Oscillation Project with Emulsion tRacking Apparatus

F. Juget Institut de Physique Université de Neuchâtel



Marseille, 28 Février 2005



- L'oscillation des neutrinos
- La physique au CNGS
- Le détecteur OPERA
- Performances
- Conclusion

L'oscillation des neutrinos

- <u>Comment une masse m_v génère des oscillations</u>
 - Etats propres de saveurs ($v_e v_\mu v_\tau$)
 - Etats propres de masse $(v_1 v_2 v_3)$
 - 2 différentes bases pour décrire les états
- Mélanges des états propres ($v_e v_\mu v_\tau$) et ($v_1 v_2 v_3$)

$$v_l = \sum_i U_{li} v_i$$

Matrice 3x3 qui dépend de 4 paramètres: $\theta_{12} \ \theta_{23} \ \theta_{13} \ \delta_{cp}$

Oscillation des neutrinos: Formalisme à 2 saveurs



 $|\nu_{\mu}(0)\rangle = -\sin\theta |\nu_{1}\rangle + \cos\theta |\nu_{2}\rangle$



$$|\nu_{\mu}(t)
angle = -\sin\theta \exp[-\frac{iE_{1}t}{\hbar}] |\nu_{1}
angle + \cos\theta \exp[-\frac{iE_{2}t}{\hbar}] |\nu_{2}
angle$$

$$E_i = \sqrt{p_i^2 + m_i^2} \xrightarrow{p_i = p \gg m_i} \simeq p + \frac{m_i^2}{2p} \simeq p + \frac{m_i^2}{2E}$$
$$L = c \cdot t \qquad \Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2 \Rightarrow \quad E_2 - E_1 = \frac{\Delta m^2}{2E}$$

Transition probability:

$$P(\nu_{\mu} \to \nu_{e}) = |\langle \nu_{\mu}(t) | \nu_{e}(0) \rangle|^{2} = \sin^{2} 2\theta \cdot \sin^{2} \left(\frac{\Delta m^{2} L}{4E}\right)$$

Formalisme à 3 saveurs

$$\begin{bmatrix} v_e \\ v_\mu \\ v_\tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix}$$

$$P(\nu_{\ell} \to \nu_{\ell'}) = |\sum_{i} U_{\ell i} U_{\ell' i}^{*} e^{-i(m_{i}^{2}/2E)L}|^{2}$$
$$= \sum_{i} |U_{\ell i} U_{\ell' i}^{*}|^{2} + \Re \sum_{i} \sum_{j \neq i} U_{\ell i} U_{\ell' i}^{*} U_{\ell j}^{*} U_{\ell' j} e^{i\frac{|m_{i}^{2} - m_{j}^{2}|L}{2E}}$$

Cette relation se simplifie sous certaines conditions:

- $\Delta m_{23}^2 >> \Delta m_{12}^2$
- L est comparable à la "longueur d'oscillation atmosphérique" (~ 1000 km)
- L' angle θ_{13} est petit

Probabilité d'oscillation



La saveur est obtenue par l'identification du lepton de l'interaction CC

Oscillation des neutrinos solaires



Oscillation des neutrinos solaires

- <u>Expériences sensibles seulement à la saveur v_e</u> (Homestake- SK-Gallex-GNO-Sage)
 - Mesure un déficit du flux de v_e attendu
- Expérience sensible aux 3 saveurs: SNO (2001)
 Mesure un déficit du flux de v_e attendu
 - Mesure du flux total des 3 v: absence de déficit

$$\nu_{e} \rightarrow \nu_{\mu,\tau}$$

Oscillation des neutrinos solaires

Confirmation par l'expérience KamLAND



Les neutrinos atmosphériques



Le flux est « up-down » symétrique
L est relié à θ



Les neutrinos atmosphériques

Super-Kamiokande



• Dépendance en L/E

• Le déficit privilégie l'oscillation $v_{\mu} \rightarrow v_{\tau}$ (pas d'apparition de la saveur v_{e} observée)



Les neutrinos atmosphériques



L'expérience CHOOZ

- Mesure du flux de v_e d'un réacteur nucléaire (à 1km)
 - Recherche la disparition de v_e





• <u>Ce que nous connaissons sur les masses et le mélange</u>

- 3 saveurs (LEP): $N_{y} = 2.984 \pm 0.008$ - Limite de la mesure directe de la masse (β tritium): • Experiences Mainz et Troistk m, < 2.2 eV Limite de la masse en cosmologie: Expérience WMAP $\Sigma_{i}m_{i} < 0.71 \text{ eV}$ \rightarrow Angles de mélange $0.23 < \sin^2\theta_{sol} < 0.37$ $\nu_e \rightarrow \nu_{\tau,\mu} \qquad \theta_{12} \sim \theta_{sol}$ • Solaire: $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau} \qquad \theta_{23} \sim \theta_{atm}$ $\sin^2 2\theta_{atm} > 0.9$ • Atmosphérique: • Limite sur θ_{13} (CHOOZ) $\sin^2 2\theta_{13} < 0.1$ $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$ $\Rightarrow \theta_{13} < 10^{\circ}$ Deux Δm^2 $7.3 \ 10^{-5} < \Delta m_{sol}^2 < 9.1 \ 10^{-5} \ eV^2$ • Solaire: $\Delta m_{sol}^2 \sim \Delta m_{12}^2$ $1.9 \ 10^{-3} < \Delta m_{atm}^2 < 3.0 \ 10^{-3} \ eV^2$ $\Delta m_{atm}^2 \sim \Delta m_{23}^2$ • Atmosphérique:

Remarque: (sans LSND – Attendre les résultats de MiniBoone)

Formalisme à 3 saveurs





Résumé (II)

- <u>Ce que nous ne connaissons pas...</u>
 - Valeurs absolues des masses (par expérience double- β)
 - Pourquoi θ_{12} et θ_{23} sont grands et θ_{13} semble petit voire nul ?
 - Est-ce que la **phase** δ_{CP} est non nulle?
 - Hiérarchie des masses?
- <u>Futur</u>
 - Observer l'apparition de v_{τ} (OPERA, ICARUS)
 - Neutrino **stérile** (MiniBoone vs LSND)
 - Mesure de précision des angles (θ_{12} θ_{23}) et des 2 Δm^2 ($\theta_{23} = \pi/4$?) MINOS, OPERA, ICARUS
 - **Mesure de** θ_{13} (MINOS, OPERA, ICARUS, T2K)
 - A plus long terme (besoin de nouveaux faisceaux: super-beam, β–beam, ν-fact):
 CP violation, hierarchie des masses, effet MSW...

Motivation pour la physique du CNGS

CNGS PROGRAMME:

* Fournir une évidence non ambiguë pour l'oscillation $v_{\mu} \rightarrow v_{\tau}$ dans la région des neutrinos atmosphériques en observant l'apparition de la saveur v_{τ} dans un faisceau pur de v_{μ}

♦ Observation de l'oscillation $v_{\mu} \rightarrow v_{e}$ (mesure de θ_{13})

Deux experiences au LNGS (732 km): OPERA et ICARUS









COLLABORATION

36 groups ~ 165 physicists **Belgium** IIHE(ULB-VUB) Brussels

> Bulgaria Sofia_University

China IHEP Beijing, Shandong

> **Croatia** Zagreb University

France LAPP Annecy, IPNL Lyon, LAL Orsay, IRES Strasbourg

> **Germany** Berlin, Hagen, Hamburg, Münster, Rostock

> > **Israel** Technion Haifa

Italy Bari, Bologna, LNF Frascati, L'Aquila, LNGS, Naples, Padova, Rome, Salerno

> Japan Aichi, Toho, Kobe, Nagoya, Utsunomiya

Russia INR Moscow, ITEP Moscow, JINR Dubna, Obninsk

> **Switzerland** Bern, Neuchâtel **Turkey** METU Ankara



La distance étant fixée 732 km: Le flux de v_{μ} est optimisé pour avoir un maximum d'interactions v_{τ} par courant chargé



| < Ε ν _μ > | 17 GeV |
|--|-------------|
| (v _e +v _e)/v _µ | 0.87% |
| $\overline{\nu_{\mu}}$ / ν_{μ} | 2.1% |
| v_{τ} prompt | negligeable |

Taux d'événemens pour le faisceau CNGS nominal

Pour <u>1 année de faisceau (200 jours)</u>, on aura:

 4.5×10^{19} protons on target (pot)/an

| | OPERA | ICARUS | |
|-------------------|-------------|------------|--|
| | 1.597 ktons | 2.35 ktons | Taux d'événements en 5 ans |
| ν _μ cc | 23300 | 32600 | pour 4.5 10 ¹⁹ pot /an |
| | 7000 | 10600 | $V_{\tau}CC$ interactions |
| v _µ cc | 490 | 652 | Pour Δm^2 = 2.4 10 ⁻³ (sin ² 2 θ =1): |
| v _e cc | 186 | 262 | ~140 v_{τ} CC attendus en 5 ans |
| v _e cc | 16 | 17 | |
| | 31000 | 44100 | |

<u>Principe</u>: observation directe de la topologie de désintégration du t dans les événements v_{τ} cc

- Haute resolution nécessaire (μm): emulsions photographiques
- Grande masse cible: Les émulsions sont alternées avec des couches de plomb

L'unité de base : LA BRIQUE sandwich de 56 feuilles de Pb de 1mm + 57 couches d' émulsion



206 336 briques → masse cible: **1.8** ktons



OPERA structure: 2 Super-Modules



Proposal: Juillet 2000, installation au LNGS: commencé en Mai 2003



RPCs : identification muon

Aimant Dipolaire { Drift Tubes: impulsion muon



 $\Delta p/p = 20 - 25\%$

µId > 95% (avec Target Tracker)



Installation: début en Mai 2003 Aimant SM1 Installé en juin 2004 Aimant SM2 Avril 2005

μ -Spectrometer

- Dipole magnet
- Resistive Plate Detectors (RPC) between the iron plates
- Drift tube planes before and after the plates
- space resolution: $300\mu m$, momentum resolution: < 25%, μ -id > 95%



Target Tracker

max



Trigger l'interaction Neutrino
Localisation de la brique
Tracking et ID du Muon





XY plans, 7000m² au total
 32256 barreaux de 6.86m x 2.6cm x1cm
 AMCRYS-H (Kharkov) + Kuraray WLS
 1000 MaPMT Hamamatsu 64 canaux

Installation au LNGS depuis Septembre 2004





HallC décembre 2004



Brick Wall + Target Tracker



Planning installation du détecteur

- •Murs de Briques et Target Tracker SM1 Août 04 Juin 05
- •Murs de Briques et Target Tracker SM2 Jul. 05 Mar 06
- •Installation Brick Manipulator System (BMS) Début 2005
- •Installation Brick Assembling Machine (BAM) Eté 2005
- •Début du remplissage des murs avec les briques Nov. 2005

•Prise de données en 2006



Brick finding strategy

- event classification : muon and muon less events
- using tracks and energy flow to reconstruct 3D vertex
- adding neural net analysis to build a 3D probability map





General layout (3D)

Piling

Feeding

lead

Packaging

Pile wrapping



Brick Manipulator System (BMS)



Interaction v_{τ} CC identifiée en regardant la désintégartion du τ

=> recherche d'un « kink» dans des emulsions consécutives



Canaux de désintégration du τ

•
$$\tau \to \mu \ \nu_{\mu} \ \nu_{\tau}$$
 (17%)

•
$$\tau \rightarrow e \nu_e \nu_\tau$$
 (18%)

• $\tau \to h + neutres + v_{\tau}$ (49%)

• 3h + neutres +
$$v_{\tau}$$
 (15%)



After the passage of an ionizing particle, the development process leaves a path metallic silver grains: the "track"



Knowing the exact position and shape of each grain gives the highest level of detail present in the emulsion



The data taking process involves several steps



For each FOV (field of view) we take several tomographic images of the emulsion The camera axis (Z) moves during data taking, but an electronic shutter allows to obtain almost still images of each layer



Basic Ideas

Volume scanning: the number of layers varies in order to cover the full thickness (20÷60 layers)

1 MPixel camera @ 30 fps Wide FOV (200÷300 μm)



After filtering, a threshold is applied to the filter response, and pixels are marked as "black" or "white" Cluster recognition proceeds on the host PC CPU





Horizontal black segments are assembled to form black clusters Area and shape parameters are retained

200×200 µm² in a CHORUS Target Sheet



Tracking selects grains with appropriate shape and size and searches for 3D sequences of aligned grains



Idée de base pour le Scanning 3D

Reconstruction des traces pour l'analyse physique

reconstruction 3D des microtraces



Alignement des microtraces au travers de la base plastique

BASETRACE



Alignement des basetraces de differentes emulsions



Reconstruction Vertex/Decay





Scanning Automatique: Nagoya et Europe R&D Bari, Bern, Bologna, Lyon, Napoli, Neuchâtel, Roma, Salerno



Vertex d'interaction π

Brique exposé à un faicseau de π de 7 GeV/c



Reconstruction

- Trace *M* du faisceau (0.056;-0.004)
- Trace D_1 intersection topologie "kink"

Vérification manuelle

- Trace *M* non trouvée dans la feuille 29
- Trace D_1 non trouvée dans la feuille 30
- Trace D_2 pointe sur le vertex, mais trouvée seulement dans la première couche de la feuille 29 (electron?);



Movie from E. Barbuto Salerno University

Movie from Bari OPERA group

Movie from Bari OPERA group

Scanning avec robot changeur automatique d'émulsions



Robot changeur automatique d'émulsions





Reconstruction des événements avec des emulsions

Angle difference

- Haute précision du tracking ($\delta x \sim 1 \mu m$; $\delta \theta \sim 2 m rad$)
 - Kink topologie de désintégration
 - Electron et γ/π^0 identification
- Mesure de l'énergie
 - Par Multiple Coulomb Scattering $\Delta P/P < 0.2$ après 5X₀ jusqu'à 4 GeV

Analyse de la topologie et cinématique réalisé événement par événement



Utilisation de la topologie de désintégration du τ







Evenements Bruit de fond attendus (5 années avec 1.8 kton de masse cible)

| (en rouge : améliorations possible) | τ→e | | $\tau \rightarrow \mu$ | | τ→h | | total | |
|--------------------------------------|------|------|------------------------|------|------|------|-------|------|
| Bruit de fond Charme | .210 | .117 | .010 | .007 | .162 | .160 | .382 | .284 |
| Diffusion μ Large angle | | | .116 | .023 | | | .116 | .023 |
| Bruit de fond Hadronic | | | .093 | .093 | .116 | | .209 | .209 |
| Total par canal | .210 | .117 | .219 | .123 | .27 | 78 | .707 | .516 |

1. Bdf Charme:

- Révalué avec les données CHORUS: section efficace augmentée de 40%
- $\pi\mu$ id par dE/dx reduira ce bdf de 40%
 - \Rightarrow testé au PSI (pur faisceau de π et μ) ANALYSE EN COURS
 - \Rightarrow x 18 ! Dans le canal μ sans un spectrometre
- 2. µ Large angle:
 - Testé @ CERN ANALYSE EN COURS
- **3. Bdf Hadronique:**
 - Estimations basées sur Fluka standalone : 50% incertitude
 - Mesure en cours avec briques OPERA ANALYSE EN COURS



Nombre d'événements ν_{τ} attendus

full mixing, 5 ans @ 4.5 x10¹⁹ pot / an

| Canal | Signal (Δm ² (eV ²)) | | | 3 | BR | ε. BR | Bruit de fond |
|-------|--|----------|----------|-------|-------|--------|---------------|
| | 2.0 10-3 | 2.4 10-3 | 3.0 10-3 | | | | |
| e | 2.7 | 4.1 | 6.1 | 19.4% | 0.175 | 3.4% | 0.21 |
| μ | 2.3 | 3.4 | 5.1 | 16% | 0.175 | 2.8% | 0.22 |
| h | 2.3 | 3.5 | 5.2 | 5.8% | 0.50 | 2.9% | 0.28 |
| 3h | 0.8 | 1.1 | 1.8 | 6.3% | 0.15 | 0.95% | 0.22 |
| Total | 8.1 | 12.1 | 18.2 | 47.5% | ~1 | 10.35% | 0.93 |

Probabilité d'apparition à 4σ (en 5 ans)





Identification des electrons et mesure de l'energie

Identification : Methode basée sur l'identification de la gerbe et sur le Multiple Coulomb Scattering de la trace avant la gerbe

Energie : Mesurée en comptant le nombre de segments de trace (basetraces) dans un cylindre/cone le long de la trace de l'électron

Multiple Coulomb Scattering avant la gerbe









Efficacité de l'identification électron

efficacité pour des gerbes dans 36 ECC (6.4 ~X₀)

| E(GeV) | e id. (%) | π id. (%) |
|--------|--------------------|------------------|
| 0.5 | 57.1 ± 2.2 | 90.5 ± 1.0 |
| 1 | $87.1 {\pm} 0.7$ | 99.0 ± 02 |
| 3 | $98.3 {\pm} 0.2$ | $99.2 \pm (0.1)$ |
| 5 | $99.62{\pm}0.09$ | $99.5{\pm}0.1$ |
| 7 | $100.0 \pm (0.1)$ | $99.9 \pm (0.1)$ |
| 9 | $99.97 {\pm} 0.06$ | $99.0{\pm}0.1$ |
| 11 | $99.78 {\pm} 0.04$ | $98.9{\pm}0.2$ |
| 15 | $100.0 \pm (0.1)$ | $99.18{\pm}0.09$ |
| 19 | $100.0 \pm (0.1)$ | $97.9{\pm}0.2$ |

Simulation seulement

- Gerbe E.M. et hadronique dans brique OPERA .
- Pas de bruit
- Analyse par réseau de neurones.
- Pour 2÷15 GeV et pour des particules traverssant au moins 2.5 X₀, eID and pID ~ 99%.
- → OK pour analyse $\tau \rightarrow e$ et $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$

Testé @ DESY avec un faisceau pur d'électrons de 1 à 6 GeV ANALYSE EN COURS



Signal attendus et bruit de fond pour l'oscillation $v_{\mu} \rightarrow v_{e}$

| Θ ₁₃ | signal | τ →e | v_{μ} CC | v_{μ} NC | v _e CC beam |
|-----------------|--------|-------------|--------------|--------------|---------------------------|
| 9° | 9.3 | 4.5 | 1.0 | 5.2 | 18 |
| 7 ° | 5.8 | 4.6 | 1.0 | 5.2 | 18 |
| 3° | 1.2 | 4.7 | 1.0 | 5.2 | 18 |
| 3 | 0.31 | 0.032 | 0.34 10-4 | 7.0 10-4 | 0.082 |

Sources de bruit de fond

- 1. π^0 identifié comme électrons produis lors de ν_{μ} NC et v_{μ} CC avec μ non identifié 2. $\tau \rightarrow$ e provenant d'oscillations $v_{\mu} \rightarrow v_{\tau}$ (fortement
- réduit par étude topologique)
- Composante v_e du faisceau (principal bruit de fond)



Sensibilité OPERA à θ_{13}

Fit simultané des distributions de E_e , missing p_T et E_{vis}

Seulement 15% d'augmentation du temps de scanning (événements déja sélectionnés lors de la recherche du v_{τ})





Conclusions

Construction et installation du détecteur

- Installation en cours
- Detecteur (et CNGS faisceau !) près pour 2006
- Optimisation finale du scanning

Important programme de physique

- Première evidence de l'apparition v_{μ} - v_{τ} en quelques années
- En 5 ans: 12 événements signal (SK best fit) et bruit de fond < 1 événement
- Amélioration de l'efficacité et reduction du bruit de fond possible
- Mesure significative de θ_{13}

<u>Bruit de fond très bas</u>