

OPERA : LA PHYSIQUE DES NEUTRINOS ET L'ÉTUDE DE L'OSCILLATION DES SAVEURS



L'expérience OPERA a pour objectif l'étude du mécanisme de l'oscillation des neutrinos issus d'un faisceau produit au CERN et détectés à 730 km de distance dans le laboratoire souterrain du Gran Sasso en Italie. Le groupe du LAPP est impliqué dans l'exploitation du détecteur au travers des systèmes automatisés de manipulation des blocs cibles constituant la cible neutrino ainsi que dans les analyses de physique des interactions neutrino. Les résultats marquants ont consisté tout d'abord à collecter l'ensemble des données de l'expérience entre 2008 et décembre 2012, et à analyser plus de la moitié des données enregistrées qui ont conduit à l'observation de 2 événements candidats neutrino-tau en 2010 et 2012. L'analyse poursuit son cours et devrait aboutir d'ici 2015 à la preuve irréfutable de l'apparition des neutrinos-tau sur faisceau.

INTRODUCTION

La physique des neutrinos est un domaine très actif qui a fourni et continue à produire des résultats importants depuis la découverte expérimentale des oscillations avec les neutrinos atmosphériques il y a une quinzaine d'années. Les nombreux projets qui ont été réalisés depuis ont permis de conforter le cadre théorique permettant de décrire le mécanisme des oscillations neutrino au travers d'une matrice de mélange. La plupart des paramètres contenus dans ce formalisme ont pu être déterminés mais il reste toutefois un certain nombre de questions fondamentales sur les propriétés des neutrinos non encore élucidées, tels la masse des neutrinos, leur nature, y a-t-il violation de la symétrie

L'ÉQUIPE DU LAPP

PHYSICIENS

D. Duchesneau,
P. del Amo Sanchez, J. Favier,
H. Pessard, A. Zghiche

DOCTORANT

F. Brunet

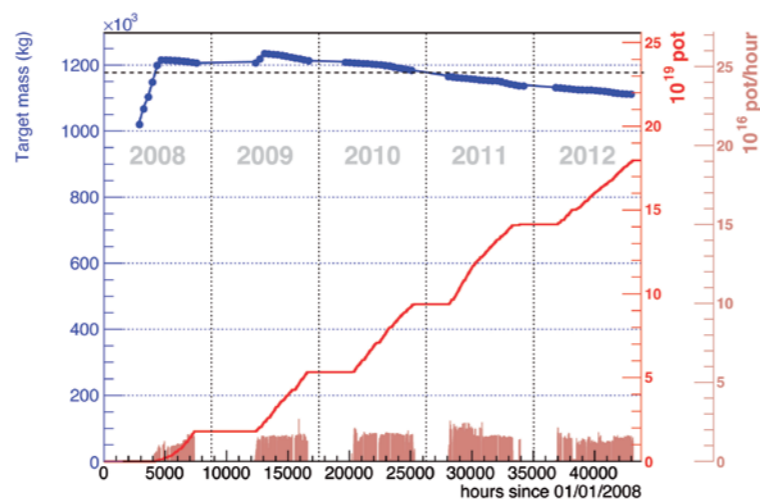
EQUIPE TECHNIQUE

L. Fournier, L. Giacobone,
J. Jacquemier, T. Le Flour,
S. Lieunard, I. Monteiro,
P. Mugnier, F. Peltier

CP dans le secteur des leptons ou y a-t-il plus de 3 types de neutrinos dans l'univers. Tenter de répondre à ces questions nécessitera encore de nombreux projets. Le groupe neutrino du LAPP a réalisé un programme de recherche axé sur l'étude du mécanisme des oscillations au sein de la collaboration internationale OPERA. L'expérience OPERA (Oscillation Project with Emulsion tRacking Apparatus) fait partie d'un programme international lancé en Europe après la découverte des oscillations des neutrinos atmosphériques. Un faisceau dédié, le CNGS (CERN Neutrinos to Gran Sasso), a été mis en œuvre au CERN pour envoyer un flux intense de neutrino-muon en direction du laboratoire du Gran Sasso (Italie) où le détecteur OPERA a été construit et a pu collecter plusieurs dizaines de milliers d'interactions neutrinos au cours des cinq années de prise de données qui s'est achevée en décembre 2012. OPERA a été conçu pour mettre en évidence l'apparition de neutrino-tau parmi les neutrino-muon du faisceau émis par le CERN, après 730 km de parcours. L'expérience doit détecter les neutrino-tau en utilisant 150 000 cibles faites de plaques de plomb et d'émulsions photographiques, complétées par un ensemble de détecteurs électroniques. OPERA étudie aussi les neutrino-électron produits dans le faisceau ou ceux pouvant venir d'une éventuelle oscillation sensible à l'angle de mélange θ_{13} .

FIGURE 1

Nombre intégré de protons sur cible (pot) du CNGS (courbe rouge) et masse cible d'OPERA (points bleus) en fonction du temps.



La prise de données a pris fin en décembre 2012 au terme de cinq années de fonctionnement du CNGS avec 18×10^{19} protons sur cible collectés. L'étape d'analyse est à son apogée, avec encore $\sim 40\%$ du total à étudier, soit plusieurs milliers d'interactions neutrino.

La figure 1 illustre les performances du faisceau, en montrant l'évolution, sur toute la période de fonctionnement du faisceau, du nombre intégré de protons sur cible (pot) du CNGS (courbe rouge) ainsi que la diminution de la masse cible d'OPERA (points bleus) due à l'extraction des blocs cibles contenant des interactions neutrinos. L'histogramme présente le nombre de pot moyen par heure.

Parmi les événements déjà examinés, deux candidats d'oscillation ont été confirmés, le premier en 2010 dans le canal de désintégration du tau en un hadron chargé et un deuxième, en 2012, dans le canal de désintégration tau en trois hadrons chargés avec un fond attendu de seulement 0.17 événement.

L'équipe du LAPP a contribué depuis le début du projet, de façon importante, à la construction du détecteur OPERA avec la réalisation du système automatisé pour installer les 150 000 cibles et extraire ensuite les cibles désignées pour analyse durant les périodes d'acquisition de données. Les physiciens du LAPP ont aussi contribué à la préparation des analyses de physique et participent activement à la prise des

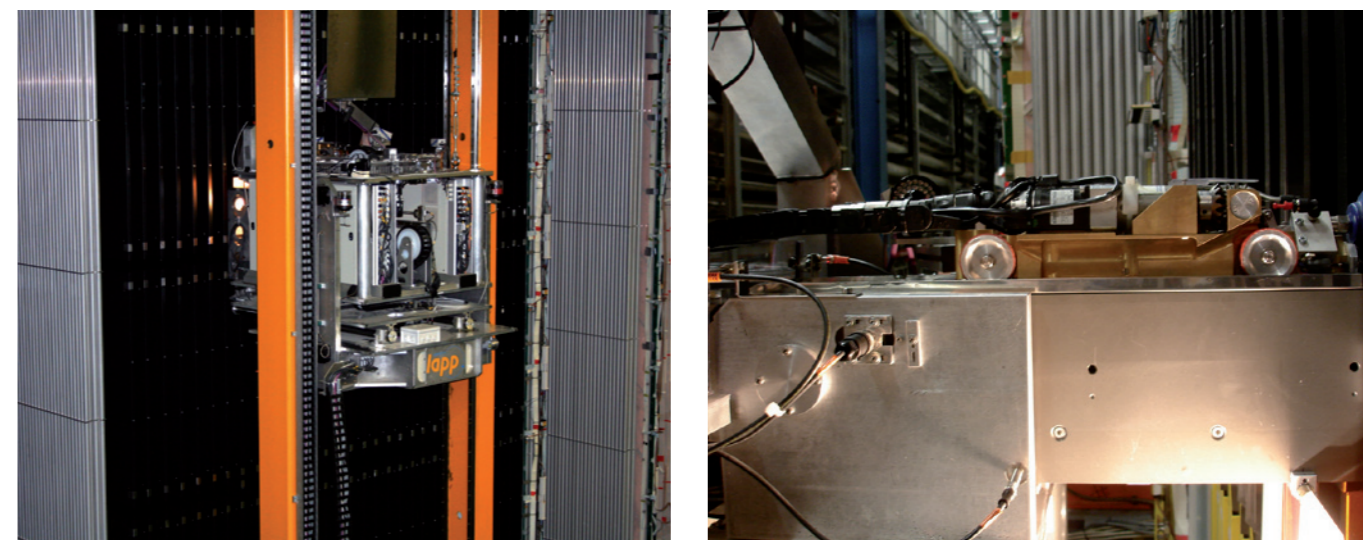
données, à leur exploitation ainsi qu'à la réalisation des publications des résultats dans des revues scientifiques.

COLLABORATION

OPERA est une collaboration internationale qui regroupe une trentaine d'instituts provenant d'une dizaine de pays et totalisant près de 140 chercheurs. Les 11 pays impliqués sont : Belgique, Croatie, France, Allemagne, Israël, Italie, Japon, Corée du Sud, Russie, Suisse et Turquie. Trois laboratoires français participent : le LAPP Annecy, l'IPN Lyon et l'IPHC Strasbourg.

ACTIVITÉS DE RECHERCHE DU GROUPE DU LAPP

L'équipe du LAPP a la pleine responsabilité des robots manipulateurs de briques depuis la préparation de l'expérience et sa construction. Ce projet essentiel pour le détecteur OPERA a mobilisé, outre la plupart des chercheurs du groupe, une équipe nombreuse d'ingénieurs et de techniciens en mécanique, en automatisation et en informatique. Il s'est poursuivi avec la gestion et le suivi des éléments des cibles au cours des années de prise de données. Dans l'analyse des données, les chercheurs participent au développement d'outils d'analyse dont la mesure des impulsions des traces avec la diffusion



FIGURES
2A, 2B

À gauche, plateforme d'un des manipulateurs en position élevée le long du portique pour accéder une rangée de briques de la cible OPERA. À droite, extraction d'une brique grâce à un petit véhicule motorisé.

multiple dans les plaques de plomb des cibles. Ils sont aussi fortement impliqués dans l'étude de l'oscillation neutrino-muon vers neutrinos-tau via la recherche des désintégrations du tau en 3 hadrons et l'étude des fonds correspondants, ainsi que dans la recherche des désintégrations du tau en électron et de la transformation des neutrinos-tau en neutrinos-électron.

Le système de manipulation de cibles et le fonctionnement du détecteur

Le détecteur OPERA a une masse cible de 1,25 ktonnes et est composé de deux supermodules ayant chacun un bloc cible plomb-émulsion suivi d'un spectromètre à muons. Il y a deux manipulateurs (BMS) qui permettent d'accéder aux briques de chaque côté de l'expérience. Chaque brique est composée d'un sandwich de 57 films d'émulsions nucléaires de 300 microns d'épaisseur et de 56 plaques de plomb de 1 mm d'épaisseur. Cet élément de base est un détecteur de très grande précision dont les résolutions spatiale et angulaire sont respectivement de 1 micron et 2 mrad. Le détecteur possède plus de 150 000 briques de 8,3 kg chaque. Chacune d'elle doit être installée et manipulée très précisément dans les murs de support des blocs cibles grâce aux manipulateurs. La description des systèmes et des détails techniques supplémentaires peuvent être obtenus dans la référence [1]. L'équipe du LAPP a conçu, développé et mis au point la mécanique, la motorisa-

tion et l'automatisation des éléments des manipulateurs de briques et des diverses parties qui leur sont associées. Il en a aussi réalisé toutes les parties logicielles, qui ont été étendues à la gestion des briques dans l'ensemble des opérations subies entre leur insertion dans le détecteur et leur démantèlement avant de développer les films. Les figures 2a et 2b montrent deux photos des manipulateurs de briques en cours de fonctionnement au laboratoire souterrain du Gran Sasso.

L'activité majeure de ces dernières années a concerné l'exploitation des manipulateurs en mode de production de physique et l'intégration comme élément principal de la chaîne d'acquisition de l'expérience OPERA pendant les années de prise de données du CNGS. L'équipe du LAPP a pu développer et finaliser la mise en place des procédures d'extraction des briques dites « candidates » pouvant contenir des interactions de neutrino. Une optimisation des missions élémentaires d'automatisme et un travail de fond sur le traitement et la résolution des défaillances en cours de service ont été effectués. Ceci s'est traduit par la manipulation et le suivi de près de 200 000 mouvements de briques dans le seul cadre des « runs » de physique de 2008 à 2012, ce qui correspond à avoir déplacé l'ensemble de la cible (1,25 ktonnes) au moins une fois durant cette période.

La figure 3 montre les différentes activités de manipulation des blocs cibles identifiés comme siège d'une interaction neutrino de

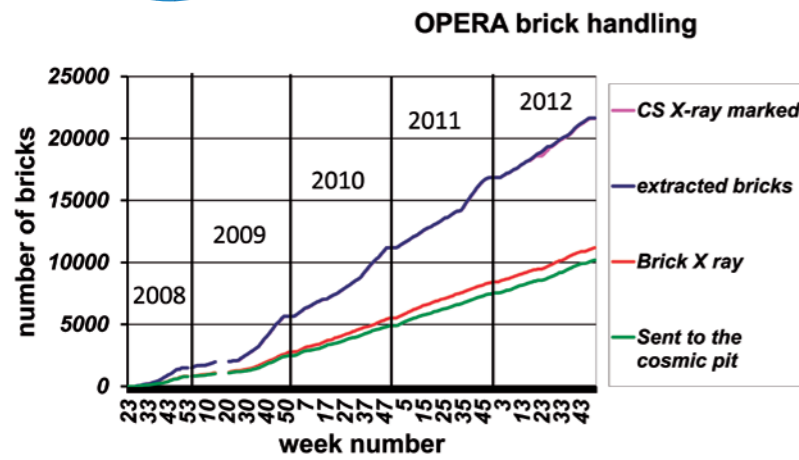


FIGURE 3

Suivi des activités de manipulation des blocs cibles d'OPERA pouvant être le siège d'interactions neutrino en fonction des semaines lors des années d'exploitation grâce au système de gestion avec base de données développé au LAPP.

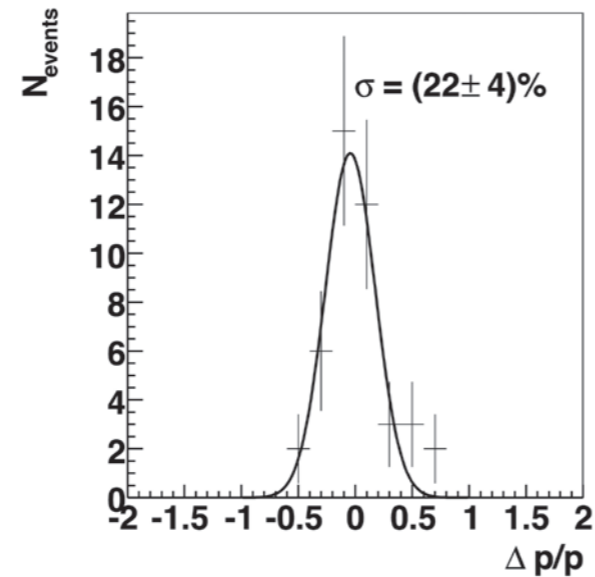
FIGURE 4

Comparaison des impulsions de muons mesurées par les détecteurs électroniques d'OPERA et par l'algorithme de MCS développé par le groupe du LAPP.

2008 à 2012. Ces manipulations sont suivies par le système logiciel développé par l'équipe du LAPP et vont de l'extraction du détecteur par les manipulateurs, à l'exposition immédiate à des rayons X pour l'alignement des feuilles amovibles (CS) et au développement final après exposition à des rayons cosmiques pour l'alignement des films d'émulsions.

Développement de méthodes d'analyse avec les émulsions

L'analyse des topologies détaillées des événements neutrino nécessite l'emploi d'algorithmes de reconstruction très performants pour déterminer le plus précisément possible la cinématique des interactions. Le groupe a développé un algorithme original de reconstruction des impulsions des particules chargées par diffusion coulombienne (MCS) dans les blocs cibles, dont les performances sont uniques et qui permet la mesure de l'impulsion de manière indépendante de l'angle et pour des impulsions allant jusqu'à 8 GeV/c. Ces résultats, ainsi que la description détaillée de la méthode, font partie d'une publication récente d'OPERA [7] dans laquelle l'analyse est complétée d'une étude comparative des impulsions des muons enregistrés dans les détecteurs électroniques d'OPERA. La figure 4 présente la

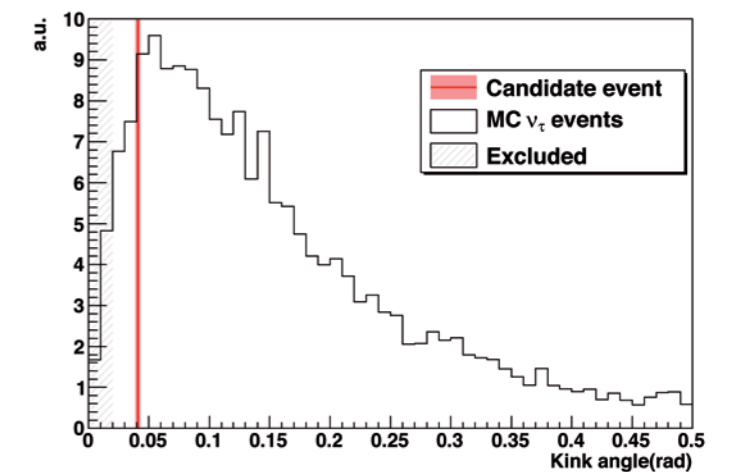
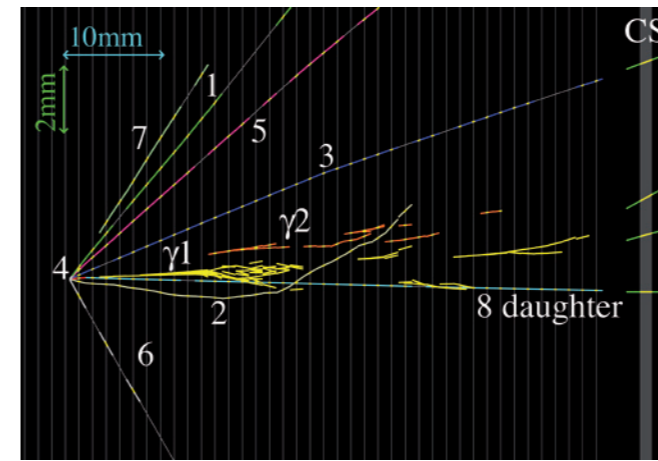


comparaison relative des impulsions mesurées par les détecteurs électroniques avec celle obtenue par diffusion coulombienne multiple dans les cibles pour un échantillon de muons entre 2 GeV/c et 6 GeV/c. La résolution obtenue est de 22 %.

L'algorithme a été porté dans le code officiel de reconstruction des traces dans les émulsions nucléaires d'OPERA et est maintenant utilisé par défaut dans toutes les analyses fines des vertex d'interaction, notamment pour les événements candidats neutrino-tau. Le groupe du LAPP a apporté une contribution significative à l'étude cinématique du premier candidat tau (référence [4]), dont la reconstruction est donnée dans les figures 5a et 5b avec la distribution de l'angle de désintégration du tau.

Analyse du canal de désintégration du tau en 3 hadrons chargés

La recherche des événements de signal d'oscillation neutrino-muon en neutrino-tau est essentiellement validée sur la capacité à identifier et séparer des événements présentant une topologie semblable à un événement tau, mais issus de la production de mésons charmés (particules dont les désintégrations ressemblent sensiblement aux désintégrations du lepton tau).



FIGURES
5A, 5B

Premier candidat ν_τ observé par OPERA dans le canal $\tau \rightarrow h^+ h^- \nu$. La distribution de droite montre la valeur de l'angle de désintégration du lepton tau (ligne rouge) comparée à la prédiction.

Le groupe a repris l'analyse originale développée au LAPP du canal de désintégration $\tau \rightarrow h^+ h^- \nu$ dont la signature expérimentale est l'observation de deux vertex multi-particules. Celle-ci a été réalisée dans le cadre de la nouvelle chaîne logicielle développée depuis et qui intègre de nombreuses améliorations notamment dans les simulations des émulsions. Ceci a permis de réévaluer les niveaux des bruits de fond et commencer à explorer les réductions de ces fonds qui peuvent être atteintes à l'aide des méthodes multivariées.

Ce travail a permis de développer une des deux analyses utilisées pour déterminer les performances d'OPERA dans l'observation de l'oscillation neutrino-muon en neutrino-tau dans le canal $\tau \rightarrow h^+ h^- \nu$ et de contribuer à l'analyse du second candidat ν_τ observé dans ce canal en 2012. Les figures 6a et 6b montrent l'image reconstruite de cet événement candidat et la balance en impulsion transverse au faisceau.

Analyse des neutrinos-électron et des gerbes électromagnétiques

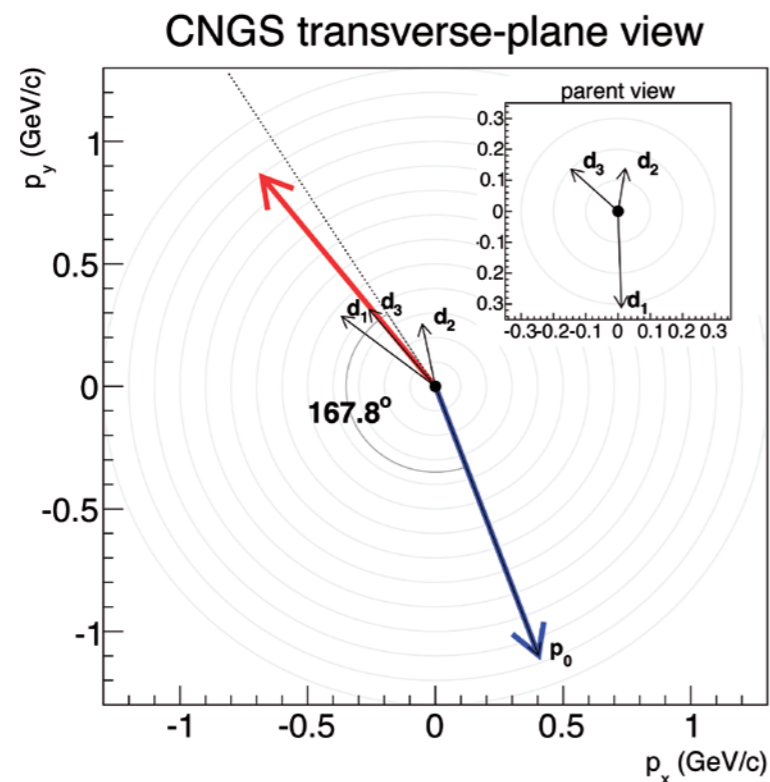
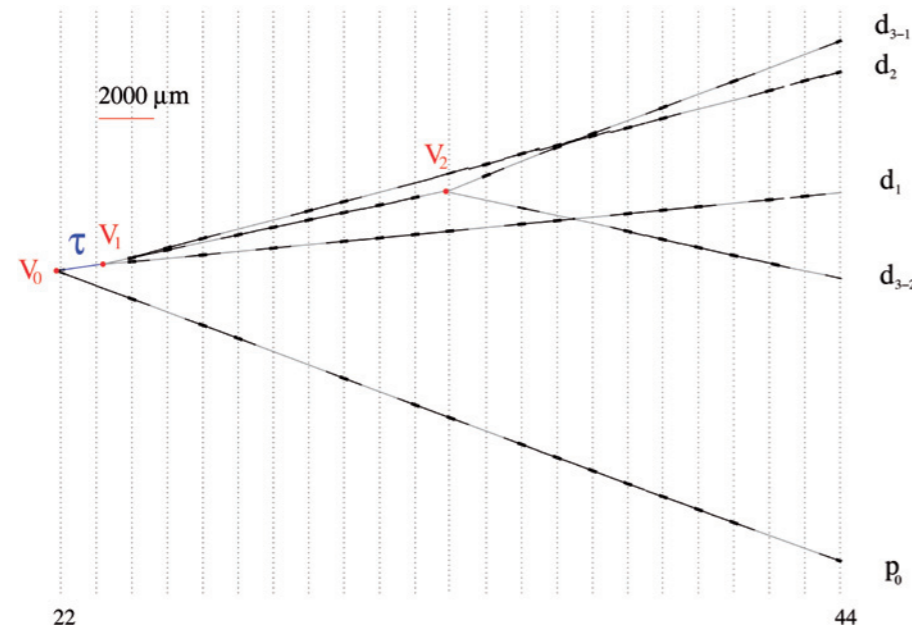
La reconstruction des gerbes électromagnétiques dans les briques OPERA est un atout pour l'étude des oscillations de neutrinos produisant des électrons dans l'état final. Deux types d'oscillation peuvent être étudiés avec la reconstruction de la gerbe électromagnétique, son identification en électron et la détermination de son énergie. Tout d'abord la

transformation des neutrinos-muon et leur apparition en neutrinos-tau dans le canal tau en électron qui représente 17,8 % du taux de désintégration du lepton tau et qui conduit à un électron dans l'état final. La deuxième transformation des neutrinos-muon étudiée est celle qui se manifeste avec l'apparition de neutrinos-électron, lesquels, lorsqu'ils interagissent à travers des courants chargés, produisent également une gerbe hadronique associée à un lepton électron.

L'analyse de ces deux transformations a fait l'objet d'un travail de thèse dans le groupe et de deux publications internes dans la collaboration OPERA. L'étude a permis d'affiner l'analyse des gerbes électromagnétiques et de déterminer les efficacités de reconstruction et d'identification des électrons nécessaires à la recherche des oscillations dans le canal tau en électron. Ce travail devrait apporter une contribution importante à l'étude de ce canal en exploitant l'ensemble des données collectées par OPERA.

FIGURES
6A, 6B

Deuxième candidat τ observé par OPERA dans le canal $\tau \rightarrow h^- h^+ h^- \nu$. Le diagramme de droite représente la somme des impulsions transverses au vertex primaire d'interaction neutrino (bleu) et au vertex de désintégration du tau (rouge) dans le plan transverse à la direction du faisceau.



PUBLICATIONS
IMPORTANTES

- [1] *The OPERA experiment in the CERN to Gran Sasso neutrino beam*, OPERA Collaboration, R. Acquafredda et al., JINST 4 (2009) P04018
- [2] *The detection of neutrino interactions in the emulsion/lead target of the OPERA experiment*, OPERA Collaboration, R. Acquafredda et al., JINST 4 (2009) P06020
- [3] *Measurement of the atmospheric muon charge ratio with the OPERA detector*, OPERA Collaboration, N. Agafonova et al., Eur. Phys. J. C67 (2010) 25-37
- [4] *Observation of a first nu_tau candidate in the OPERA experiment in the CNGS beam*, OPERA Collaboration, N. Agafonova et al., Phys. Lett. B691 (2010) 138-145
- [5] *Measurement of low-energy neutrino cross-sections with the PEANUT experiment*, S. Aoki et al., New J. Phys. 12 (2010) 113028
- [6] *Study of neutrino interactions with the electronic detectors of the OPERA experiment*, OPERA Collaboration, N. Agafonova et al., New J. Phys. 13 (2011) 053051. arXiv:1102.1882 [hep-ex]
- [7] *Momentum measurement by the Multiple Coulomb Scattering method in the OPERA lead emulsion target*, OPERA Collaboration, N. Agafonova et al., New J. Phys. 14 (2012) 013026. arXiv:1106.6211 [physics.ins-det]
- [8] *Search for $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ oscillation with the OPERA experiment in the CNGS beam*, OPERA Collaboration, N. Agafonova et al., New J. Phys. 14 (2012) 033017

THÈSE

F. Brunet, *Reconstruction et analyse des gerbes électromagnétiques dans l'expérience OPERA et étude des oscillations des neutrinos avec détection d'électrons*, thèse soutenue le 12 décembre 2012

PRÉSENTATIONS DANS
DES CONFÉRENCES

- A. Zghiche**, *Search for ν_τ appearance via neutrino oscillations in the ν_μ CNGS beam with the OPERA experiment*, 21^{èmes} Rencontres de Blois Windows of the Universe, Blois, France, 2009
- H. Pessard**, *Status of the OPERA experiment*, Europhysics Conference on High Energy Physics EPS-HEP 2009, Cracovie, Pologne, 2009
- F. Brunet**, *Status and oscillation results of the OPERA experiment*, 24^{èmes} Rencontres de Blois Particle Physics and Cosmology, Blois, France, 2012
- A. Zghiche**, *CNGS experiments results and outlook*, 13th International Workshop on Next Generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors NNN 2012, Fermilab, Chicago, Etats-Unis, 2012

POUR EN SAVOIR PLUS

Site web de l'expérience OPERA :
<http://operaweb.lngs.infn.it>