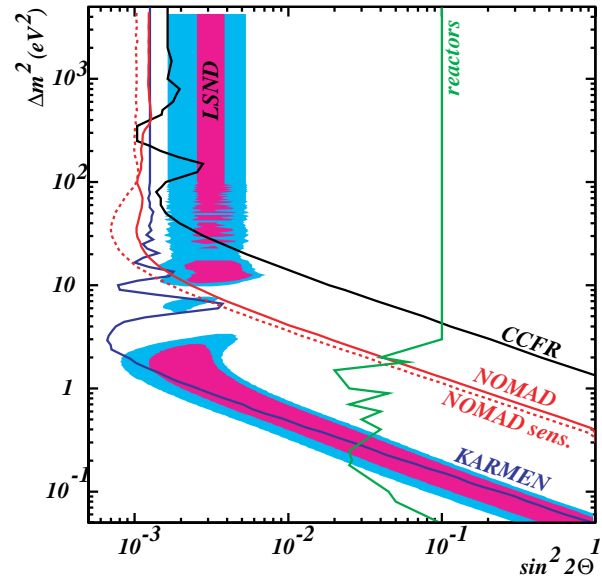


Figure 3 : Contours d'exclusion (Δm^2 , $\sin^2(2\theta)$) pour la recherche d'oscillation $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$. La surface pleine indique la région autorisée par LSND (à 99 % de confiance). La limite NOMAD (à 90 % de confiance) et d'autres expériences sont aussi indiquées

Le réseau a été créé en février 1996 et a pu débuter en septembre 1996.

b) Participants

Plusieurs physiciens du JINR-Dubna ont participé à l'activité du réseau : S. Bunyatov, A. Krasnoperov, Y. Nefedov, B. Popov, Y. Sidorov, V. Valuev.

c) 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 du côté Paris VI.
- Analyse des données, en particulier recherche d'oscillation dans les voies $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$ et $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$.

Une thèse de doctorat a été effectuée dans le cadre du réseau durant la période 2000-2001 par A. Krasnoperov.