

Le projet de super faisceau de neutrinos
CERN-MEMPHYS

Antoine Cazes

Laboratori Nazionali di Frascati

Le projet de super faisceau de neutrinos

CERN-MEMPHYS

- La situation expérimentale.
- La quête de θ_{13}
 - Neutrinos solaires
- Le projet European
 - Neutrinos atmosphériques
 - Minos
 - Les inconnues

Les oscillations de neutrinos

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta_{CP}} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta_{CP}} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta_{CP}} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta_{CP}} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

Si $\nu = \bar{\nu}$ deux phases supplémentaires apparaissent sans intervenir dans les oscillations

$$\mathcal{P}_{\alpha \rightarrow \beta} = | \langle \nu_\beta | e^{-iHt} | \nu_\alpha \rangle |^2$$

$$\mathcal{P}_{\alpha \rightarrow \beta} = \sum_i |U_{\beta i}|^2 |U_{\alpha i}|^2 + \sum_{i \neq j} U_{\beta i} U_{\beta j}^* U_{\alpha i} U_{\alpha j}^* \exp\left(i \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E_\nu}\right)$$

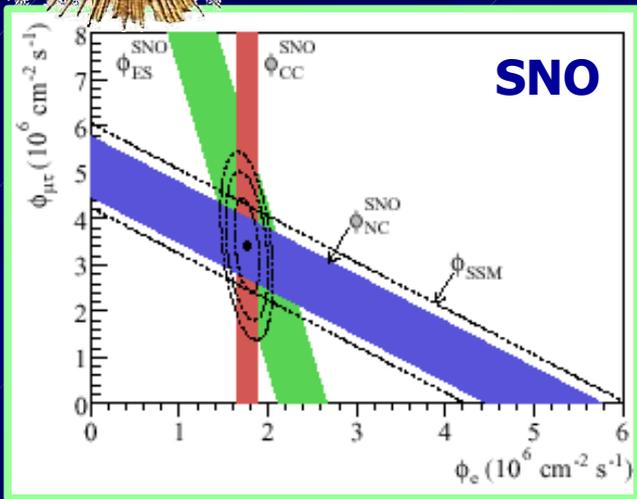
On trouve expérimentalement que : $\Delta m_{12}^2 \ll \Delta m_{23}^2$ et $\theta_{13} \ll 1$

➔ Découplage possible.
Oscillation à deux saveurs.

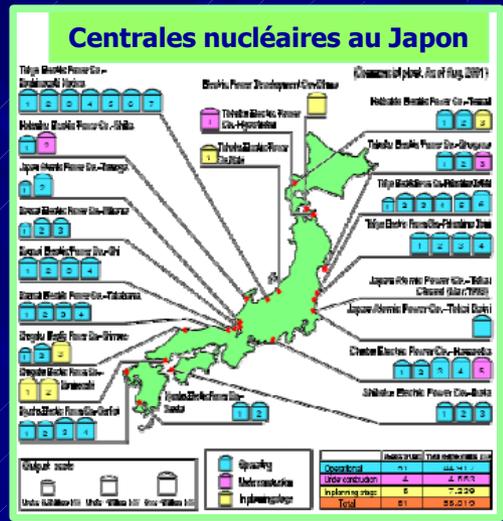
- Neutrino solaire
- Neutrino atmosphérique



Les neutrinos solaires



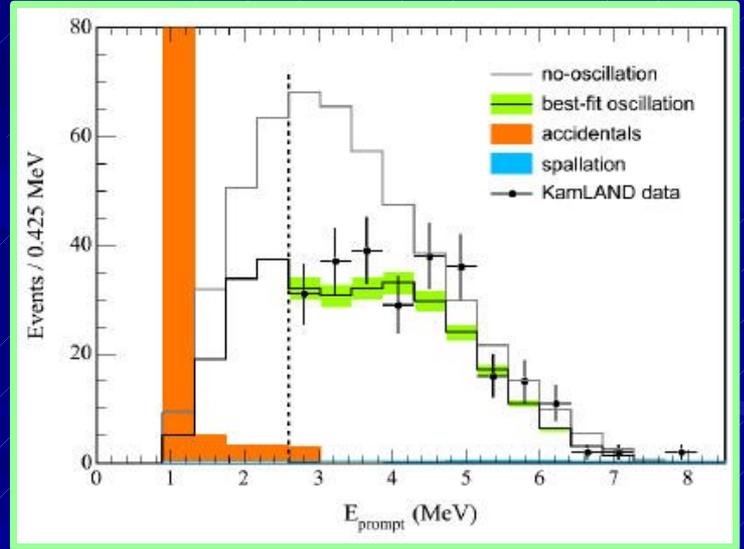
KamLAND: Détecte les anti-neutrinos des centrales nucléaires dans 1 kt de scintillateur liquide.



SNO : 1 kt d'eau lourde

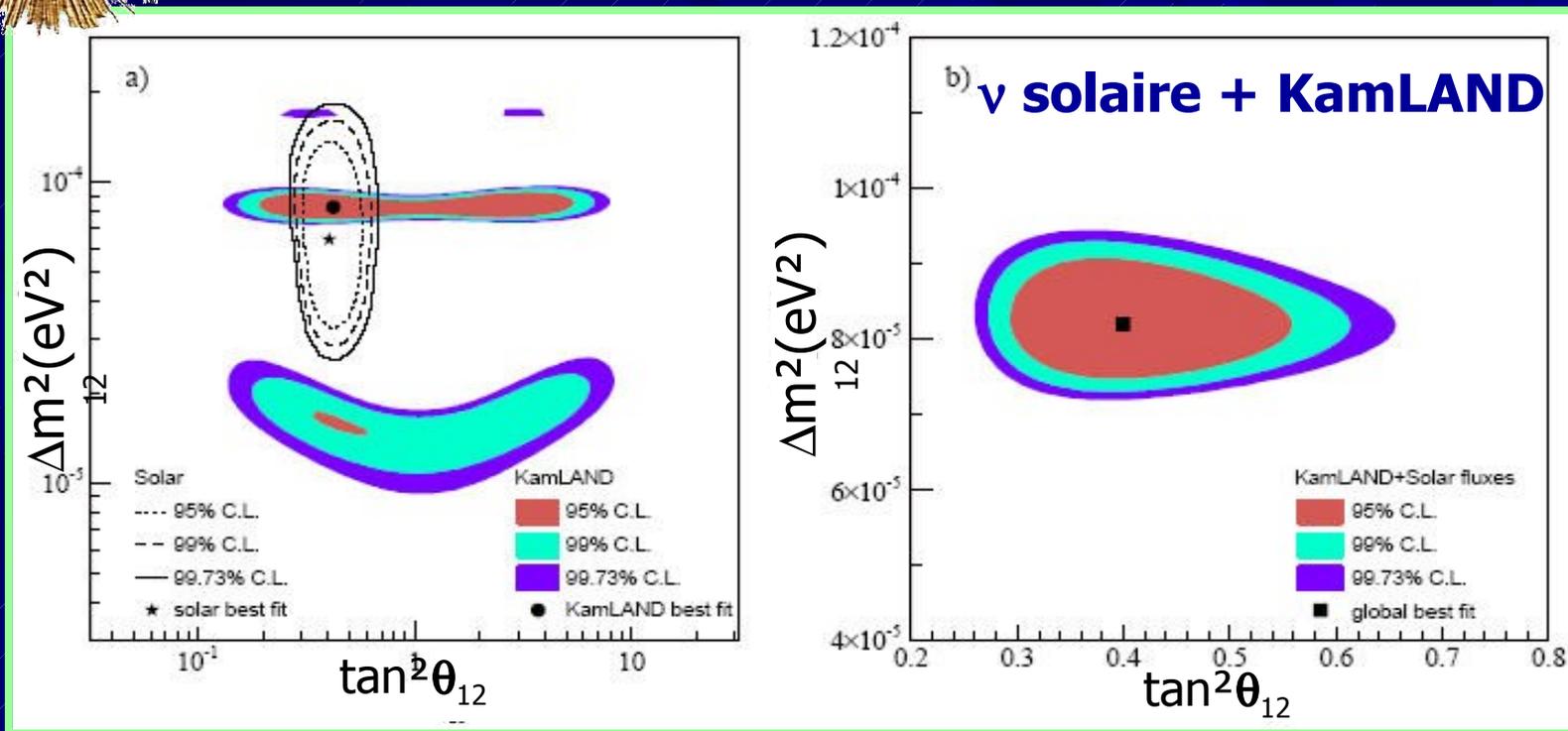
- • Interaction courants neutres
 $\nu_x + d \rightarrow p + n + \nu_x$
- • Interaction courants chargés
 $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$
- • Interaction quasi élastique
 $\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$

} SK,
IMB
HS





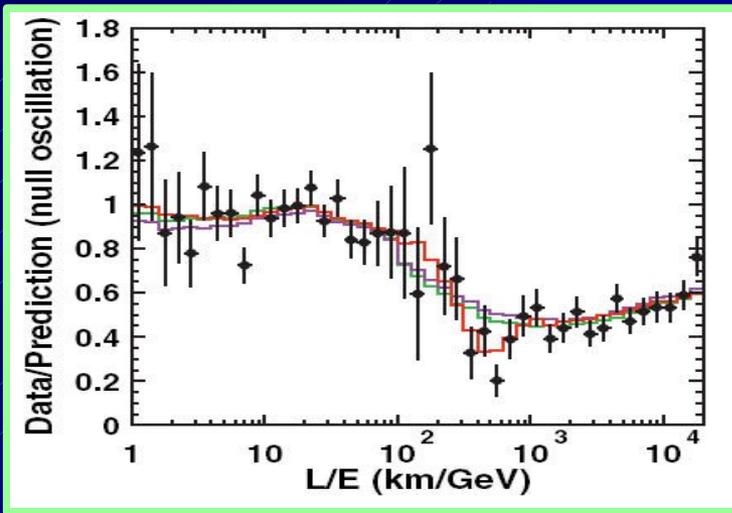
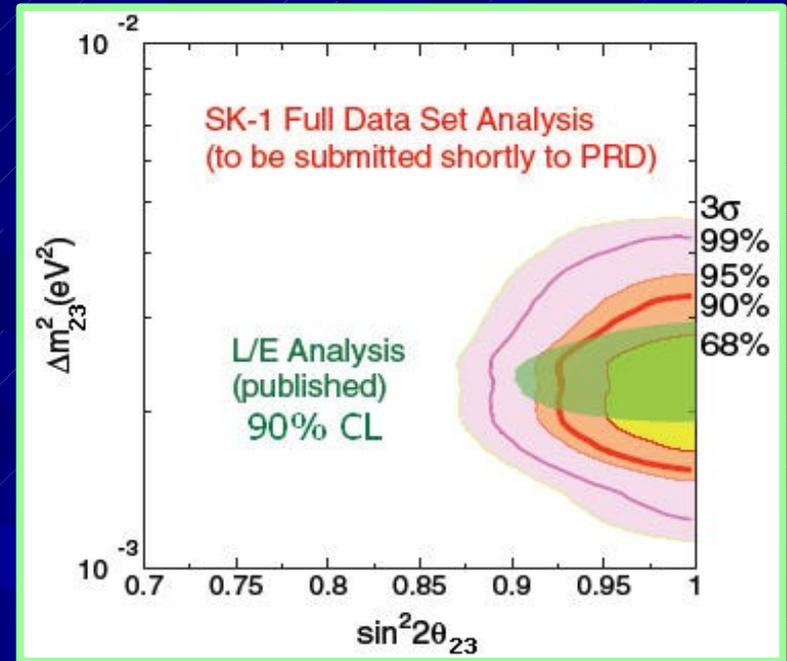
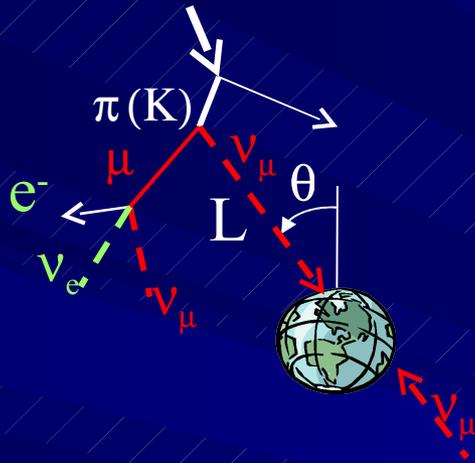
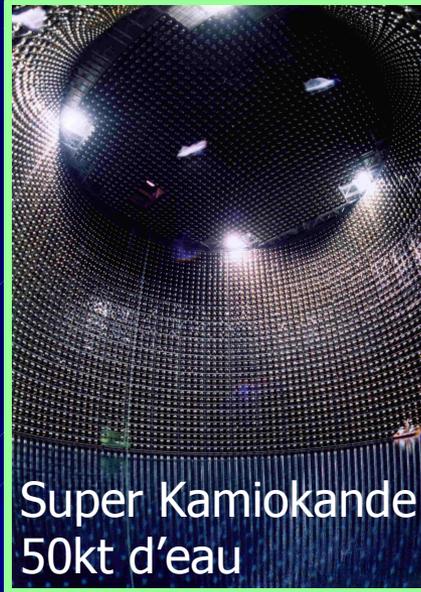
Les neutrinos solaires



L'effet MSW dans le soleil permet de déterminer que $\Delta m^2_{12} > 0$

$$\Delta m^2_{12} = 8,2 \cdot 10^{-5} \text{eV}^2 ; \theta_{12} = 32^\circ$$

Neutrinos atmosphériques



$$\Delta m^2_{23} = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{eV}^2 ; \theta_{23} = 45^\circ$$



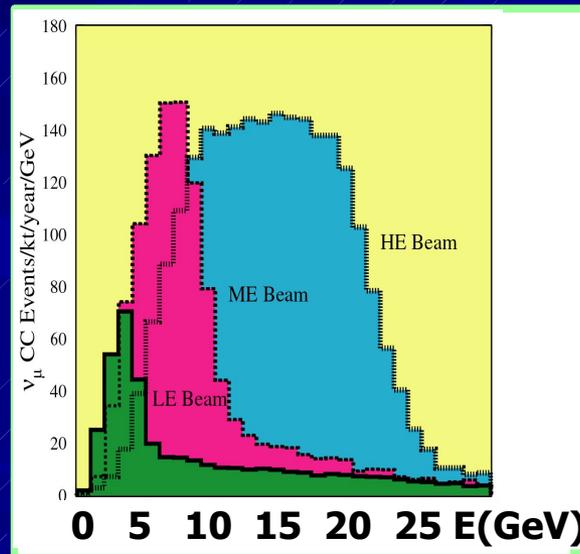
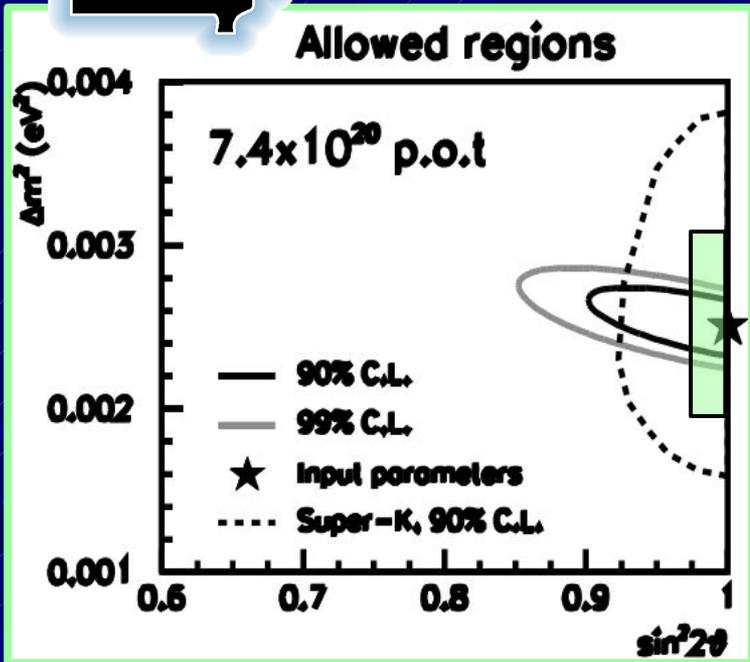
MINOS



$$P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu} \simeq 1 - \sin^2 2\theta_{23} \sin^2 \left(\frac{1,27 \Delta m_{23}^2 L}{E_\nu} \right)$$

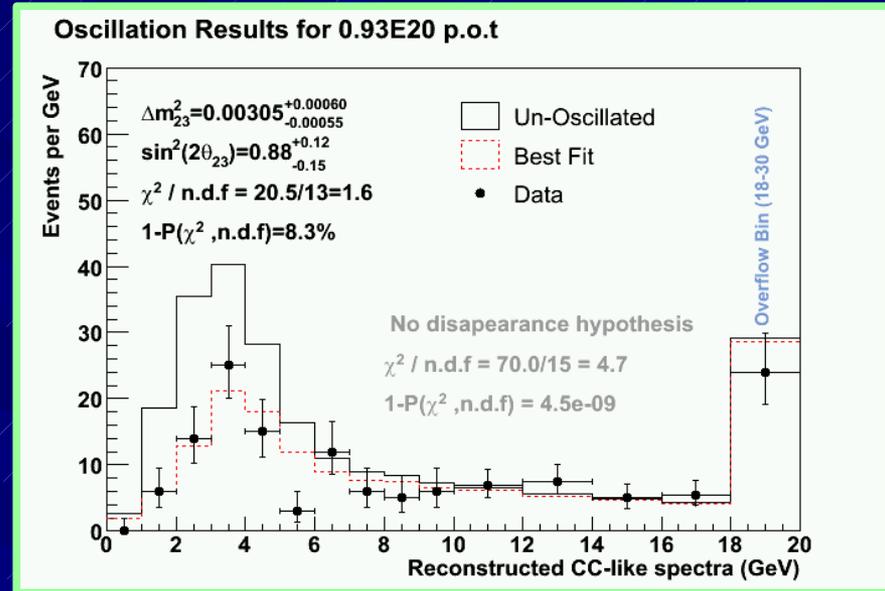
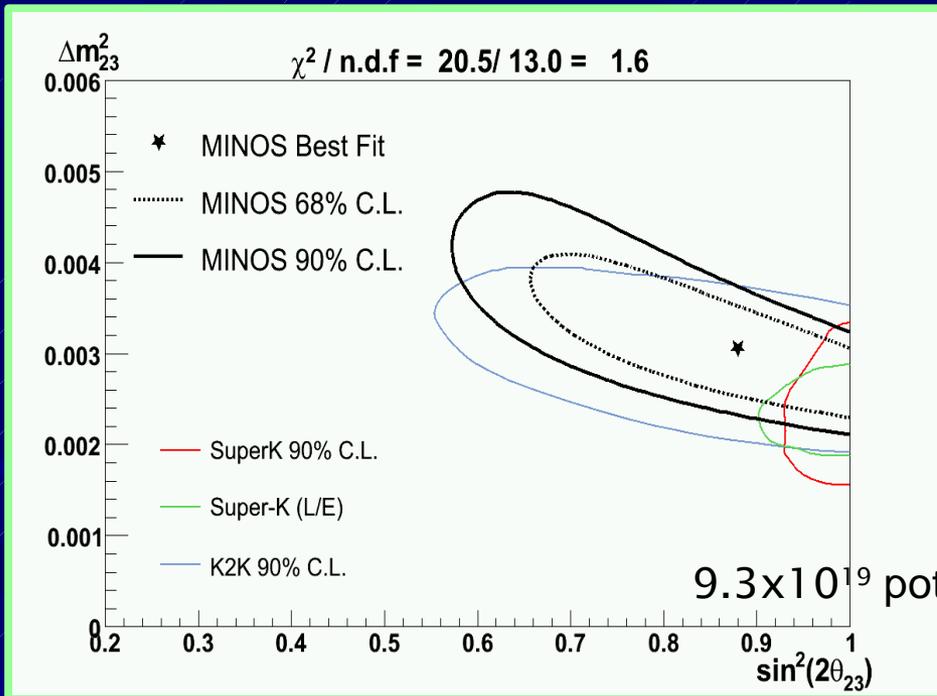
- $\Delta m_{23}^2 \approx 2,5 \cdot 10^3 \text{ eV}^2$
- $L = 732 \text{ km}$

Maximum d'oscillation :
 $E_\nu = 1,5 \text{ GeV}$



Premiers résultats de MINOS

Joint Theoretical Experimental Seminar, Fermilab,
30 mars 2006

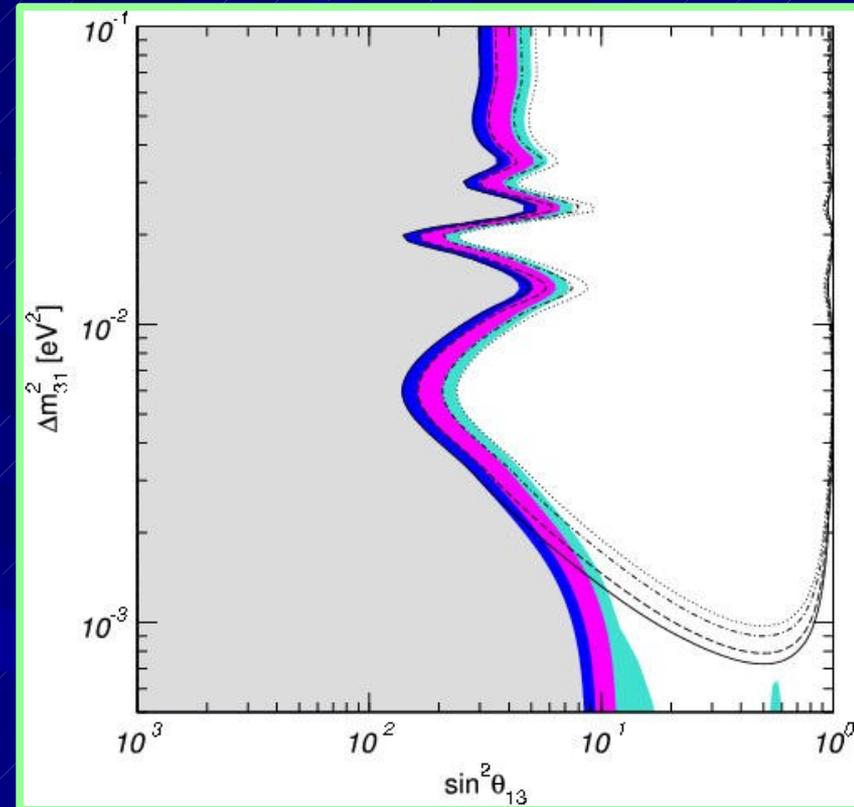
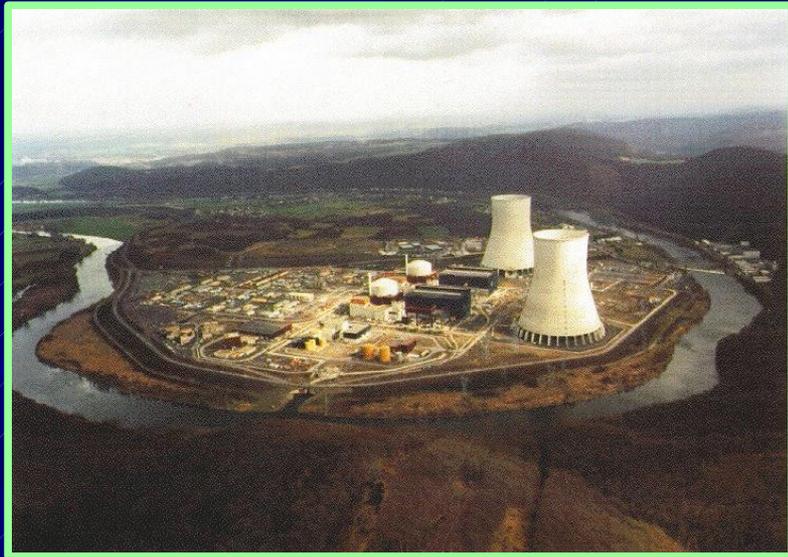


$$\Delta m_{23}^2 = 3,05^{+0,60}_{-0,55} \text{ (stat)} \pm 0,12 \text{ (syst)} \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\sin^2 \theta_{23} = 0,88^{+0,12}_{-0,15} \text{ (stat)} \pm 0,06 \text{ (syst)}$$

Les derniers paramètres inconnus

Le dernier angle θ_{13} n'est toujours pas mesuré, de même que la phase de violation de CP δ_{CP}



CHOOZ + ν solaire + KamLand

$$\theta_{13} < 10^\circ \text{ (90\% CL)}$$

Quelque questions...

- Quel est la valeur de Δm_{23}^2 à 10% près?



MINOS

- En quoi oscille le ν_{μ} pour Δm_{23}^2 ?



OPERA

- Quelle est la valeur de θ_{13} ?
- Y a-t-il de la violation de CP dans le domaine leptonique?

CERN – MEMPHYS

T2K

UNO

...

Le projet de super faisceau de neutrinos

CERN-MEMPHYS

- La situation expérimentale.
 - Rappel sur les oscillations
 - Neutrinos solaires
 - Neutrinos atmosphériques
 - Minos
 - Les inconnues
- La quête de θ_{13}
- Le projet Européen

- Expérience d'apparition de ν_e
- Donne accès à θ_{13} et à δ_{CP} .

$$\begin{aligned}
 \mathcal{P}_{\nu_\mu \rightarrow \nu_e}^{mat} = & \quad 4c_{13}^2 s_{13}^2 s_{23}^2 \sin^2 \Delta_{31} \quad \text{Terme en } \theta_{13} \\
 & + 8c_{13}^2 s_{12} s_{13} s_{23} (c_{12} c_{23} c_\delta - s_{12} s_{13} s_{23}) \cos \Delta_{23} \sin \Delta_{31} \sin \Delta_{12} \quad \text{CP pair} \\
 & - 8J \sin \Delta_{23} \sin \Delta_{31} \sin \Delta_{12} \quad \text{CP impair} \\
 & + 4s_{12}^2 c_{13}^2 (c_{12}^2 c_{23}^2 + s_{12}^2 s_{23}^2 s_{13}^2 - 2c_{12} c_{23} s_{12} s_{23} s_{13} c_\delta) \sin^2 \Delta_{12} \quad \text{Terme solaire} \\
 & - 8c_{13}^2 s_{13}^2 s_{23}^2 \cos \Delta_{23} \sin \Delta_{31} \frac{V_{CL}}{2} (1 - 2s_{13}^2) \quad \text{Effet de matière}
 \end{aligned}$$

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = A^2 + S^2 - 2AS \sin \delta$$

$$P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) = A^2 + S^2 + 2AS \sin \delta$$

$$\mathcal{A}_{CP} = \frac{2AS \sin \delta}{A^2 + S^2}$$

Avec

$$A \approx \sqrt{2} \theta_{13}$$

$$S \approx 0,025 \text{ (LMA)}$$

Amplitude faible, mais asymétrie grande!!!

- Bruit de fond : les neutrinos électroniques du faisceau:
 $\mu^\pm, K^0 \rightarrow$ neutrino électroniques

La quête de θ_{13}

Computed with:

MINOS: Start in 2005, 5 years
integrating $14 \cdot 10^{21}$ pot

OPERA: Full detector since 2007

ICARUS: Full detector (3 kton)
since 2008

Double Chooz: start in 2008

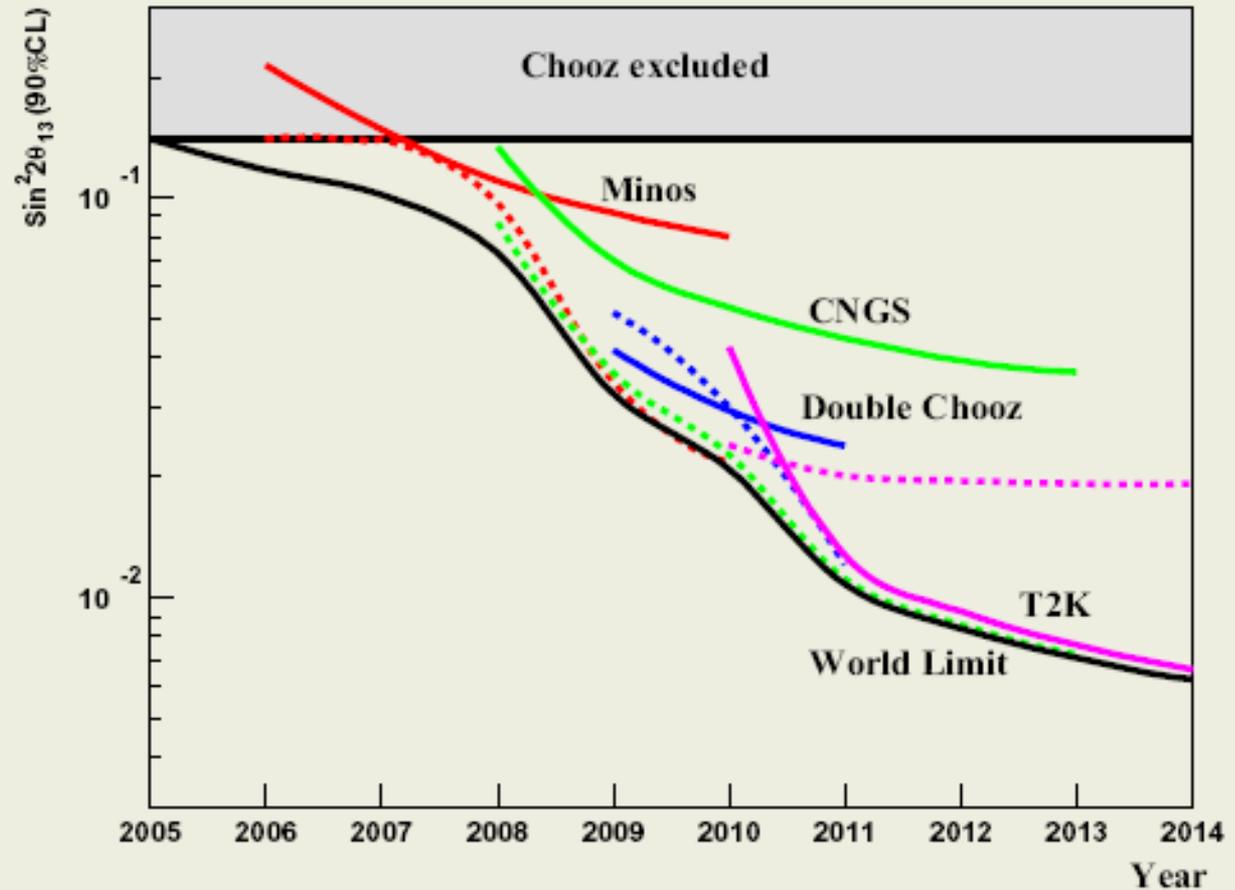
T2K: start in 2009, first year at
10% of nominal luminosity.

Solid lines:

Experimental sensitivity of the
single experiment

Dotted lines:

World limit without the single
experiment



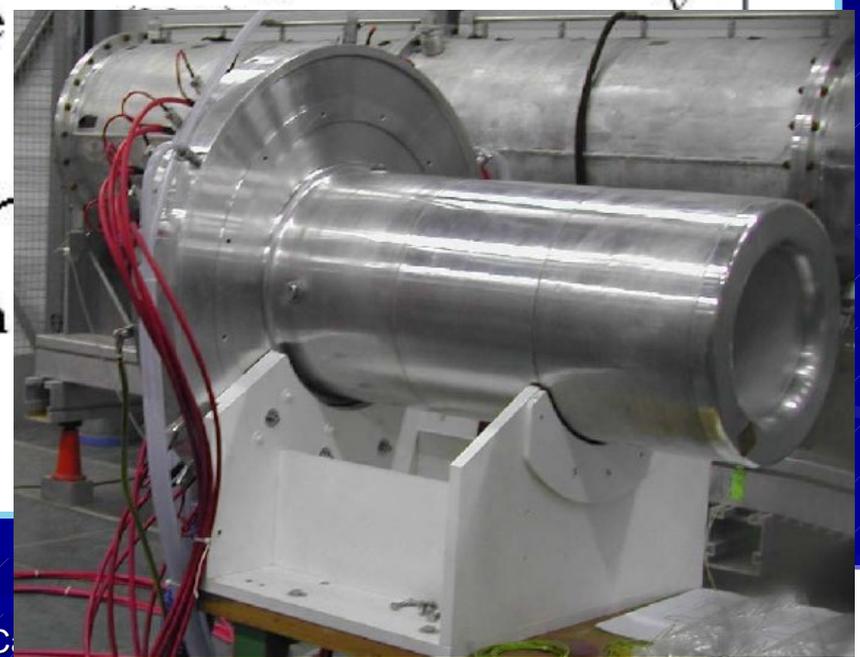
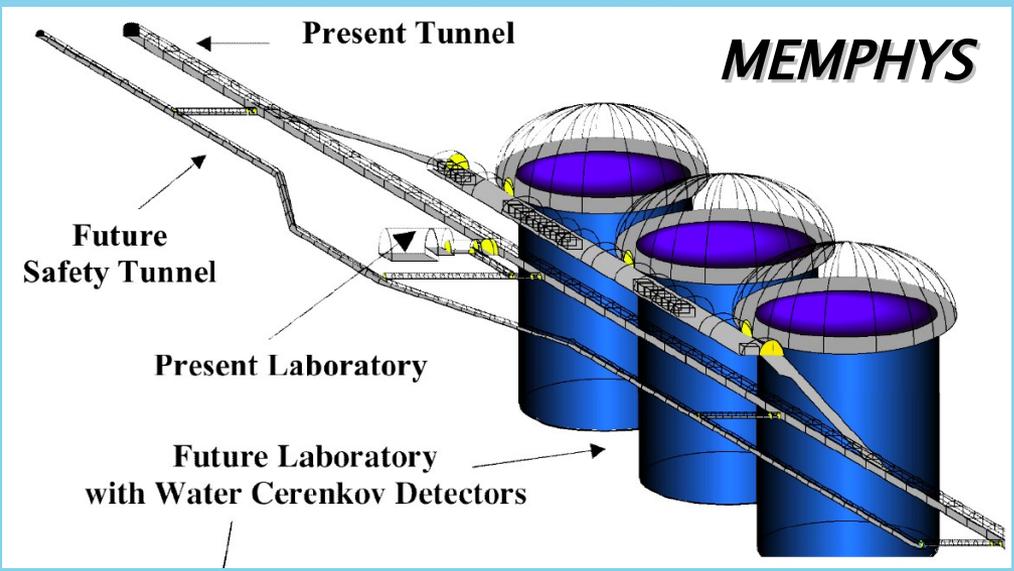
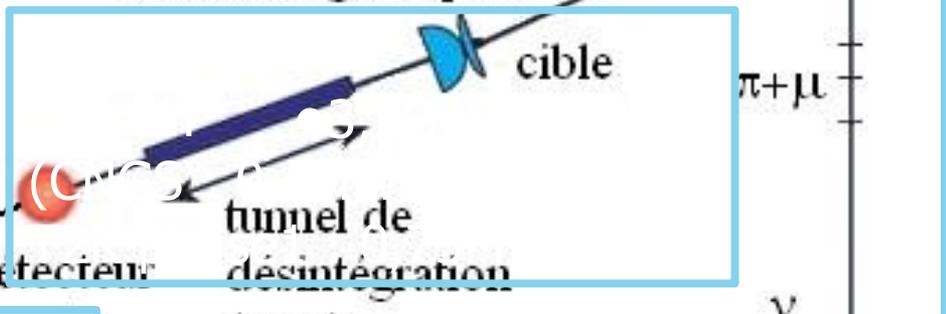
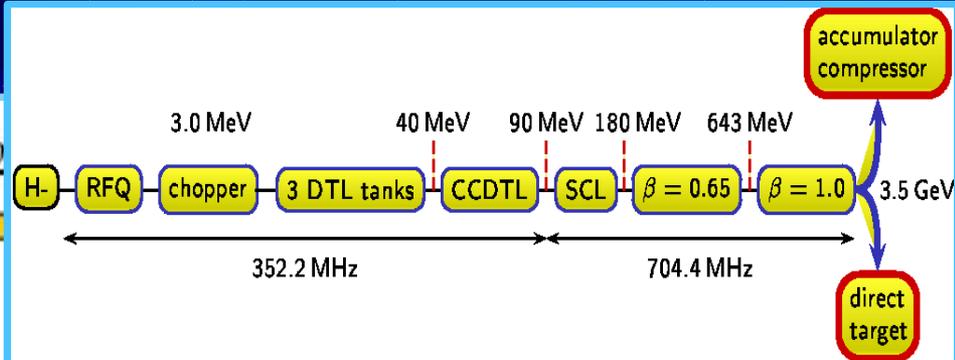
M. Mezzeto

Le projet de super faisceau de neutrinos

CERN-MEMPHYS

- La situation expérimentale.
- La quête de θ_{13}
- Le projet Européen
 - Le super faisceau de neutrino
 - β beam
 - MEMPHYS
 - Le potentiel de physique.

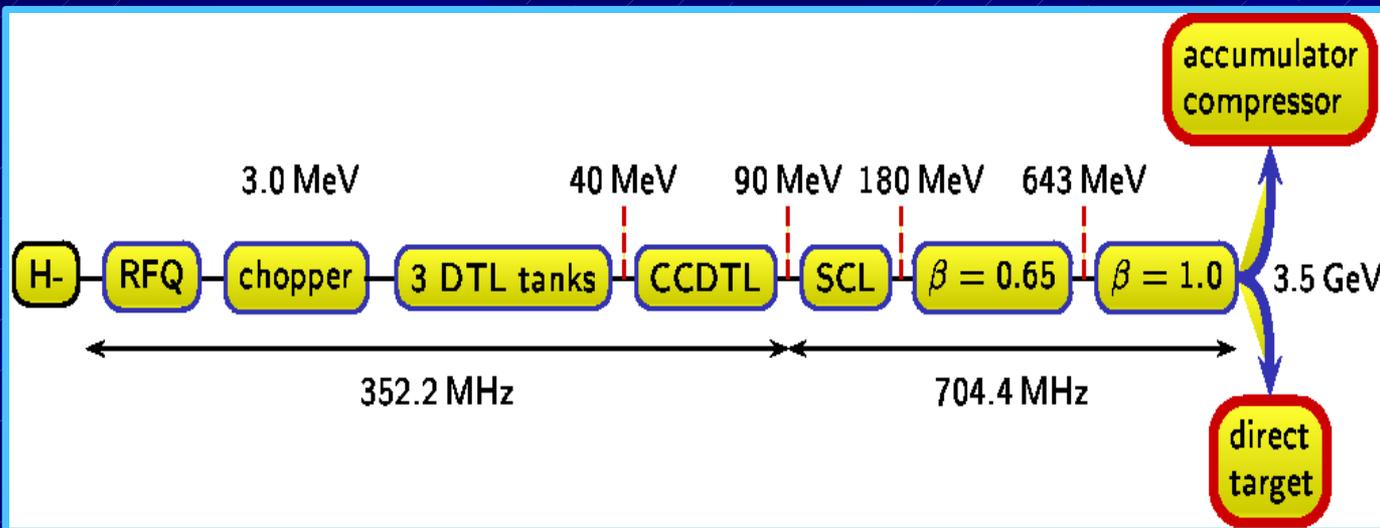
H⁻ linac, 2



Le Super Proton Linac (SPL)

■ Buts :

- Augmenter les performances des accélérateurs du CERN (PS, SPS et LHC)
- Source de protons pour les prochaines expériences neutrino et les faisceau d'ion radioactifs.

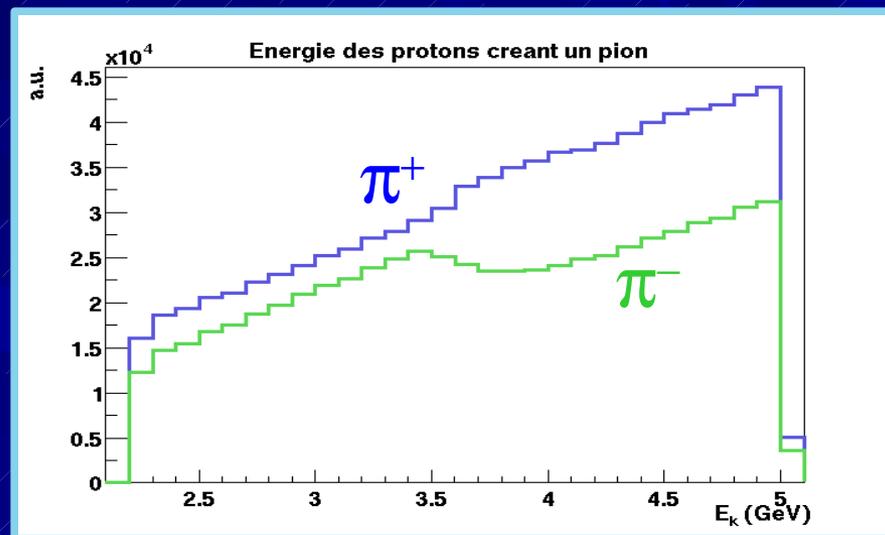
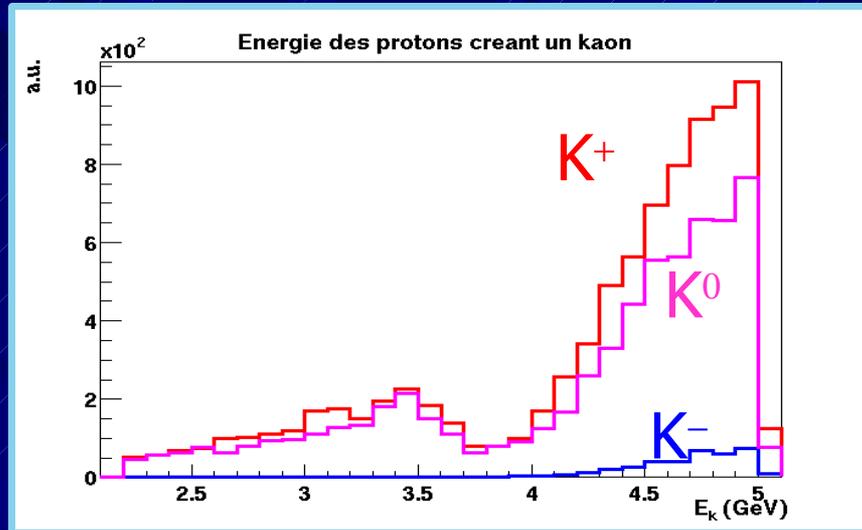


Mise en temps pour :
- Super faisceaux
- ν Fact

- Ions radioactifs (EURISOLD)
- β beam

R. Garoby

- Faisceau de protons :
 - filiforme
 - $E_k = 2.2\text{GeV}, 3.5\text{GeV}, 4.5\text{GeV}, 6.5\text{GeV}$ et 8GeV
- Normalisé à 4MW.
 - $1,1 \cdot 10^{16} \text{pot/s@}2,2\text{GeV}$
 - $0,7 \cdot 10^{16} \text{pot/s@}3,5\text{GeV}$
- Cible :
 - Cylindre de 30cm de long, \varnothing 15mm.
 - Mercure liquide : $Z=80$
 - 1MW déposé!!!
 - FLUKA 2002.4 et MARS



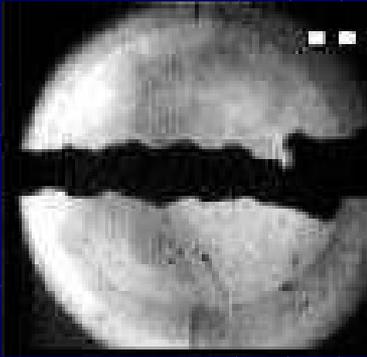
	2,2GeV	3,5GeV	4,5GeV
π^+/s	0,26	0,29	0,32
K^+/s	$7,7 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$5,2 \cdot 10^{-3}$

Optimisation :
 $E_k = 3,5 \text{ GeV}$

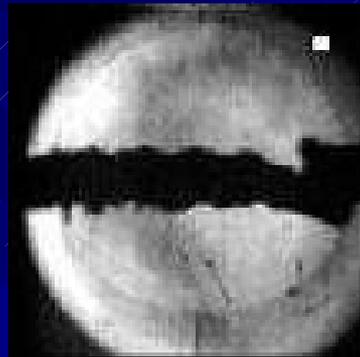
La cible en mercure liquide.

Test à BNL E-951

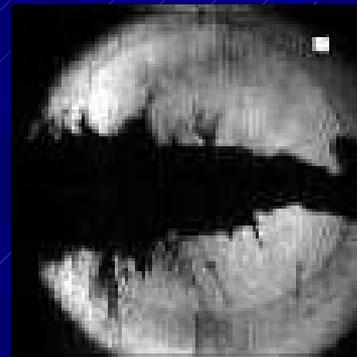
p
→



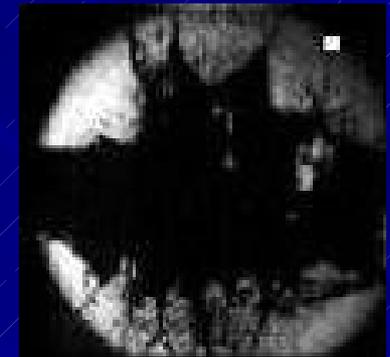
t = 0ms



0,75ms



4,5ms



13ms

■ Faisceau de protons :

- 24GeV
- $2,7 \cdot 10^{12}$ p/bunch
- $t_0 \approx 0,45$ ms

■ Jet de mercure :

- Ø12mm.
- Vitesse 2,5m/s

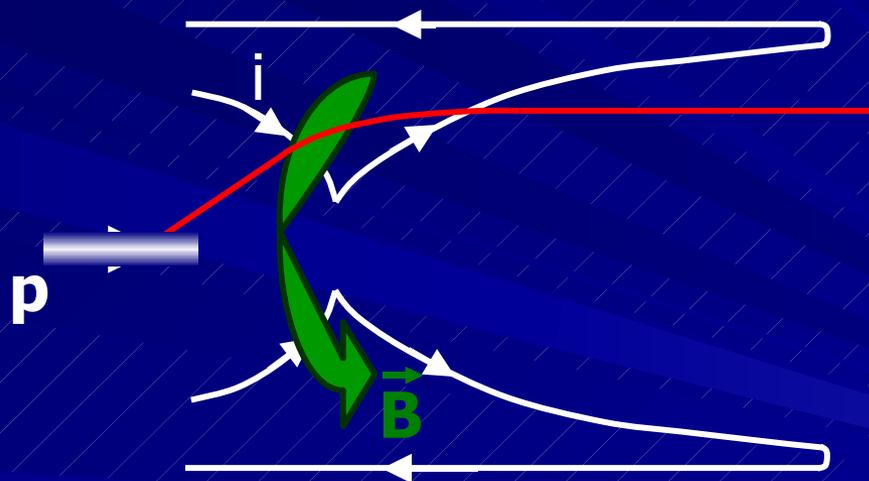
K.Mc Donald, H. Kirk, A. Fabich

La fabrication d'un faisceau de neutrinos

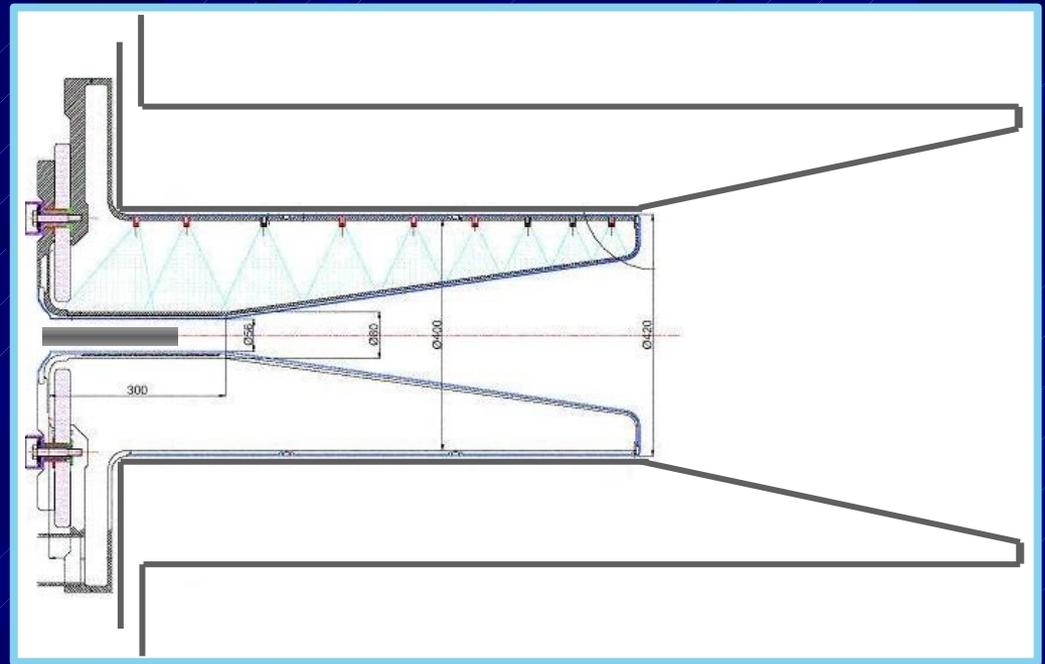
- Les pions et les kaons d'un signe sont focalisés à l'aide d'une «corne»



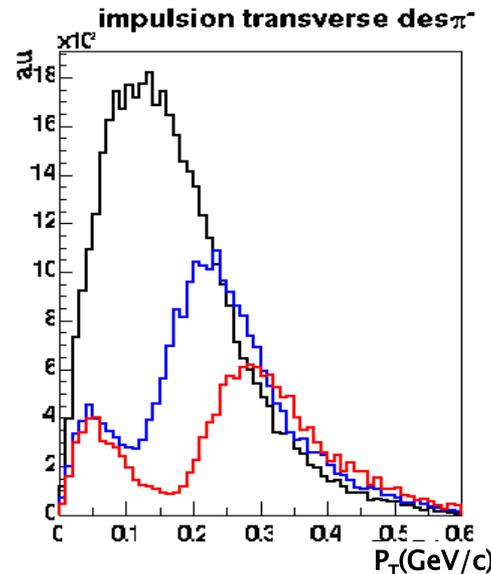
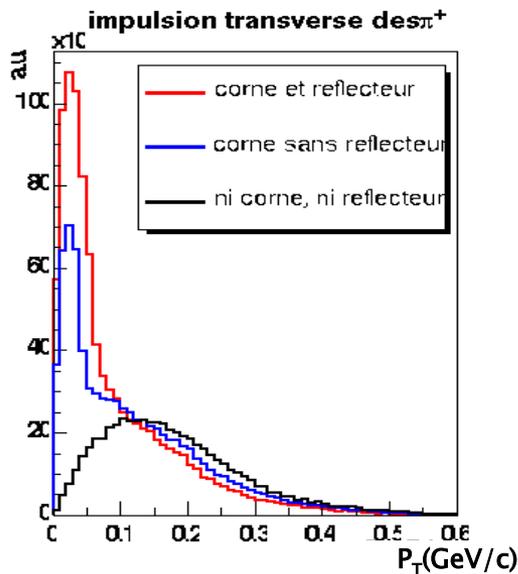
S. Van der Meer, 1961



- 2 cornes concentriques
- 300kA et 600kA
- Épaisseur des conducteurs : 3mm



- Impulsion transverse des pions.



- Les particules sortent un grand angle:

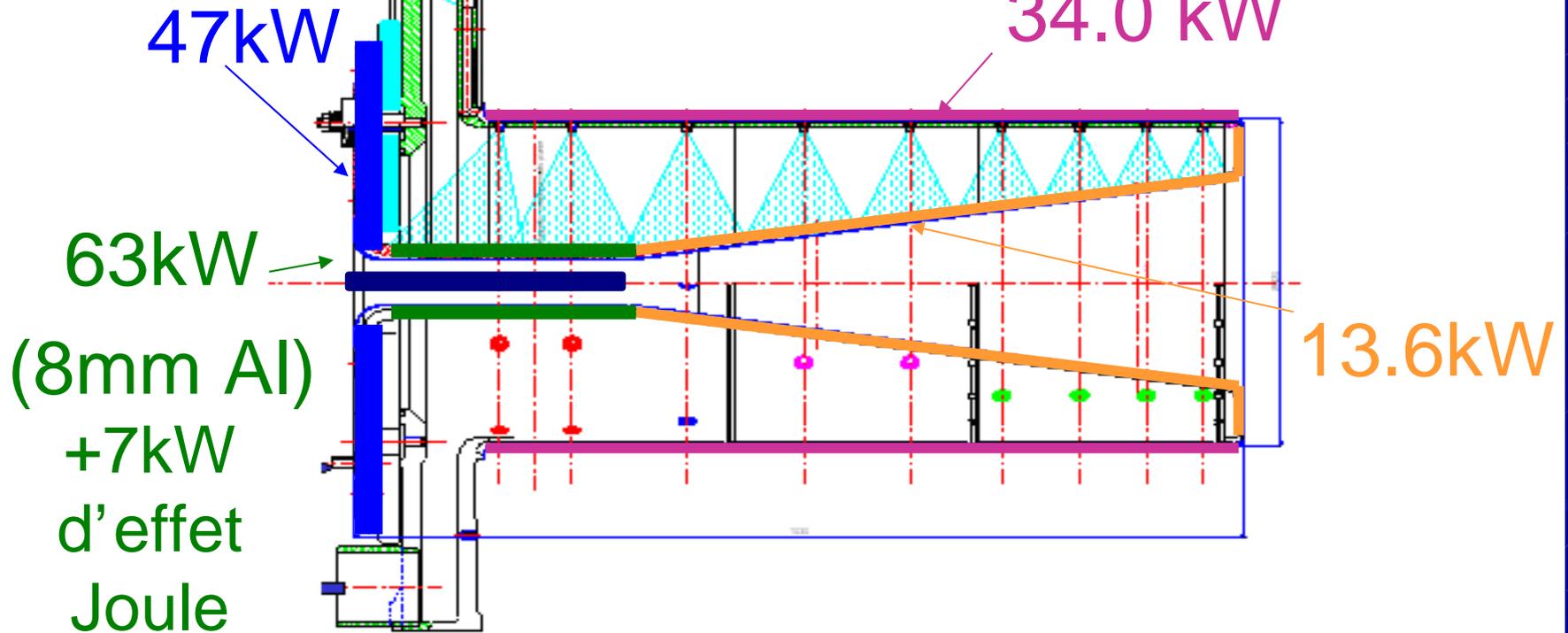
- $\langle \theta_\pi \rangle = 60^\circ @ 2,2 \text{ GeV}$

- $\langle \theta_\pi \rangle = 55^\circ @ 3,5 \text{ GeV}$

- La corne doit entourer la cible.

Dépôt d'énergie dans la corne

4MW, 2.2GeV

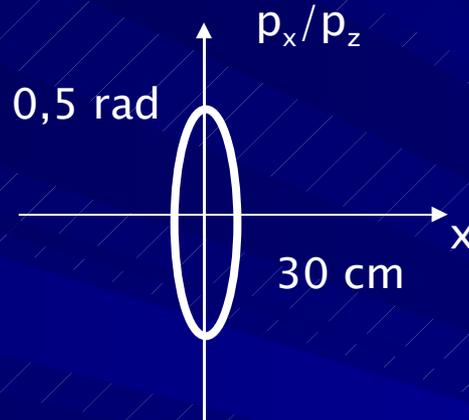


Solution en cours d'investigation : réduire l'épaisseur d'aluminium (3mm Al) + des renforts.

Optimisation de la corne

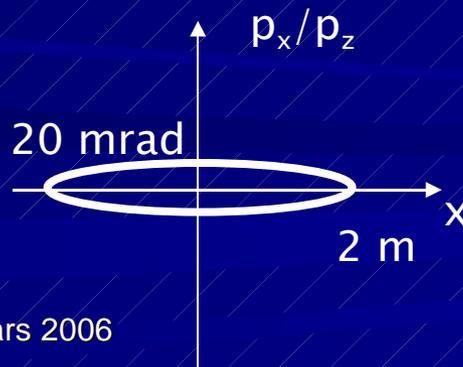
Usine à neutrinos

- Tunnel de désintégration = solénoïde



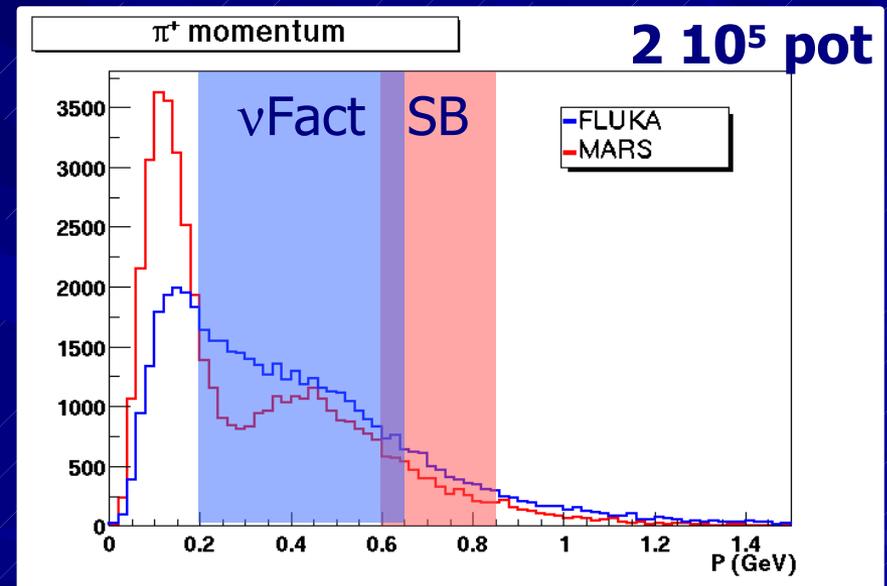
Super Beam

- Faisceau de 130km
- Rayon du tunnel

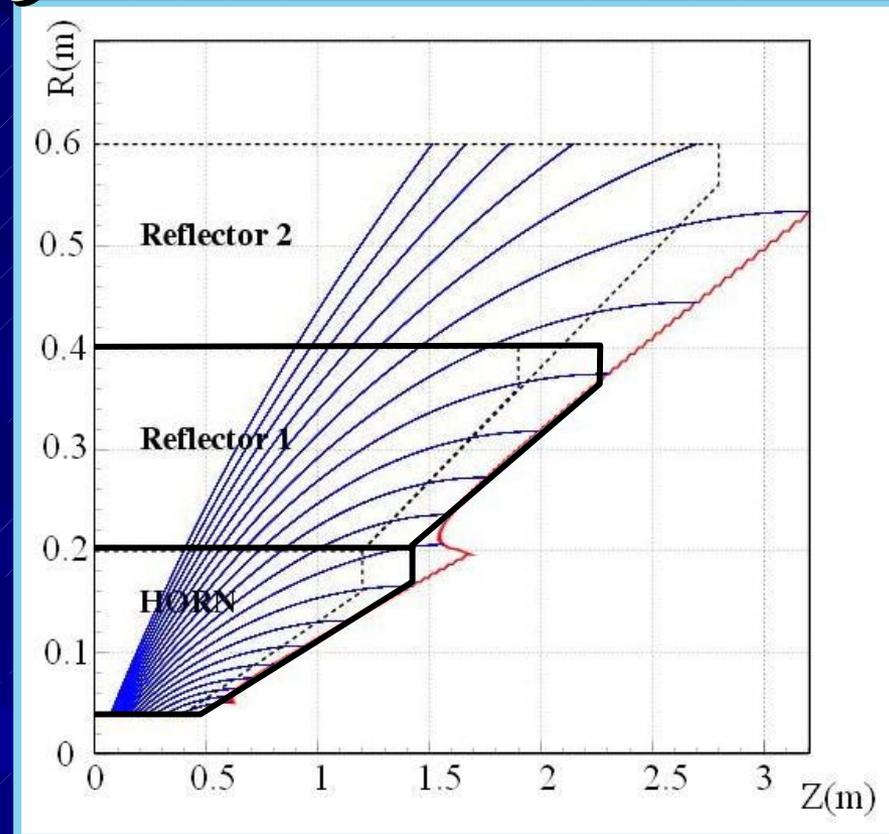
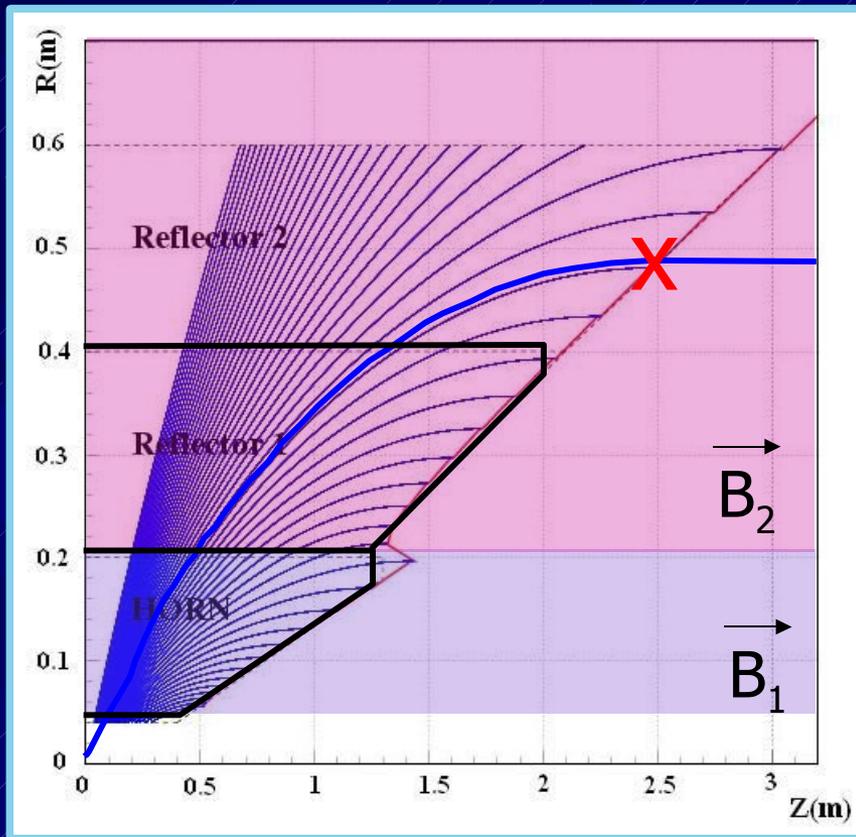


Energie

À la sortie de la cible.



Optimisation de la forme des cornes



2 optimisations ont été étudiées :

• $E_\nu \sim 260$ MeV

• $E_\nu \sim 300$ MeV

($p_\pi = 600$ MeV/c)

($p_\pi = 800$ MeV/c)

Maximum d'oscillation

Optimisation du tunnel de désintégration

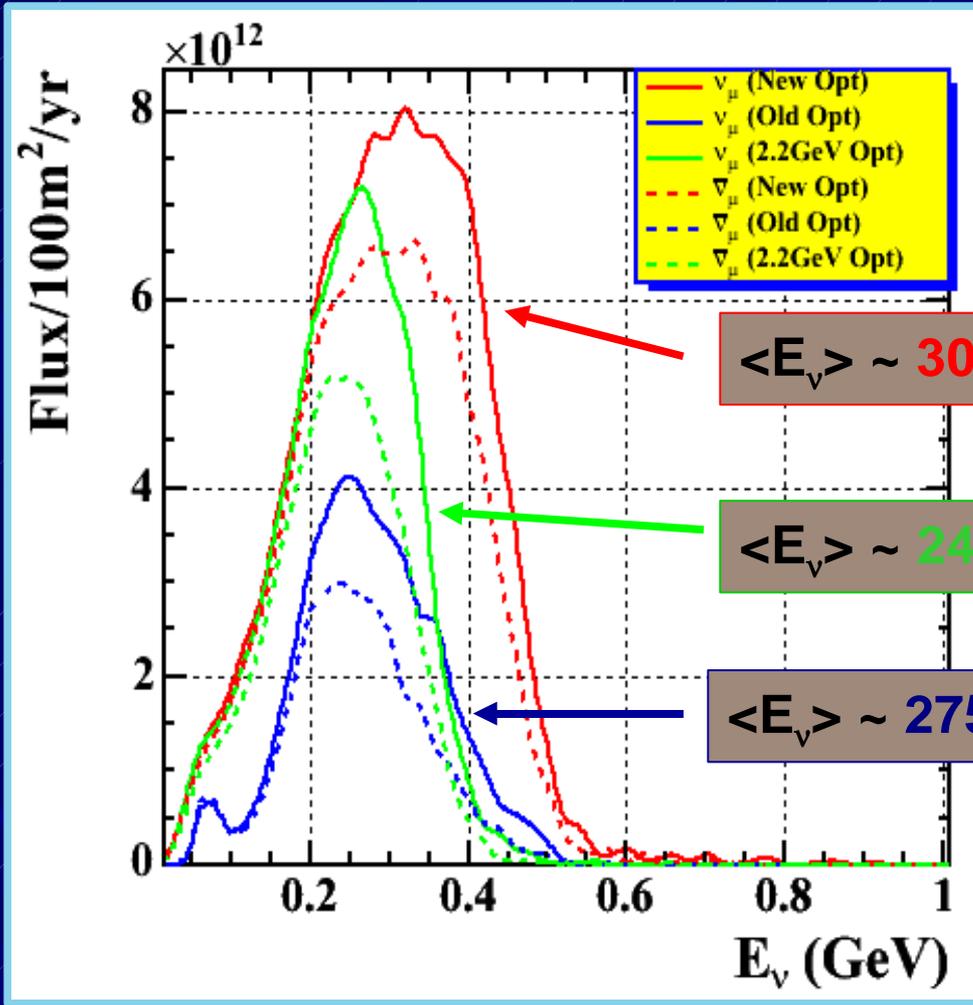
- Les particules vont se propager sur quelques dizaines de mètres dans un tunnel où le vide existe.
- Le tunnel débute juste après la corne.

- La longueur du tunnel modifie la pureté du faisceau.
- Test : $L=10\text{m}$, 20m , 40m et 60m .
 - $10\text{m} \rightarrow 40\text{m}$
 - $v_\mu, \bar{v}_\mu + 50\%$ à 70%
 - $v_e, \bar{v}_e + 50\%$ à 100%
 - $40\text{m} \rightarrow 60\text{m}$
 - $v_\mu, \bar{v}_\mu + 5\%$
 - $v_e, \bar{v}_e + 20\%$
- Le rayon du tunnel modifie l'acceptance
- Test: $R=1\text{m}$, 1.5m et 2m
 - $1\text{m} \rightarrow 2\text{m}$ ($L=40$)
 - $v_\mu, \bar{v}_\mu + 50\%$
 - $v_e, \bar{v}_e + 50\%$ à 70%
- 2m à l'air meilleur

Ces résultats vont être vérifiés lors du calcul de la sensibilité à θ_{13} et à δ_{CP}

■ 40m à l'air meilleur

Flux à 130km



$$\sim 95 \nu_{\mu}^{\text{CC}} / \text{kT} / \text{an}$$



Amélioration des résultats

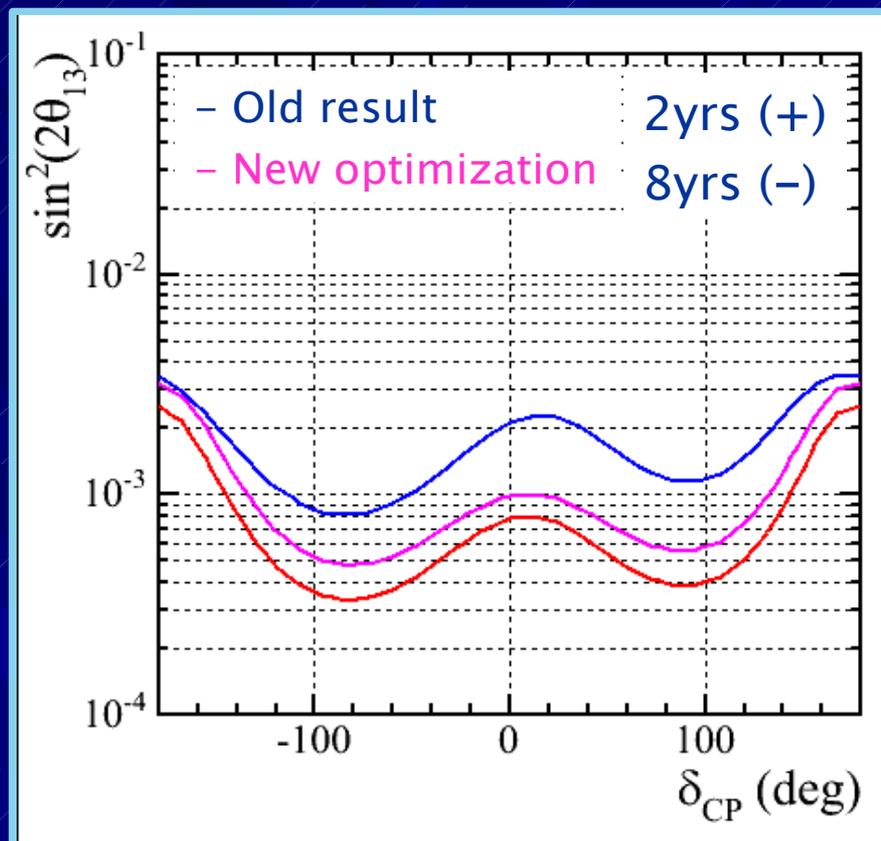
■ Focalisation mixte

– Accès à δ_{CP}

■ Pour équilibré

– 20% positive

– 80% négative



Campagne, Cazes : Eur Phys J C45:643-657,2006

Gain d'un facteur 4 sur
la sensibilité

Valeurs utilisées: $\delta_{CP}=0$, $\theta_{13}=0$,

$\sin^2 2\theta_{12}=0.82$,

$\theta_{23}=\pi/4$, $\Delta m^2_{21}=8.1 \cdot 10^{-5}$,

$\Delta m^2_{31}=2.2 \cdot 10^{-3}$

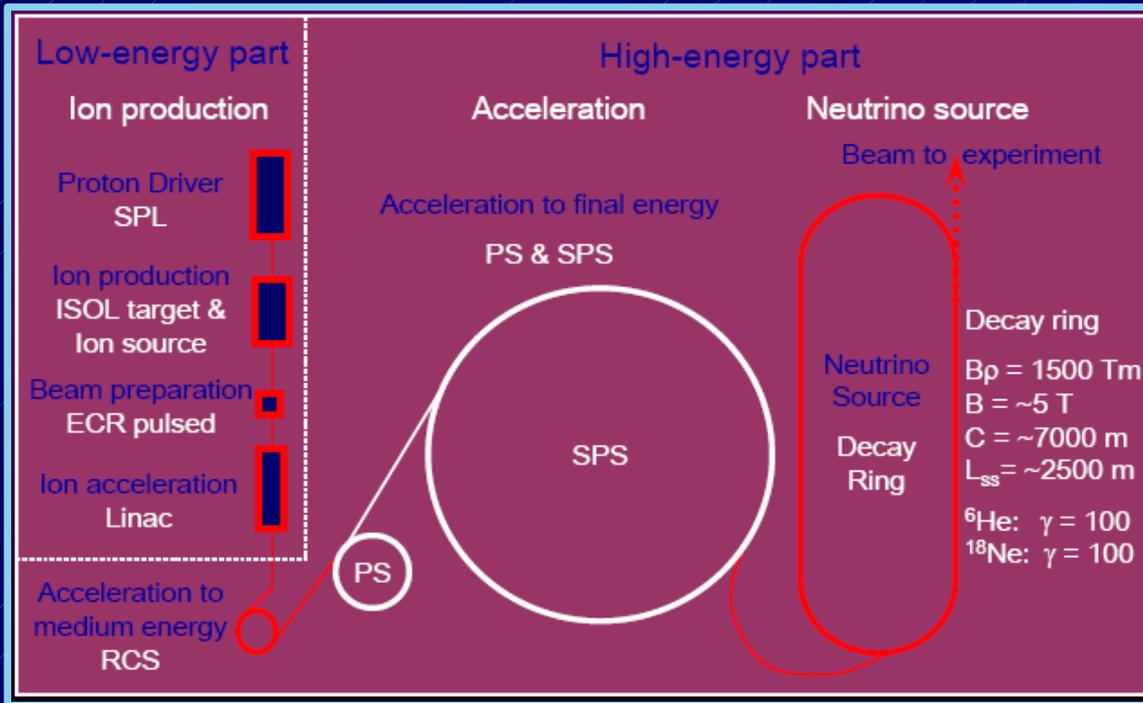
5% précision sur θ_{21} et Δm^2_{21}
2% syst. signal & bdf

Le projet de super faisceau de neutrinos

CERN-MEMPHYS

- La situation expérimentale.
- La quête de θ_{13}
- Le projet Européen
 - Le super faisceau de neutrino
 - Principe des faisceaux
 - description
 - optimisation
 - β beam
 - MEMPHYS
 - Le potentiel de physique.

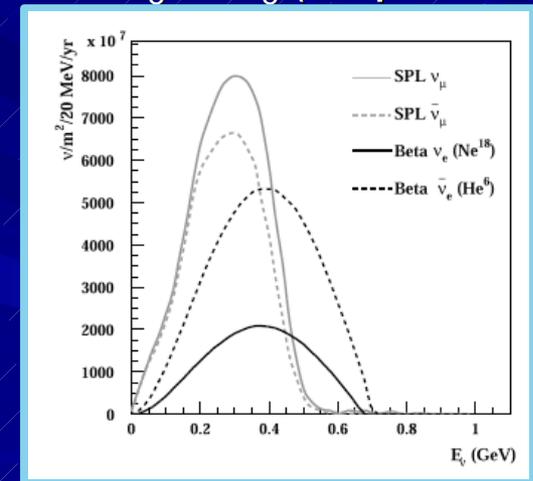
β beam



■ faisceau de ν_e ($\bar{\nu}_e$) pur

■ Canaux :

- $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ (apparition)
- $\nu_e \rightarrow \nu_e$ (disparition)



■ Idée nouvelle : capture d'électrons par le ${}^{19}\text{Ne}$

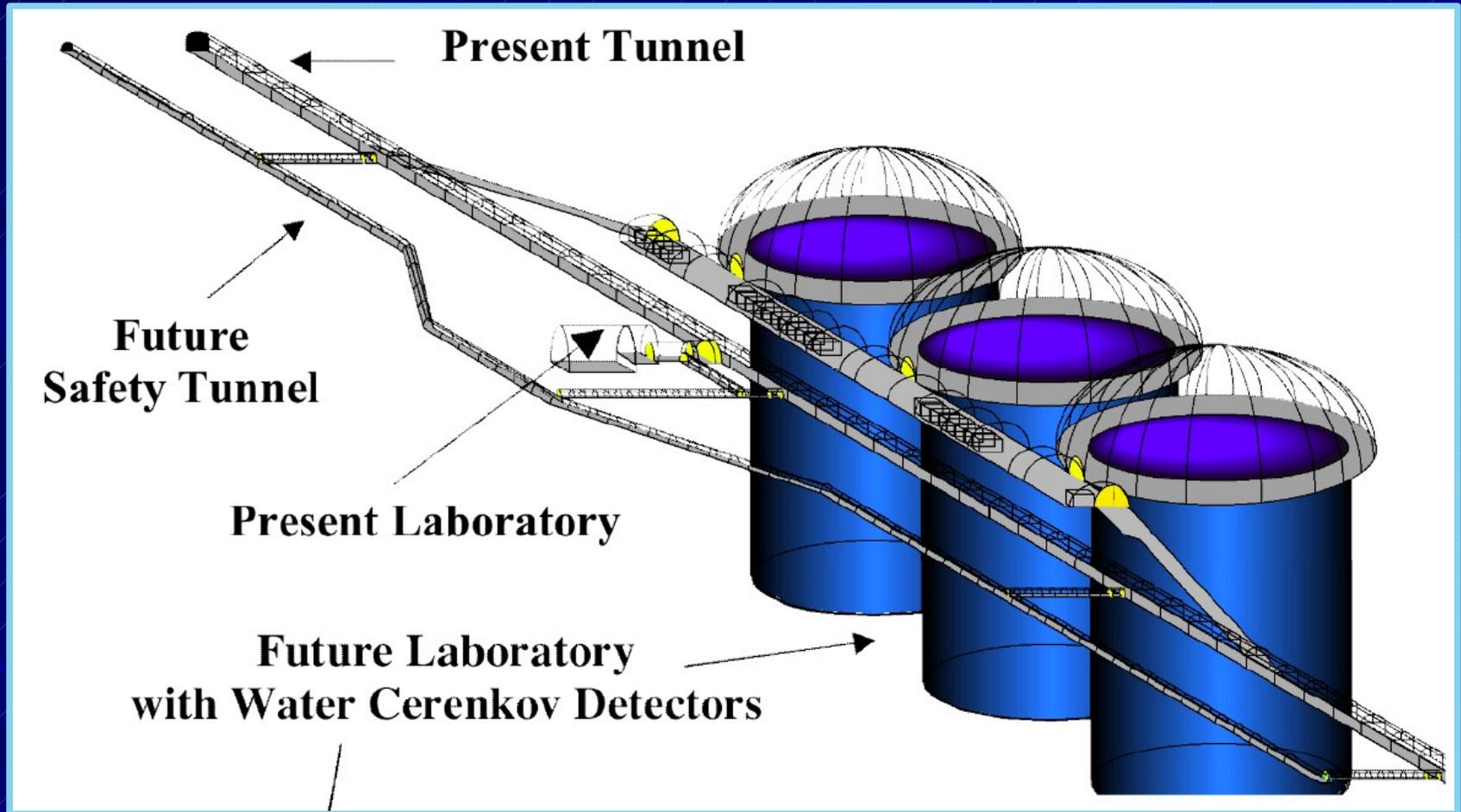
– Faisceau mono énergétique!

Le projet de super faisceau de neutrinos

CERN-MEMPHYS

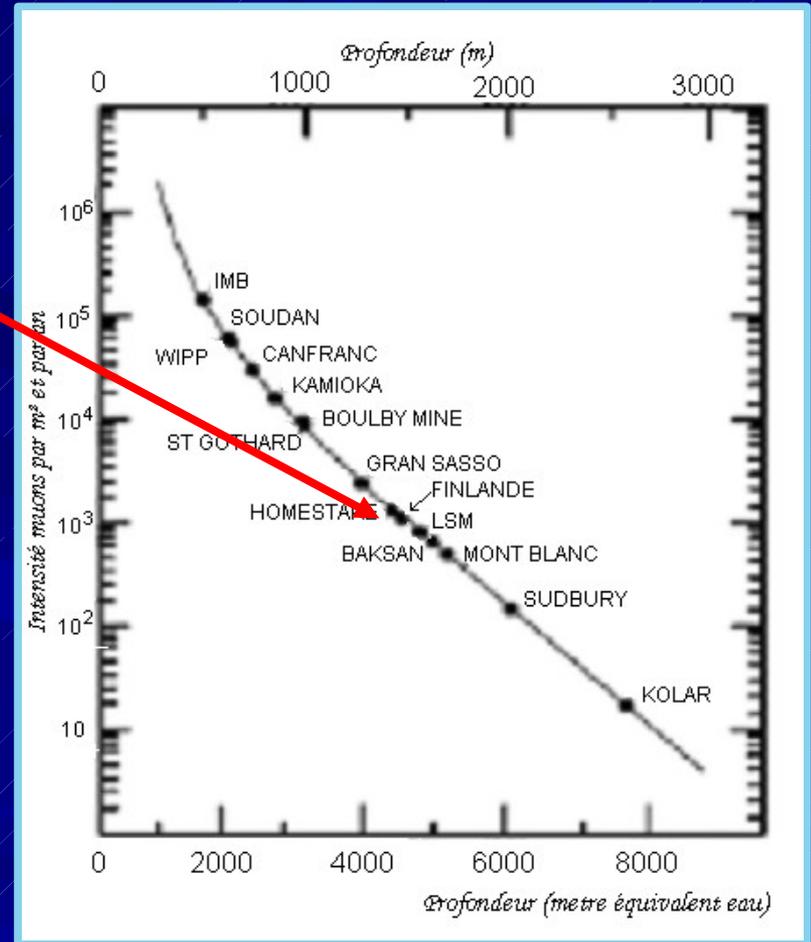
- La situation expérimentale.
- La quête de θ_{13}
- Le projet Européen
 - Le super faisceau de neutrino
 - β beam
 - MEMPHYS
 - Le potentiel de physique.

MEgaton Mass PHYSics (MEMPHYS)



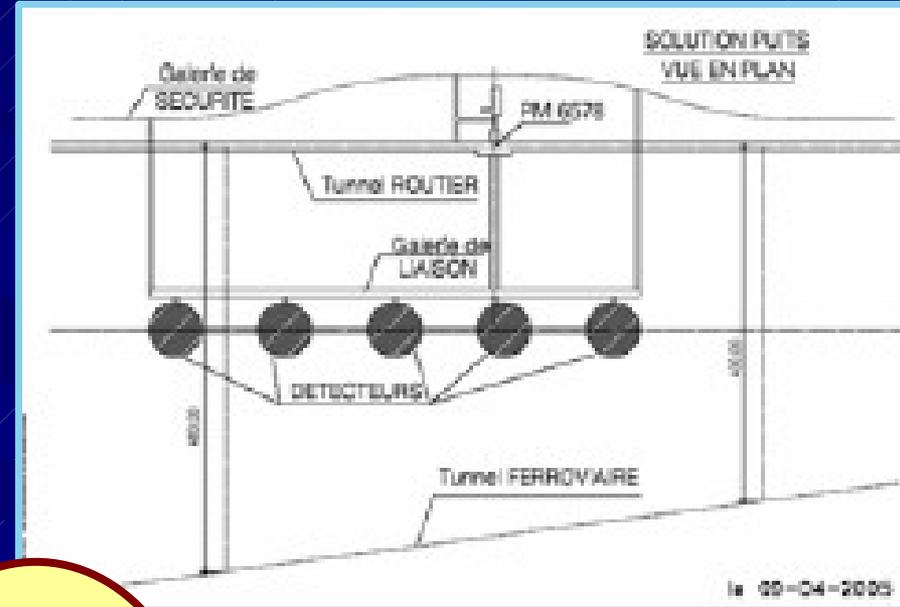
Le site

- Laboratoire Souterrain de Modane :
 - Très profond (4800mew)
 - Facile d'accès (TGV, autoroute, aéroports de Genève/Lyon/Turin)
 - Support des autorités locales



Le laboratoire

- Résultat d'une étude détaillée par la Société SETEC (construction du tunnel)
- ~80 M€ / puits
- Choix actuel : 3 puits
 - 3x 250 000 m³
 - ~3x150kT (masse fiduciaire)



Les Cerenkov à eau

■ Cerenkov à eau

- Faible coût / tonne
 - Principalement les PM et l'électronique.
- Limite :
 - atténuation de la lumière (80m à $\lambda=400\text{nm}$)
 - Pression sur les PMs : hauteur < 80m

■ Détection : Mesure des anneaux Cerenkov.

- Les particule neutre et sous le seuil Cerenkov sont perdues
- Seul les événements avec moins de 5 anneaux sont analysables
- La netteté des anneaux permet de séparer les (e,γ) des (μ,π)
- Mesure de l'énergie par le nombre de photo-électrons. (le seuil dépend de la couverture des photo-cathodes et de la pureté de l'eau)

■ Les détecteurs Cerenkov sont très appropriés pour mesurer les neutrinos jusqu'à quelques GeV

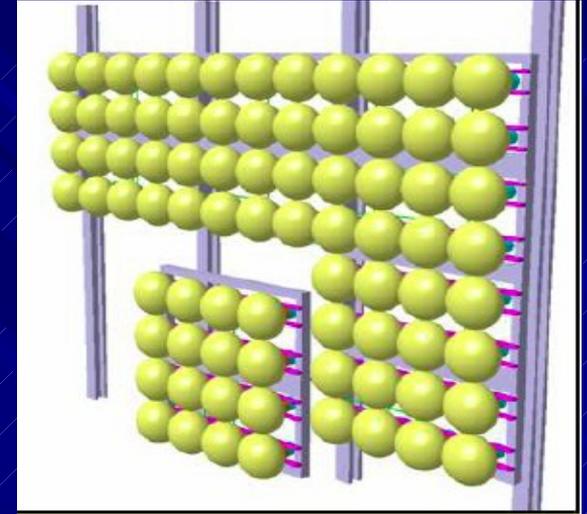
Photo détecteurs

■ Choix PM 12''

- 2 fois plus nombreux
- Couverture de 30%
- Même nombre de p.e.
- Meilleure résolution en temps et pixel plus précis.
- Moins cher.

■ Mais

- Doublement des voies d'électronique...
- R&D électronique :
 - IPNO
 - LAL
 - LAPP



	Hamamatsu	Photonis
Ø	20''	12''
Aire	1660 cm ²	615 cm ²
Eff. Q	20%	24%
Coll. eff	60%	70%
Prix	2500€	800€

But : seuil de 5MeV.

Le projet de super faisceau de neutrinos

CERN-MEMPHYS

- La situation expérimentale.
- La quête de θ_{13}
- Le projet Européen
 - Le super faisceau de neutrino
 - β beam
 - MEMPHYS
 - Le potentiel de physique.
 - Physique hors accélérateur
 - Oscillation de neutrinos

Physique Hors accélérateur

■ Désintégration du proton



- Signature : 3 anneaux électromagnétique

- Sensibilité : 10^{35} ans à 90%CL pour 5Mt.year



- Signature : produits de désintégration du Kaon

- Sensibilité : $2 \cdot 10^{34}$ ans à 90%CL pour 5Mt.year

Physique Hors accélérateur

■ Super Novae

- Effondrement
 - 1 SN à 10kpc $\sim 2 \cdot 10^5$ evts
 - Possible trigger pour télescope : 2 neutrinos dans un intervalle de temps de ~ 10 s \rightarrow jusqu'à 10Mpc
- hiérarchie de masse des neutrinos
 - Facteur $\tau_E = \langle E_{\nu_\mu} \rangle / \langle E_{\nu_e} \rangle$ à 1%
 - Possible de connaître la hiérarchie si $\sin\theta_{13} > 10^{-3}$
- Neutrinos relics
 - Signal observable à 2σ après 10 ans
 - Possibilité d'ajouter du Gd pour augmenter l'efficacité

Supernova detection with MEMPHYS

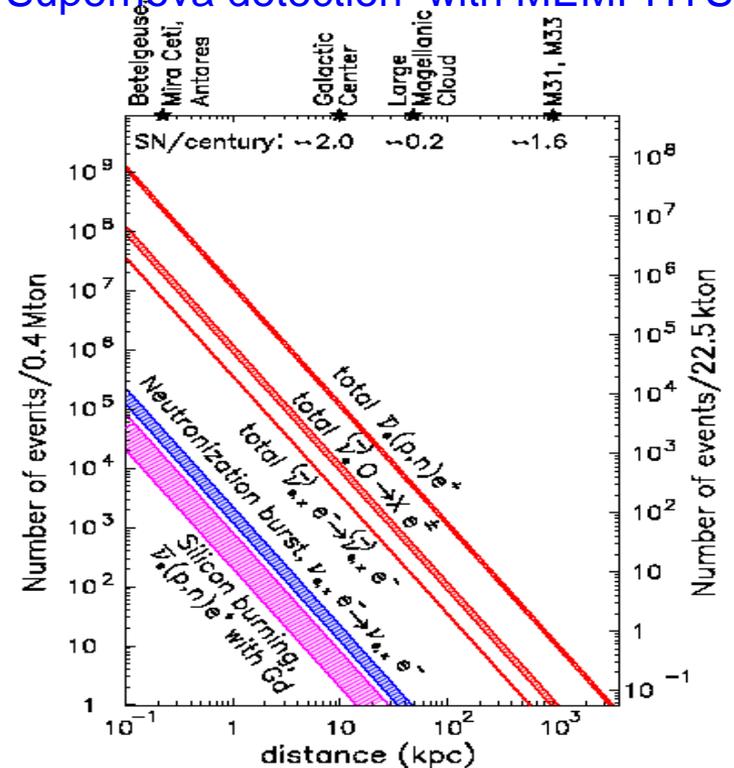


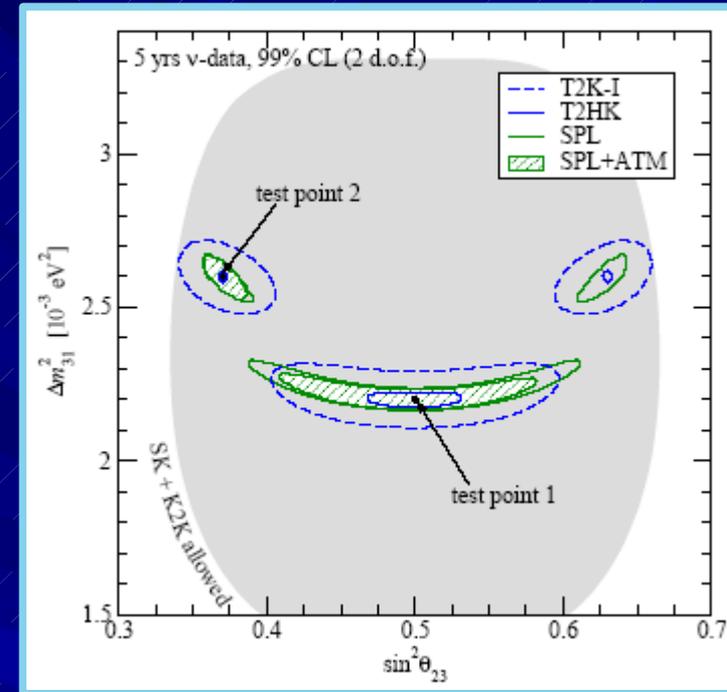
FIG. 6: Number of events expected in 0.4 Mton detector (left y-axis) or in a SK-like detector (right y-axis) as a function of the supernova distance, for various interaction channels. See the text for details.

Physique des neutrinos

■ Δm^2

- A la Minos : Disparition des ν_μ du SPL
- 5 ans (ν)

	True values	T2K-I	SPL	T2HK
Δm_{31}^2	$2.2 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$	4.7%	3.9%	1.1%
$\sin^2 \theta_{23}$	0.5	20%	22%	6%
Δm_{31}^2	$2.6 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$	4.4%	3.0%	0.7%
$\sin^2 \theta_{23}$	0.37	8.9%	4.7%	0.8%



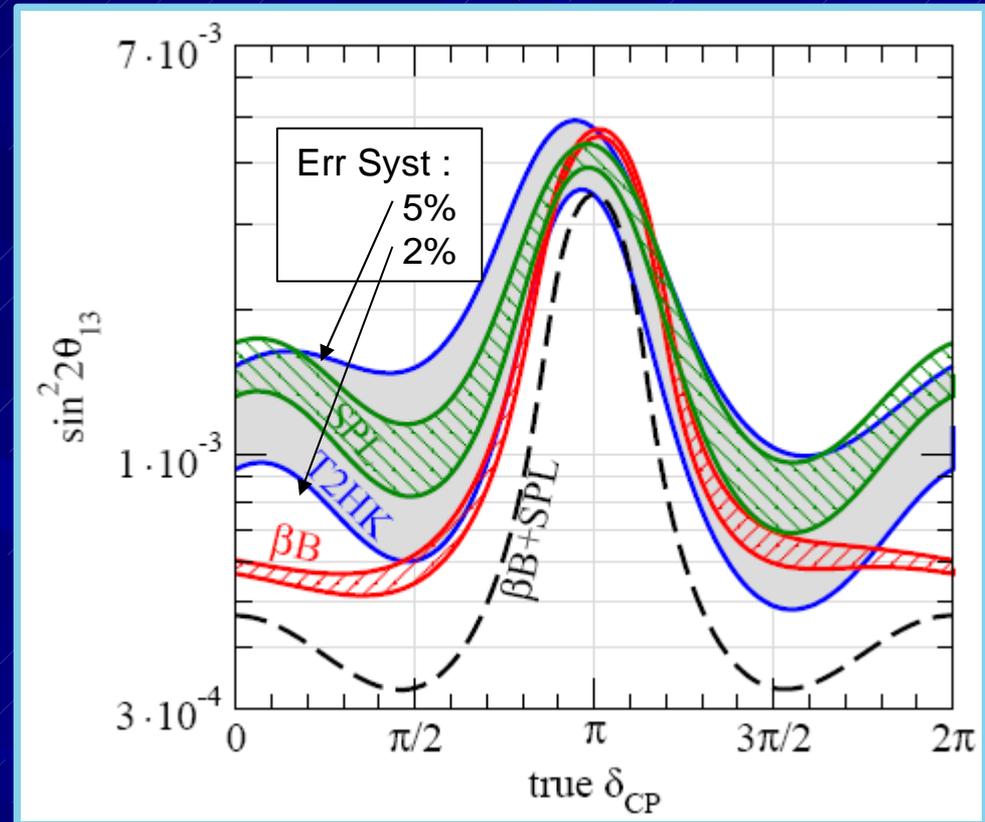
Campagne et al. hep-ph/0603172

- La combinaison avec les neutrinos atmosphériques permet de connaître le signe de Δm^2 à 2σ si $\sin^2 2\theta_{13} = 0.02 - 0.03$ (combinaison $\nu_{\text{SPL}} - \beta\text{beam}$)

Physique des neutrinos

■ θ_{13}

- 10 de prise de données
- Potentiel de découverte à 3σ
- $\sin^2 2\theta_{13} = 4 \cdot 10^{-4}$ accessible pour 45% des valeurs de δ_{CP} avec la combinaison du SPL et du β Beam



Campagne et al. hep-ph/0603172

Valeurs utilisées: $\sin^2\theta_{12}=0.3, \sin^2\theta_{23}=0.5,$

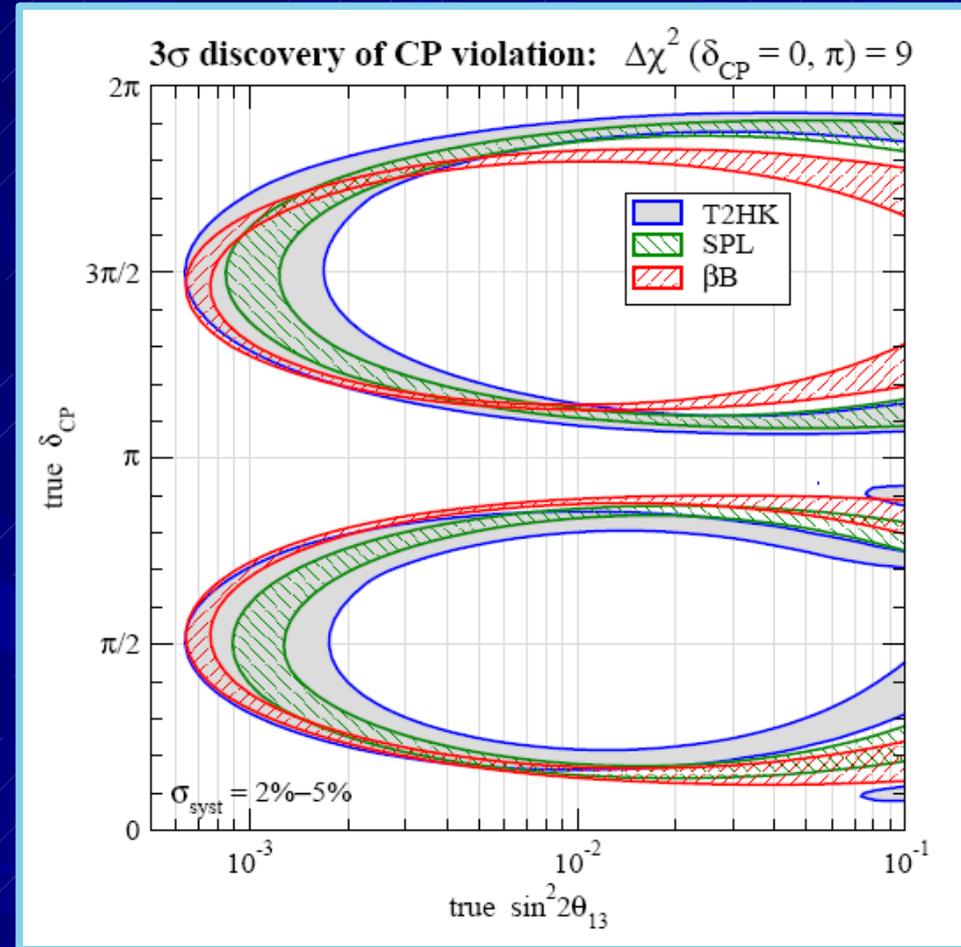
$\Delta m^2_{21}=7.9 \cdot 10^{-5}, \Delta m^2_{31}=2.2 \cdot 10^{-3}$

4% precision sur Δm^2_{21} et 10% pour les autres

Physique des neutrinos

■ δ_{CP}

- 10 de prise de données
- Potentiel de découverte à 3σ
- La violation de CP peut être observé si $\sin^2 2\theta_{13} > 10^{-2}$ dans $\sim 75\%$ des valeurs de δ_{CP}



Campagne et al. hep-ph/0603172

Valeurs utilisées: $\sin^2\theta_{12}=0.3, \sin^2\theta_{23}=0.5,$

$\Delta m^2_{21}=7.9 \cdot 10^{-5}, \Delta m^2_{31}=2.2 \cdot 10^{-3}$

4% precision sur Δm^2_{21} et 10% pour les autres

Synergie entre le *SPL* et le β beam

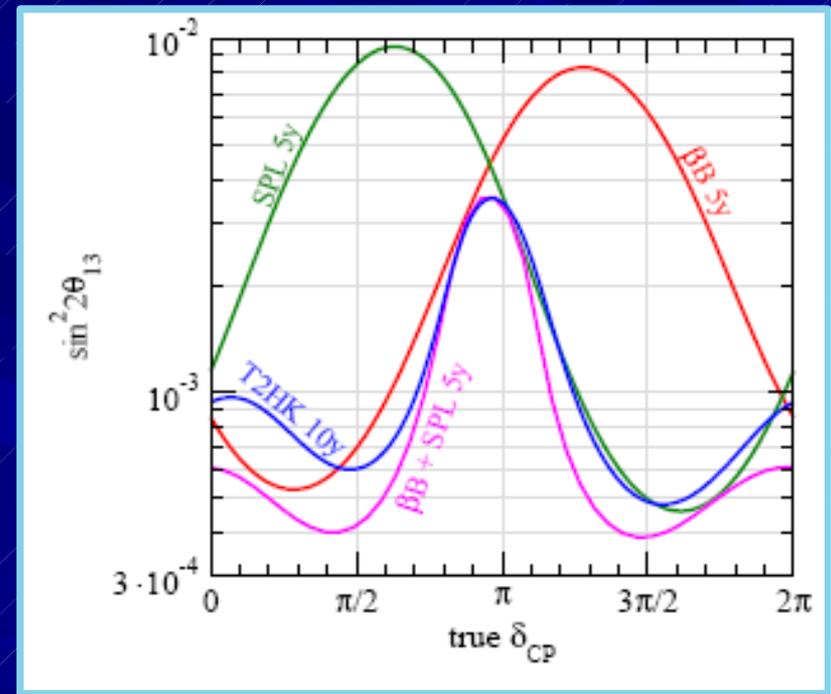
- Signal de l'un = bruit de fond de l'autre :
 - Etude des erreurs systématiques.

- Si l'on croit en CPT :

- $P_{\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e} = P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu}$
- $P_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu} = P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_e}$

- Si on utilise le *SPL* et le β beam, on n'a plus besoin de tourner en anti-neutrinos...

- On fait mieux en 5 ans qu'avec un seul faisceau en 10 ans.



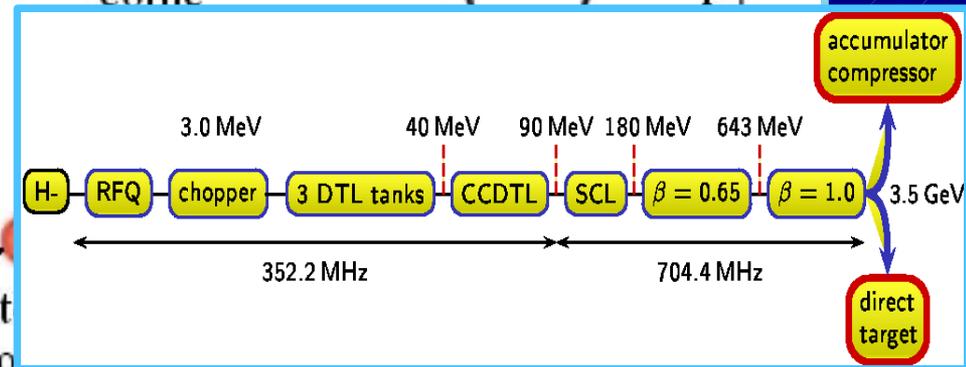
Conclusion

- Le domaine des neutrinos atmosphériques occupe le futur proche
 - MINOS est en cours de prise de données
 - OPERA démarrera à l'été 2006
- Le futur va explorer les derniers paramètres : θ_{13} et δ_{CP}
 - Un facteur 4 a été gagné en sensibilité pour le projet *SPL-Fréjus*
 - La combinaison avec un β beam permet d'atteindre la sensibilité de $\sin^2 2\theta_{13} > 4 \cdot 10^{-4}$
 - si $\sin^2 2\theta_{13} > 10^{-2}$, $\sim 75\%$ des valeurs de δ_{CP} peuvent être découvertes
 - Avec les deux faisceaux, on peut diviser le temps de prise de données par 2.

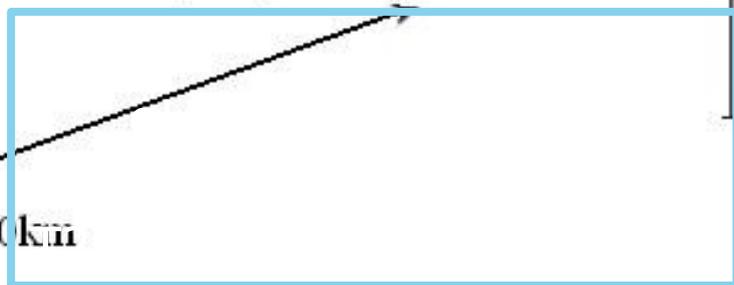
Le super faisceau de neutrinos

H⁻ linac, 2 GeV, 4 MW

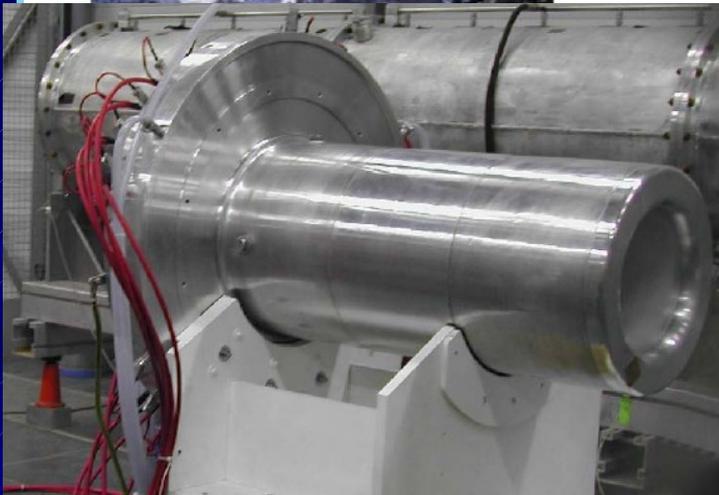
anneau d'accumulation



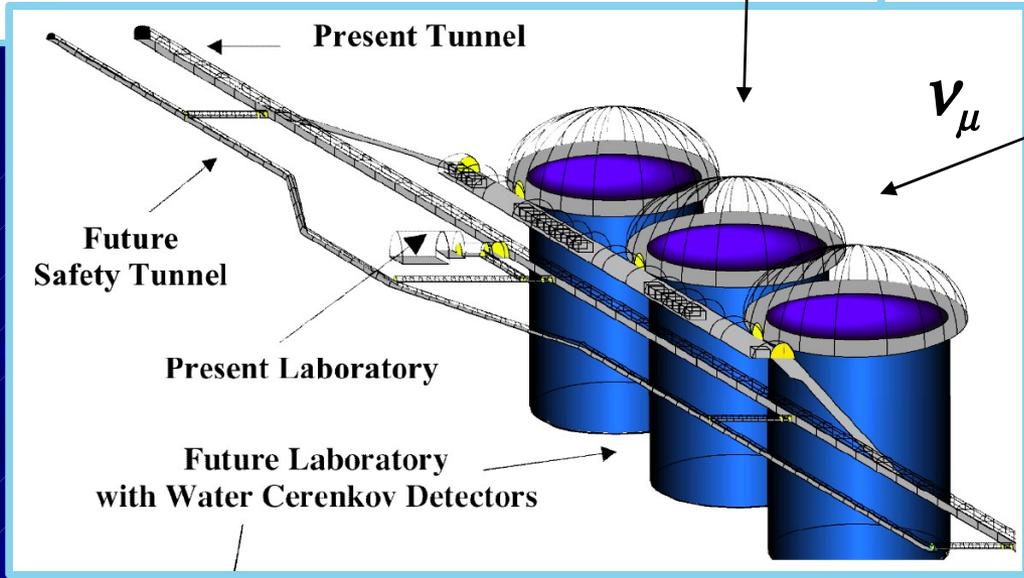
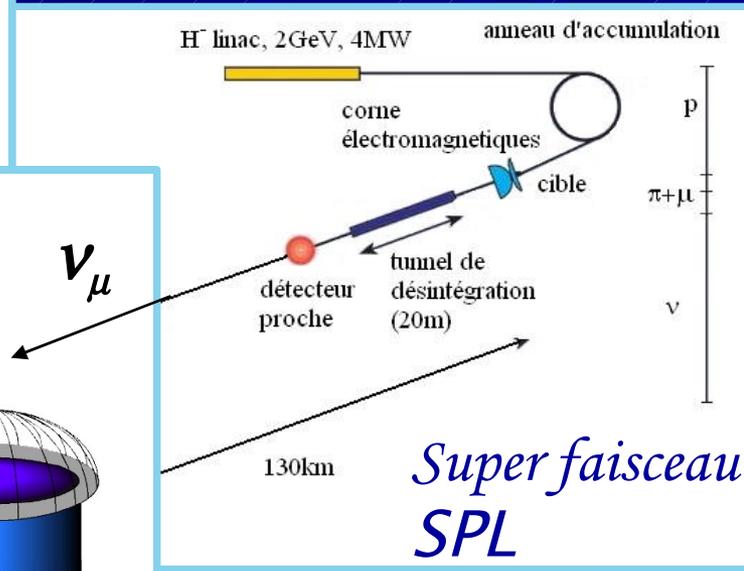
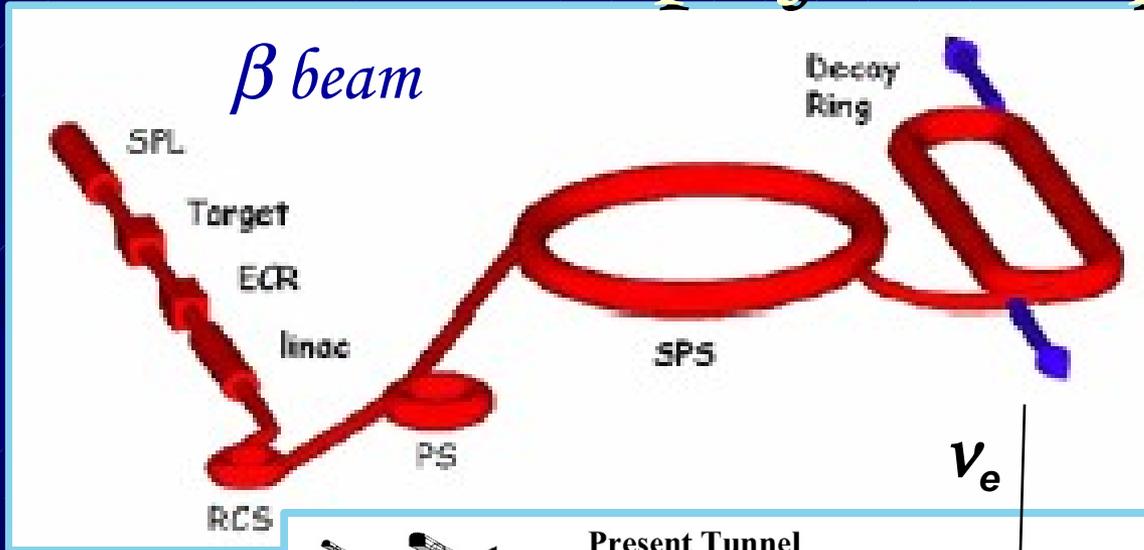
dét
pro



130 km



Le projet Européen.



Le super faisceau de neutrinos

