

Etude des oscillations neutrino avec détection d'électrons dans l'expérience OPERA et reconstruction et analyse des gerbes électromagnétiques

Florian BRUNET

*Laboratoire de Physique des Particules d'Annecy-le-vieux
(LAPP)*



Résumé

L'expérience OPERA permettra d'observer directement pour la première fois l'oscillation $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$. Pour cela un faisceau pur de ν_μ est envoyé du CERN jusqu'au Gran Sasso où est situé le détecteur OPERA ; il est basé sur l'association de feuilles d'émulsion photographique et de plomb, le tout instrumenté avec des détecteurs électroniques. Il est capable d'observer toutes les saveurs de neutrinos et d'investiguer aussi bien l'oscillation $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ que $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$. Nous donnerons des estimations du nombre d'événements attendus pour le signal et les bruits de fond du canal d'oscillation $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$. On montrera que l'outil de reconstruction des gerbes électromagnétiques nous permettra de mesurer l'énergie d'électrons de 4 GeV avec une résolution de 40%.

Introduction

Le neutrino est une particule de charge neutre et de faible masse qui n'interagit que par le biais de l'interaction faible. Une propriété intéressante lui permet d'osciller, lors de sa propagation, entre les trois saveurs connues de neutrinos. Des expériences passées comme SuperKamiokande ou SNO ont déjà donné des résultats expliqués par l'oscillation. D'autres plus actuelles comme T2K, MiniBooNE ou encore MINOS cherchent à améliorer la sensibilité sur les 6 paramètres régissant l'oscillation. Toutefois aucune expérience n'a détecté en apparition des oscillations de neutrinos : c'est ce qu'OPERA se propose de faire. Au Gran Sasso en Italie, un détecteur a été installé à côté d'un tunnel autoroutier sous 1400 mètres de roche afin de confirmer définitivement le phénomène d'oscillation : OPERA. Des neutrinos muon sont produits par l'accélérateur de particules du CERN près de Genève en Suisse et sont envoyés vers le détecteur OPERA qui est construit pour détecter les neutrinos et plus spécifiquement le neutrino tau. Nous savons aussi que les neutrinos muon peuvent osciller vers les neutrinos électron qu'OPERA peut aussi détecter.

1.1 Situation expérimentale sur les neutrinos

Les trois états de saveur des neutrinos (ν_e, ν_μ, ν_τ) peuvent s'écrire comme une combinaison linéaire des

trois états de masse (ν_1, ν_2, ν_3) à l'aide d'une matrice de mélange unitaire que l'on peut écrire ainsi :

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{-i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-i\alpha} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-i\beta} \end{pmatrix}$$

avec $c_{ij} = \cos(\Theta_{ij})$, $s_{ij} = \sin(\Theta_{ij})$

$\delta =$ phase de violation de CP

et α & $\beta =$ phases de Majorana

Θ_{12} représente le secteur des neutrinos solaires

Θ_{23} représente le secteur des neutrinos atmosphériques

L'oscillation des neutrinos fait intervenir également les carrés des différences de masse des états propres de masse Δm_{ij}^2 . La probabilité d'oscillation d'une saveur vers une autre peut prendre des formes complexes, comme par exemple pour l'oscillation $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$. On voit apparaître deux ondes de fréquences d'oscillation différentes $\sin^2(\Delta m_{13}^2 * 1.27 \frac{L}{E})$ et $\sin^2(\Delta m_{12}^2 * 1.27 \frac{L}{E})$, où L est la longueur d'oscillation et E est l'énergie du neutrino, ainsi que leur interférence :

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = s^2(2\Theta_{13})s^2(\Theta_{23})s^2\Delta_{13} \\ + s^2(2\Theta_{12})c^2(\Theta_{23})c^2(\Theta_{13})s^2\Delta_{12} \\ + s(2\Theta_{13})c(\Theta_{13})s(2\Theta_{23})s(2\Theta_{12})s\Delta_{12}s\Delta_{13}c(\Delta_{23} \pm \delta) \\ \text{où } \Delta_{ij} = \Delta m_{ij}^2 * 1.27 \frac{L}{E}, s = \sin \text{ et } c = \cos$$

On remarque aussi par cette formule l'importance que tous les paramètres soient non nuls afin de pouvoir mesurer la phase de violation de CP. Dans certains cas, comme pour l'oscillation $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$, on peut la réduire à une formulation dite à 2 saveurs :

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = c^4(\Theta_{13})s^2(\Theta_{23})s^2\Delta_{23}$$

En observant ces probabilité de transition entre les saveurs de neutrinos, on comprend qu'une expérience permettant de fixer les paramètres E et L est une sonde des angles de mélange et des différences de masses. Ces expériences utilisent des faisceaux de neutrinos qui sont dirigés vers un détecteur ; selon que la distance soit petite ou grande entre le faisceau et le détecteur on parle d'expérience "short baseline" ou "long baseline". Les sources naturelles de neutrinos telles que le Soleil

- les réactions de fusion nucléaire impliquées dans le fonctionnement du Soleil produisent des neutrinos - ou les neutrinos produits par l'interaction de rayonnement cosmique avec l'atmosphère terrestre fournissent également une grande quantité de ces particules pour explorer les secteurs des paramètres décrits plus haut. Les données actuelles concernant les paramètres intrinsèques de l'oscillation des neutrinos sont résumées dans le tableau 1.1 [1].

Δm_{12}^2	$7.67_{-0.19}^{+0.16} \times 10^{-5} eV^2$
$ \Delta m_{13}^2 \& \Delta m_{23}^2 $	$2.39_{-0.08}^{+0.11} \times 10^{-3} eV^2$
$\sin^2(\theta_{12})$	$0.312_{-0.018}^{+0.019}$
$\sin^2(\theta_{13})$	$< 0.016_{-0.010}^{+0.010}$
$\sin^2(\theta_{23})$	$0.466_{-0.058}^{+0.073}$

TABLE 1.1 – Valeurs actuelles des paramètres intrinsèques d'oscillation

1.2 L'expérience OPERA

OPERA est destiné à confirmer l'hypothèse de l'oscillation des neutrinos atmosphériques $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ en détectant la présence de ν_τ dans un faisceau pur de ν_μ . Le faisceau nommé CNGS (Cern Neutrino to Gran Sasso)[3] est produit au CERN et envoyé en direction du Gran Sasso en Italie 732 km plus loin. L'énergie moyenne du faisceau étant de 17 GeV, on obtient une probabilité d'oscillation $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = 3\%$ avec $\Delta m_{23}^2 = 2.39 * 10^{-3} eV^2$. L'énergie a été optimisée afin de prendre en compte l'augmentation avec l'énergie de la section efficace d'interaction des ν_τ par courant chargé. Une caractéristique importante du faisceau pour l'étude des canaux contenant des électrons va être la contamination du faisceau en ν_e : 0.8% des neutrinos produits au CNGS sont des ν_e . On attend au Gran Sasso, par an et par kT de plomb sans tenir compte de l'acceptance du détecteur et des efficacités de sélection, 20 événements ν_τ^{CC} et 4 ν_e^{CC} oscillés depuis les ν_μ pour 3000 événements ν_μ^{CC} et 26 ν_e^{CC} du faisceau.

1.2.1 Le détecteur OPERA

Le détecteur OPERA est situé dans le laboratoire du Gran Sasso sous la montagne du même nom, soit 1400m de roche, ce qui permet de s'isoler de 99% des rayons cosmiques. Le détecteur est composé de deux super-modules représentés sur la figure 1.1, chacun comprenant une partie cible et un spectromètre magnétique à muons.

Description de la cible

Chaque élément cible est composé de 31 modules, chacun fait d'un mur de briques, 64 rangées et 2x26 colonnes, suivi de 2 plans de scintillateurs plastiques croisés. Ces derniers jouent le rôle de déclencheur électronique et permettent de déterminer la brique dans laquelle a eu lieu une interaction. Les briques sont composées de 56 feuilles de plomb de 1mm de d'épaisseur, disposées chacune en alternance avec 57 films d'é-

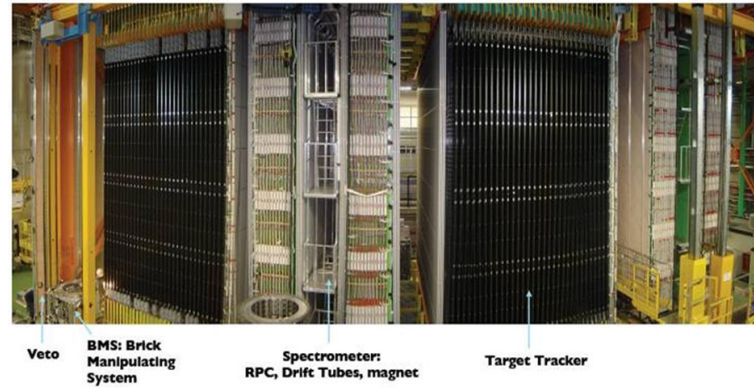


FIGURE 1.1 – Vue du détecteur OPERA

multion photographique de $290 \mu m$ d'épaisseur soit au total une longueur de $10 X_0$ ¹ pour une brique. Deux films d'émulsion changeables ou CS sont de plus attachés en aval de la brique afin de valider les prédictions de l'électronique. Les particules chargées produites lors des interactions de neutrino dans le plomb ionisent les grains de bromure d'argent ; ces grains apparaissent noirs après développement, permettant ainsi de reconstruire les traces à l'échelle micrométrique. L'insertion dans le détecteur de 150 000 briques ainsi que l'extraction des briques candidates sont assurées par deux robots automatiques conçus et réalisés au LAPP : les BMS. Le choix des briques-cibles a été motivé par leur haute résolution angulaire $\Delta\theta \approx 1$ mrad et spatiale $\Delta x \approx 1 \mu m$ nécessaire à la détection du tau dont la topologie en coude de l'interaction d'un neutrino tau dans le plomb implique un temps de vol de 87 microns et un parcours moyen de 600 microns.

1.2.2 De la brique à l'interaction neutrino

Une fois la brique extraite, elle est exposée à des rayons X frontalement afin d'aligner le doublet de CS avec la dernière émulsion. Le doublet de CS est envoyé dans un des 2 laboratoires de scan de CS : LNGS (Italie) et Nagoya (Japon). Si une trace est trouvée dans les CS, la brique est alors exposée à des rayons X latéralement puis à des rayonnements cosmiques frontalement pour aligner les émulsions les unes par rapport aux autres. La brique peut alors être désassemblée et les émulsions développées puis envoyées dans un des 10 laboratoires de scan répartis en Europe et au Japon.

Processus automatique de reconstruction d'un événement

Les traces trouvées dans les CS sont cherchées dans l'émulsion la plus en aval du faisceau. Puis ces traces seront suivies dans les émulsions suivantes : c'est la *scanback*. On définit un point d'arrêt lorsqu'on ne trouve plus de basetrace à associer à la trace suivie dans 5 émulsions consécutives. Un scan en volume est effectué autour de ce point ($2.5 cm^2 * 10$ émulsions) afin

1. longueur de radiation pour le plomb : $X_0 = 5.6 mm$

de trouver toutes les traces convergentes et de construire le vertex de l'interaction neutrino. Le résultat est stocké dans une base de donnée locale au laboratoire, il sera copié ensuite vers la base de données principale au centre de calcul de l'IN2P3 à Lyon. La recherche de la topologie *en coude* peut être faite à partir de la base de données sans agir sur les émulsions : c'est le *decay search*.

La figure 1.2 montre un exemple de visualisation d'un événement neutrino ν_e^{CC} .

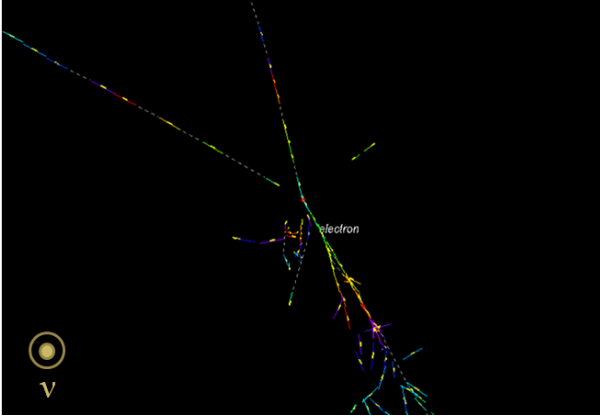


FIGURE 1.2 – Visualisation d'une interaction neutrino électron par courant chargé dans OPERA

1.3 La détection d'électrons dans le canal d'oscillation $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$

On a vu qu'OPERA a la capacité de détecter les électrons et on verra qu'on peut aussi mesurer leur énergie. Une étude du canal d'oscillation $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ peut être ainsi menée pour permettre de chiffrer en termes de nombre d'événements attendus de ce signal ainsi que des bruits de fond correspondants. Ses derniers contiennent tous les processus ayant un gerbe électromagnétique dans l'état final :

- ν_e du faisceau :
interaction $\nu_e^{CC} \rightarrow e +$ gerbe hadronique
- ν_τ oscillés depuis les ν_μ :
interaction $\nu_\tau^{CC} \rightarrow \tau +$ gerbe hadronique et $\tau \rightarrow e\nu\nu$
- $\nu_{\mu,e}$ du faisceau :
interaction $\nu_{e,\mu}^{NC} \rightarrow \nu +$ gerbe hadronique dont π^0 et $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$
- ν_μ du faisceau :
interaction $\nu_\mu^{CC} \rightarrow \mu$ non détecté + gerbe hadronique dont π^0 et $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma \equiv$ interaction ν_μ^{NC}

Les ν_e du faisceau vont être principalement discriminés par l'énergie de l'électron primaire qui est plus grande que l'énergie des électrons du signal car les ν_e du faisceau ont une énergie plus grande que ceux qui ont oscillé depuis les ν_μ . Les électrons provenant des interactions $\nu_\tau^{CC} \rightarrow \tau +$ gerbe hadronique et $\tau \rightarrow e\nu\nu$ sont discriminés principalement par la topologie en coude de ces événements. Le bruit de fond venant des interactions à

courant neutre sont discriminées principalement par le pouvoir de détection d'une paire e^+e^- attachée au vertex primaire. L'identification d'un muon est améliorée par une bonne efficacité de détection des muons : 95%. Enfin tous les bruits de fond seront discriminés sur des variables topologiques dont l'énergie de l'électron et l'énergie visible. Le tableau 1.2 récapitule le nombre d'événement attendus après application des efficacités et de l'acceptance dans OPERA pour le signal et les bruits de fond résultant d'une étude Monte Carlo au niveau générateur.

	Signal	$\tau \rightarrow e$	$\nu_\mu^{CC} \rightarrow \nu_\mu^{NC}$	ν_μ^{NC}	ν_e^{CC} faisceau
χ	0.53	0.53	0.52	0.48	0.53
ϵ	0.75	0.032	$0.34 * 10^{-4}$	$7 * 10^{-4}$	0.30
N	1.6	0.06	0.06	0.13	4

TABLE 1.2 – Taux d'événements attendus après application des efficacités et de l'acceptance par an et par kt de plomb du signal et des bruits de fond en supposant le faisceau CNGS nominal et les paramètres d'oscillation du tableau 1.1.

χ : Acceptance : géométrie, déclenchement..., ϵ : Efficacité de sélection et N : Nombre d'événements attendus

Les sélections sur les variables topologiques et cinématiques permettent d'atteindre une bonne efficacité de réjection des bruits de fond. Toutefois dû au grand nombre d'interactions ν_e du faisceau par rapport aux autres canaux, ce bruit de fond restera le plus important en termes de multiplicité et surtout il restera irréductible. Cette étude ayant été réalisée au niveau générateur, deux remarques émergent. Tout d'abord, une simulation complète comprenant toutes les efficacités de reconstruction doit être effectuée afin d'obtenir des chiffres précis et avec un bon niveau de confiance. Ensuite l'énergie de l'électron primaire et visible étant deux variables avec un fort pouvoir discriminant pour tous les bruits de fond, on désire avoir un outil de reconstruction de l'énergie des électrons le plus précis possible en tenant compte des capacités calorimétriques d'OPERA.

1.4 La reconstruction des gerbes électromagnétique

L'outil de reconstruction des gerbes électromagnétiques [2] est basé sur une association géométrique des morceaux de traces puis une identification de la particule et enfin d'une estimation de l'énergie toutes deux à l'aide de réseaux de neurones.

La reconstruction

Chaque particule chargée laisse une trace de son passage dans chaque émulsion traversée : ce morceau de trace constituant la brique élémentaire de la reconstruction des événements dans les émulsions est appelée *tracebase*. L'algorithme va associer les tracebases

les unes avec les autres sur des critères angulaires et spatiaux : $\delta\theta < 150\text{mrad}$ et $\delta r < 150\ \mu\text{m}$. L'autre critère géométrique est de requérir que la tracebase soit dans un cône de 20 mrad d'ouverture créé à partir de la tracebase considérée comme initiatrice de la gerbe : ce dernier critère reproduisant le développement spatial d'une gerbe électromagnétique. Un dernier critère de développement sur au moins 4 émulsions est considéré.

Identification de la particule & estimation de l'énergie

Ces deux fonctions sont assurées chacune par l'utilisation d'un réseau de neurones analysant des variables qui décrivent le développement de la gerbe. Les sorties de ces outils sont respectivement la probabilité d'être un électron et l'énergie de la gerbe.

Performance de l'algorithme

L'outil a été utilisé sur des échantillons Monte Carlo de gerbe électrons et photons se propageant dans une brique cible d'OPERA : la gerbe est initiée au point d'entrée dans la brique et plusieurs énergies ont été utilisées 10, 6, 4, 1.5, 0.5 GeV avec une statistique de 1000 événements pour chaque énergie. Les valeurs de l'énergie et sa résolution sont récapitulées dans le tableau 1.3. L'erreur sur la valeur moyenne de l'énergie reconstruite est une erreur statistique. On remarque immé-

Energie MC vrai	Energie moyenne reconstruite	Résolution
Electrons		
10 GeV	11.7 GeV	20%
6 GeV	7.4 GeV	30 %
4 GeV	4.9 GeV	43 %
1.5 GeV	1.4 GeV	65 %
0.5 GeV	0.5 GeV	60 %
Photons		
6 GeV	6.9 GeV	32 %
4 GeV	4.4 GeV	43 %
1.5 GeV	1.2 GeV	67 %
0.5 GeV	0.5 GeV	80 %

TABLE 1.3 – Performances de l'algorithme de reconstruction des gerbes électromagnétiques. L'erreur statistique sur la valeur moyenne de l'énergie est de 0.02 à 0.08 GeV

atement que l'énergie est surestimée. La raison est connue et est corrigée dans une nouvelle version de l'outil. Le réseau de neurones pour estimer l'énergie est entraîné avec des échantillons Monte Carlo avec une seule efficacité de tracebase dans les émulsions OPERA alors qu'il existe plusieurs paramétrisations en fonction des paramètres de numérisation. En l'occurrence les échantillons ont une efficacité de tracebase de 100% et les échantillons d'entraînement des réseaux environ 80%. Ensuite les échantillons de basse énergie donnent une énergie avec un ordre de grandeur correct mais la résolution est de moindre qualité. En réalité, le principe de la reconstruction de la gerbe est basé sur la topologie de son développement, or à ces faibles énergies, il n'y a plus de développement : seules quelques traces appa-

raissent. L'outil atteint ses limites de fonctionnement. Une étude des erreurs systématiques doit être menée afin de bien comprendre le fonctionnement de cet algorithme. On peut représenter la résolution en énergie par une formule de type calorimétrique suivante :

$$\frac{\sigma_E}{E} \approx \frac{50\%}{E} \oplus 0.17$$

Les sources de ces erreurs systématiques sont l'angle d'incidence de la particule, la position du point de génération de la gerbe dans la brique et le nombre d'émulsions utilisées.

Conclusion

L'expérience OPERA permettra d'observer directement pour la première fois l'oscillation $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$, elle peut aussi détecter les ν_e et ainsi investiguer aussi l'oscillation $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$. Nous avons donné des estimations du nombre d'événements attendus pour le signal et les bruits de fond du canal d'oscillation $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ dans une étude au niveau générateur. On a clairement mis en lumière l'importance d'une bonne reconstruction de l'énergie des électrons ainsi que d'une simulation complète du détecteur prenant en compte toutes les efficacités de détection. Un outil de reconstruction des gerbes électromagnétiques a été utilisé : ces performances ont été évaluées.

Références

- [1] Fogli, G. L. and others, Observables sensitive to absolute neutrino masses (Addendum), Phys. Rev. D78 : 033010, 2008
- [2] Frédéric Juget, Frank Meisel, Electromagnetic shower reconstruction and energy measurement in the OPERA brick, OPERA internal note 99, 09 février 2009
- [3] M. Guler *et al.* [OPERA Collaboration], OPERA : An appearance experiment to search for $\nu_\mu/\nu_\tau \leftrightarrow \nu_e$ oscillations in the CNGS beam. Experimental proposal,"