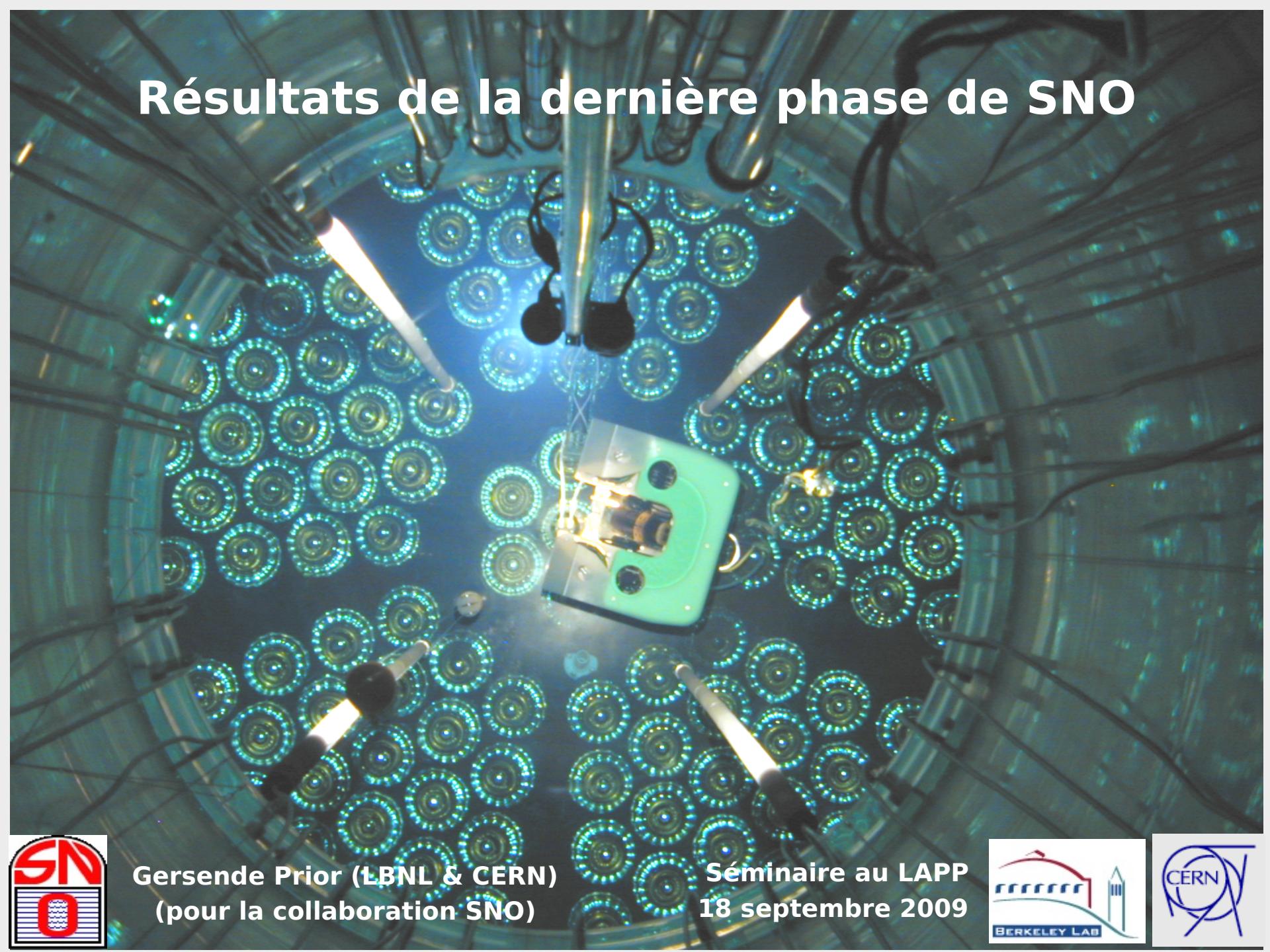


Résultats de la dernière phase de SNO



Gersende Prior (LBNL & CERN)
(pour la collaboration SNO)

Séminaire au LAPP
18 septembre 2009



Plan

- Une courte histoire du neutrino
- Les neutrinos solaires et les expériences pionnières
- Le problème des neutrinos solaires
- Masse et oscillation de neutrinos
- L' Observatoire de Neutrinos de Sudbury
- Résultats de la dernière phase
- Futur

Une courte histoire du neutrino

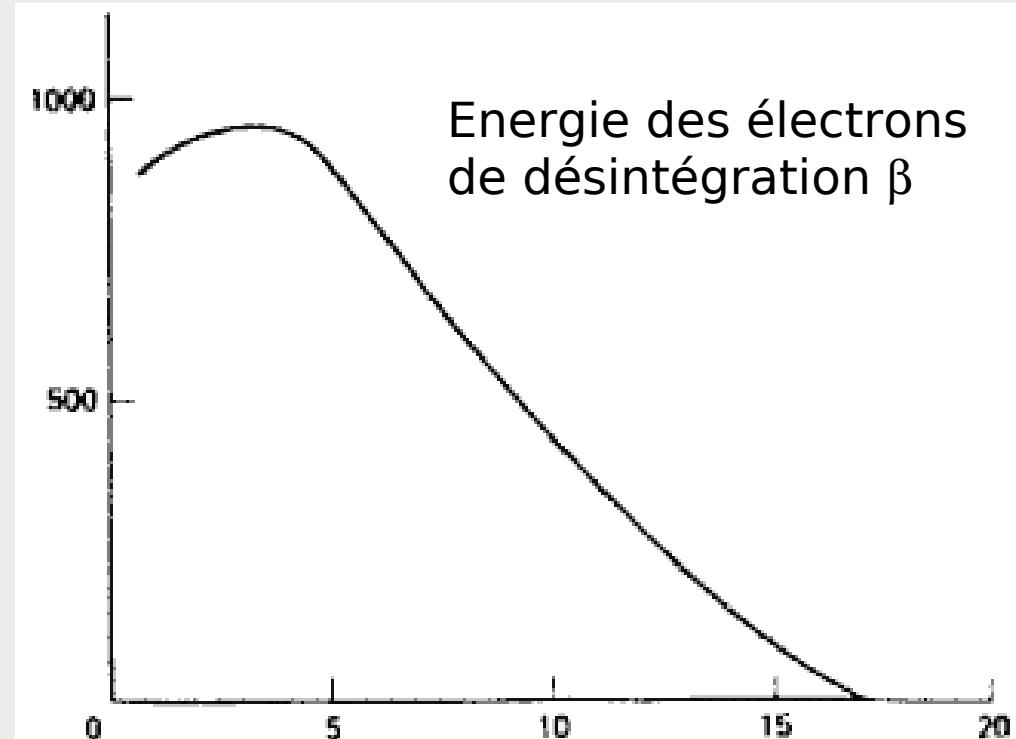
Années 1930 : on pensait que la désintégration bêta (β) était le processus $X \rightarrow Y + e^-$

Désintégration à deux corps : l' énergie de l' électron doit être discrète.



W. Pauli: “possibility that there could exist in the nuclei electrically neutral particles that I wish to call neutrons...”

N. Bohr: “I should say that we have no argument, either empirical or theoretical for upholding the energy principle in case of beta-ray disintegration.”



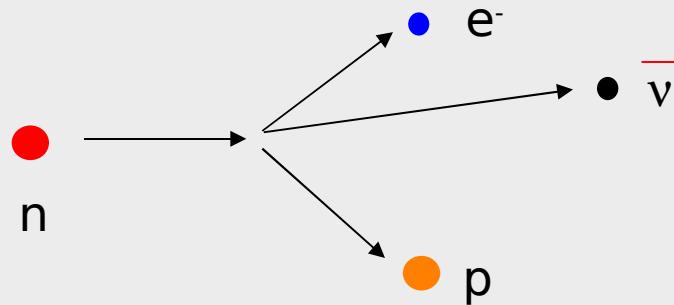
Une courte histoire du neutrino (suite)

En 1932 Chadwick découvre le neutron :

Problème: trop lourd pour satisfaire l'explication de Pauli sur la conservation de l'énergie dans les désintégrations β .

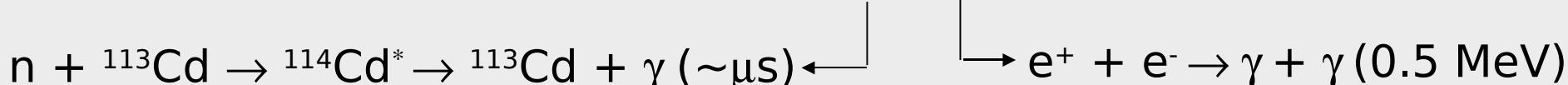
En 1934 Fermi publie sa théorie des désintégrations β :

Assume l'existence de la particule neutre et légère de Pauli et l'appelle "neutrino".



En 1956 détection directe de l'(anti)-neutrino :

Expérience de Reines & Cowan au réacteur nucléaire de Savannah River (Caroline du Sud) :

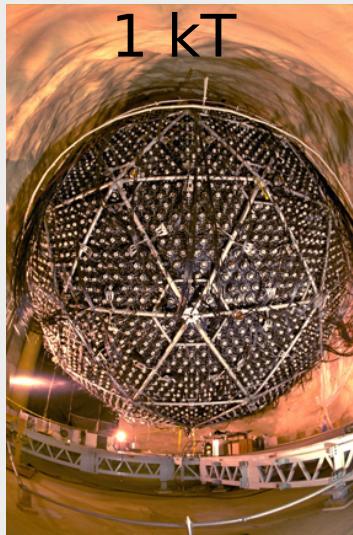


Neutrinos et détection

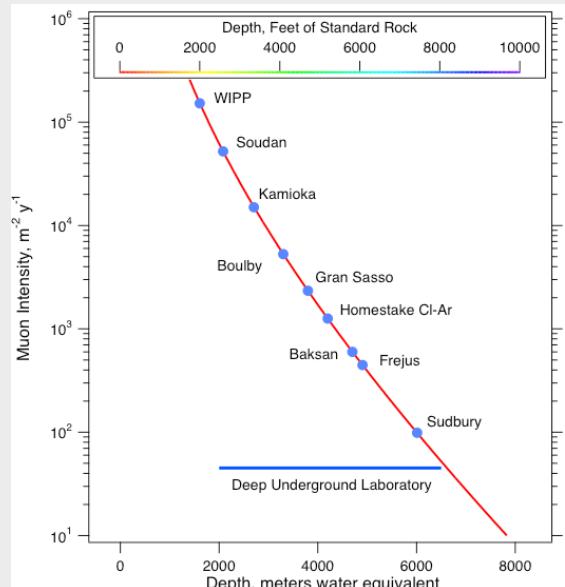
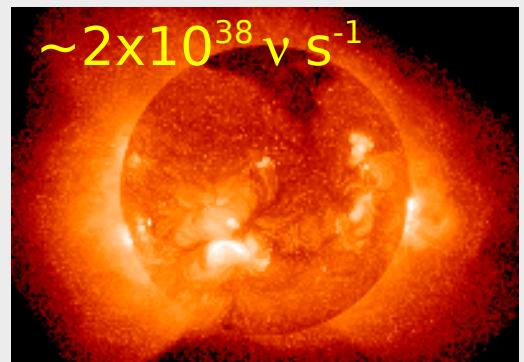
Modèle Standard

u up	c charm	t top
d down	s strange	b bottom
ν_e	ν_μ	ν_τ
e	μ	τ

Trois saveurs.
Ni charge ni masse.
Subit que les interactions faibles.



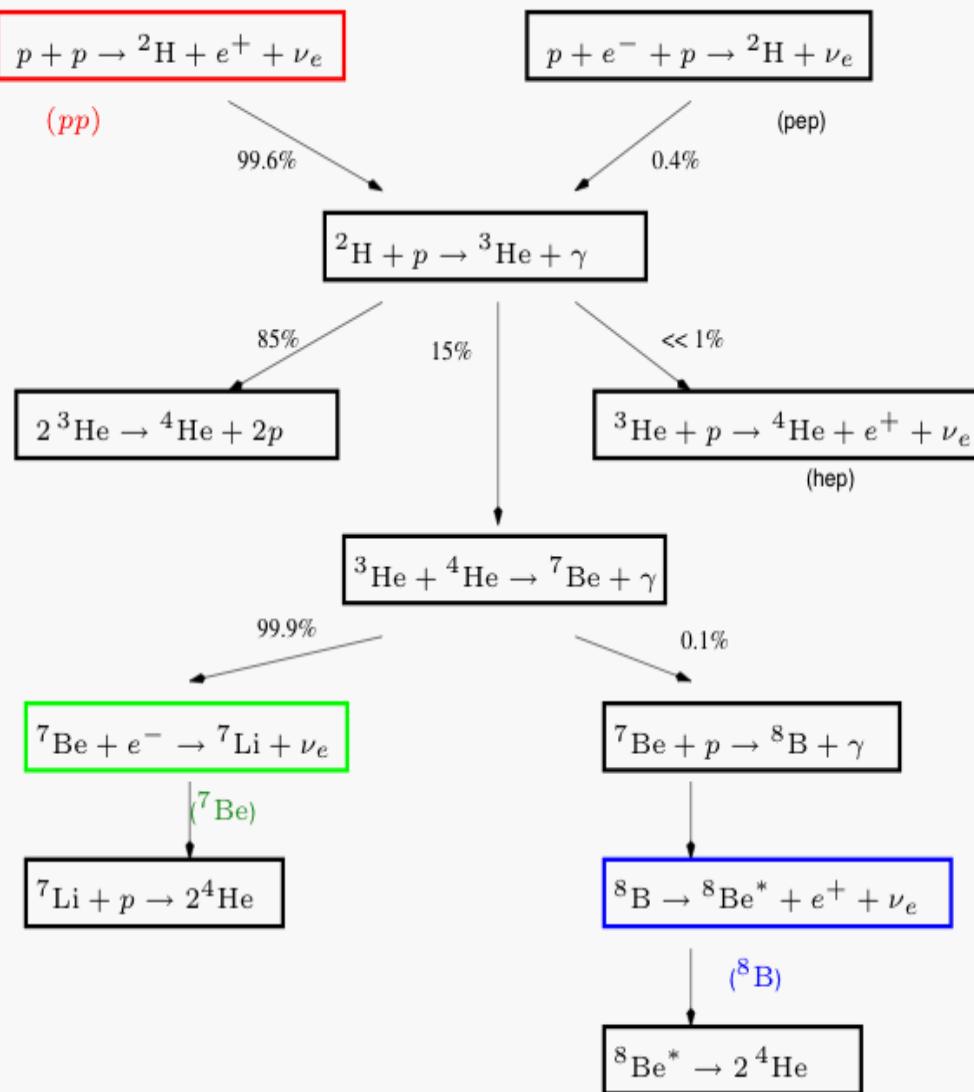
Grand détecteurs et sources puissantes.



S'enterrer pour observer le soleil.

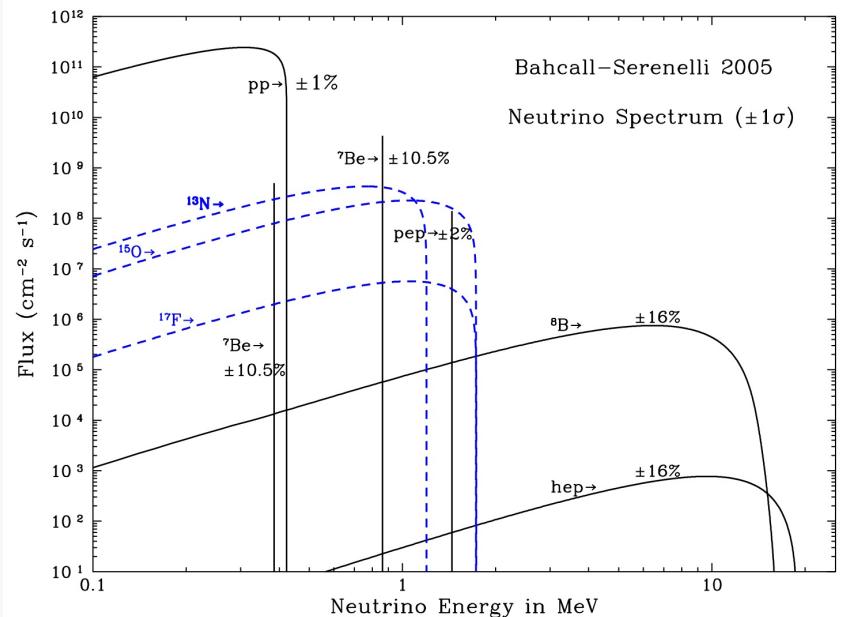
Les neutrinos solaires

La chaîne de réactions pp :



Modèle Solaire Standard :

Les calculs précis du modèle solaire nous permettent de prédire le flux de neutrinos sur la terre.

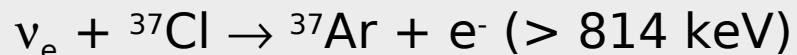


Expériences pionnières

L'expérience radio-chimique de “chlore” :

Première tentative par Ray Davis dans la mine de Barbeton (Ohio, 701 m) : a pu seulement établir une limite à cause du bruit de fond des rayons cosmiques.

Deuxième tentative à Homestake (Dakota du Sud, 1478 m) utilisant la réaction :



L'argon produit par les interactions de neutrinos est extrait en purgeant le cylindre avec de l'hélium et en récupérant He et Ar. Avec 35 jours de “demie-vie” l'argon peut être ensuite compté.

Cette expérience a pris des données pendant 30 ans. Le taux de neutrinos solaires observé fut **2.56 SNU** en comparaison avec le taux prédit de **7.7 SNU**.

1 SNU (Solar Neutrino Unit) = 10^{-36} s^{-1} par atome cible.



Expériences pionnières (suite)

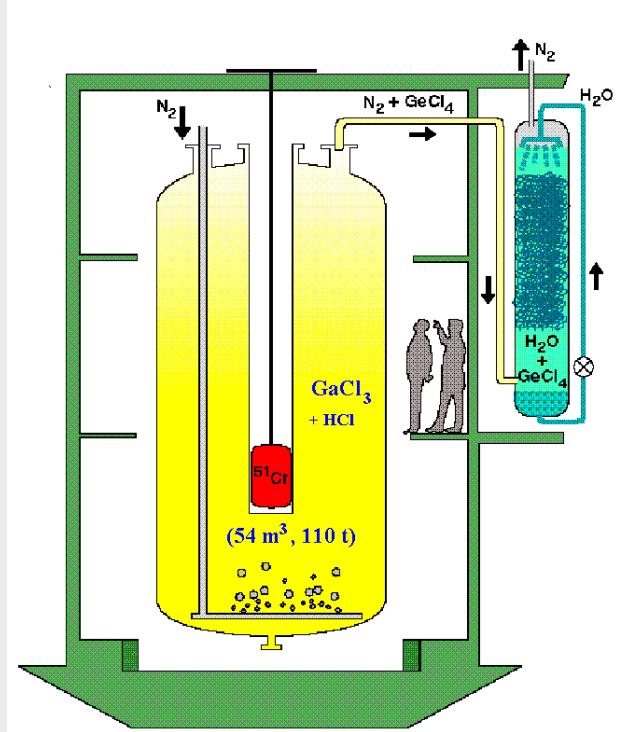
Les expériences radio-chimique de “gallium” :

Une autre réaction utilisée pour étudier les neutrinos solaires :



L' expérience SAGE située à l' Observatoire des Neutrinos de Baksan (Russie) a utilisé du gallium métallique et observé un taux de neutrino de **67.2 SNU** alors que le taux prédit pour le Gallium est de **129 SNU**.

Les expériences GALLEX et GNO situées au laboratoire de Gran-Sasso (Italie) ont utilisé une solution de chloride de gallium et observé un taux de **74.1 SNU**.



Le détecteur GALLEX

Expériences pionnières (fin)

Kamiokande et Super-Kamiokande (Japon) :

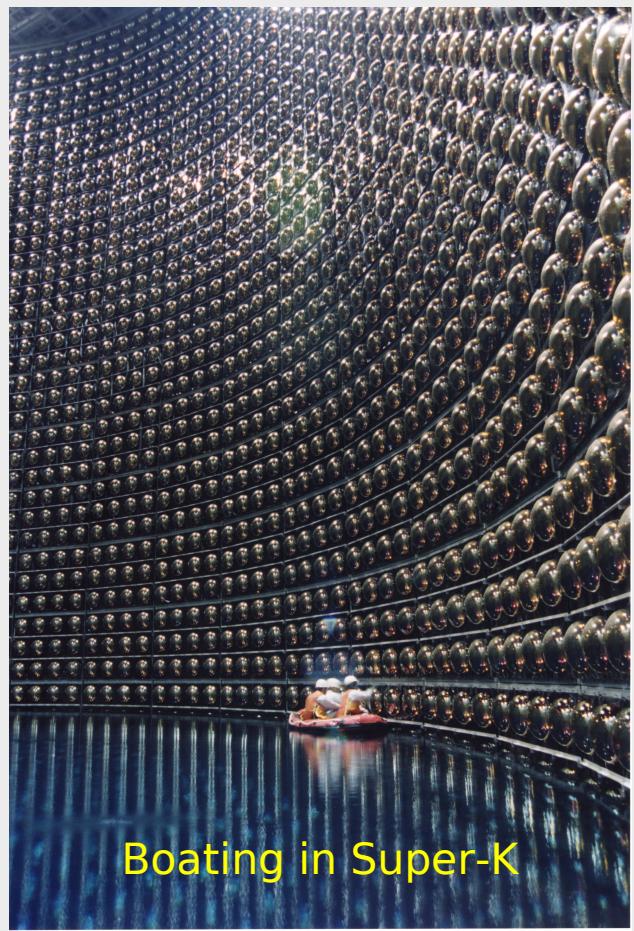
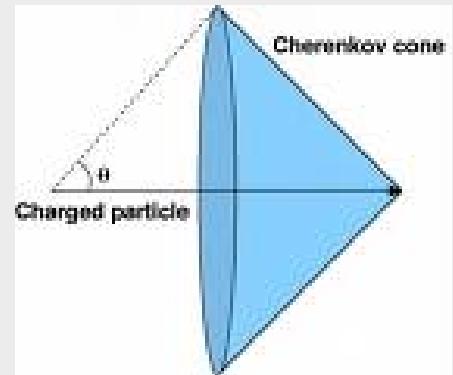
Les deux ont utilisé l'eau comme cible pour les interactions de neutrinos:



Les électrons diffusés sont détectés par la lumière Tcherenkov qu'ils produisent.

L'expérience Kamiokande a mesuré un flux de neutrinos qui est **49%** du signal attendu.

Super-Kamiokande a mesuré un flux de neutrinos égal à **46%** du signal attendu.



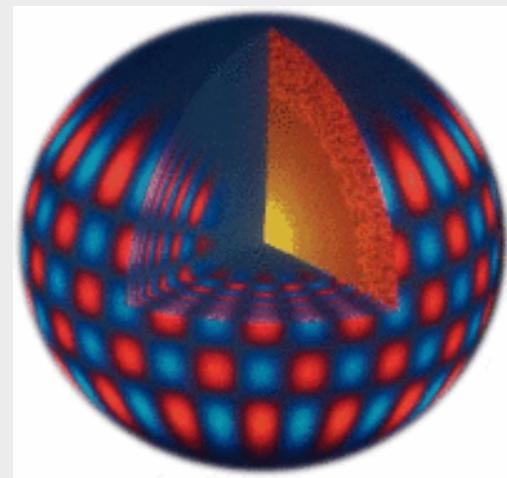
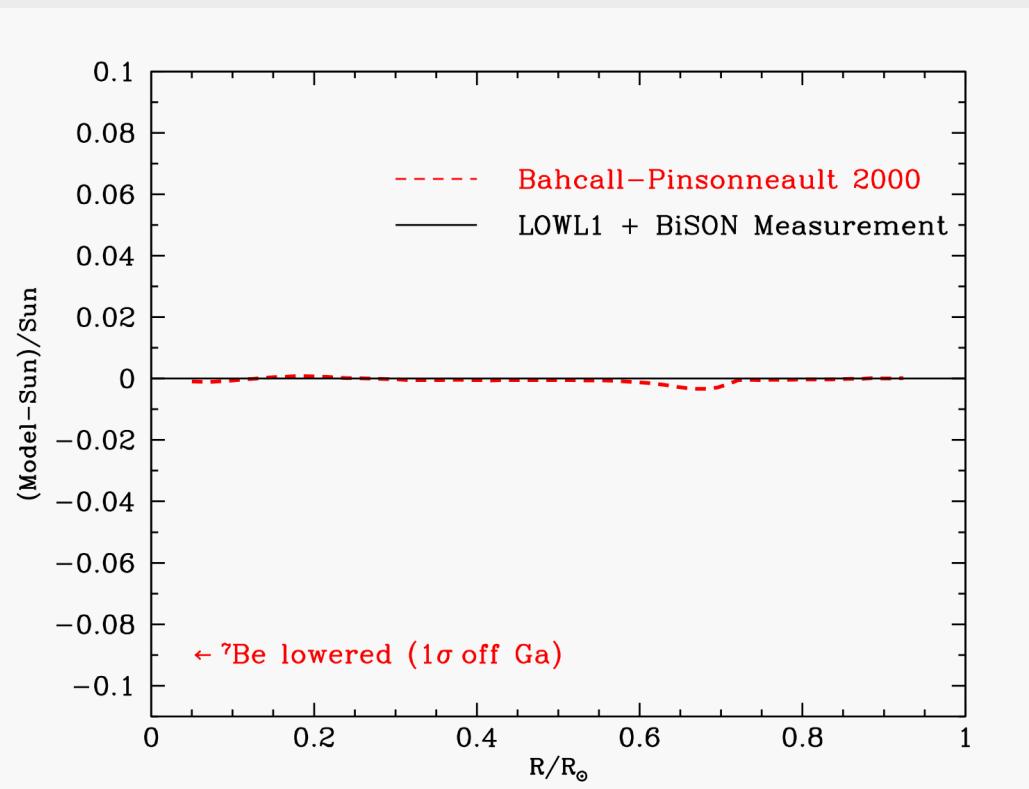
Boating in Super-K

Le problème des neutrinos solaires

Déficit flagrant de neutrinos :

- le modèle solaire est faux
- nous ne comprenons pas la physique des neutrinos

Mesures hélio-seismiques sont en accord avec le modèle solaire :



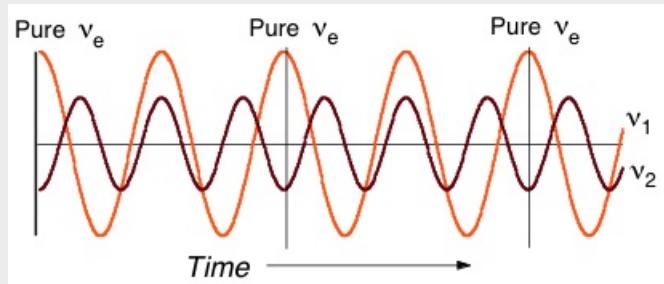
Et si les neutrinos pouvaient changer de saveur ?

Masses et oscillations de neutrinos

Les Etats de saveur sont un mélange des états de masse :



Transport des neutrinos :



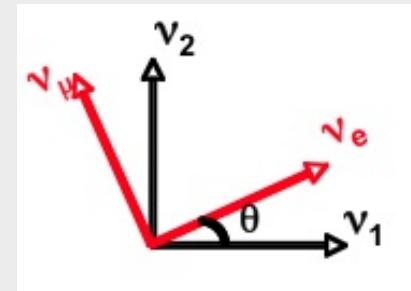
Probabilité d'oscillation :

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e) = 1 - \sin^2(2\theta_{12}) \cdot \sin^2(1.27 \Delta m_{12}^2 L/E)$$

Changement de base :

$$\nu_e = \cos(\theta_{12}) \cdot \nu_1 + \sin(\theta_{12}) \cdot \nu_2$$

$$\nu_\mu = -\sin(\theta_{12}) \cdot \nu_1 + \cos(\theta_{12}) \cdot \nu_2$$



$$\Delta m_{12}^2 = m_1^2 - m_2^2$$

L' observatoire de neutrinos de Sudbury

Profondeur équivalente à
6000 mètres d'eau

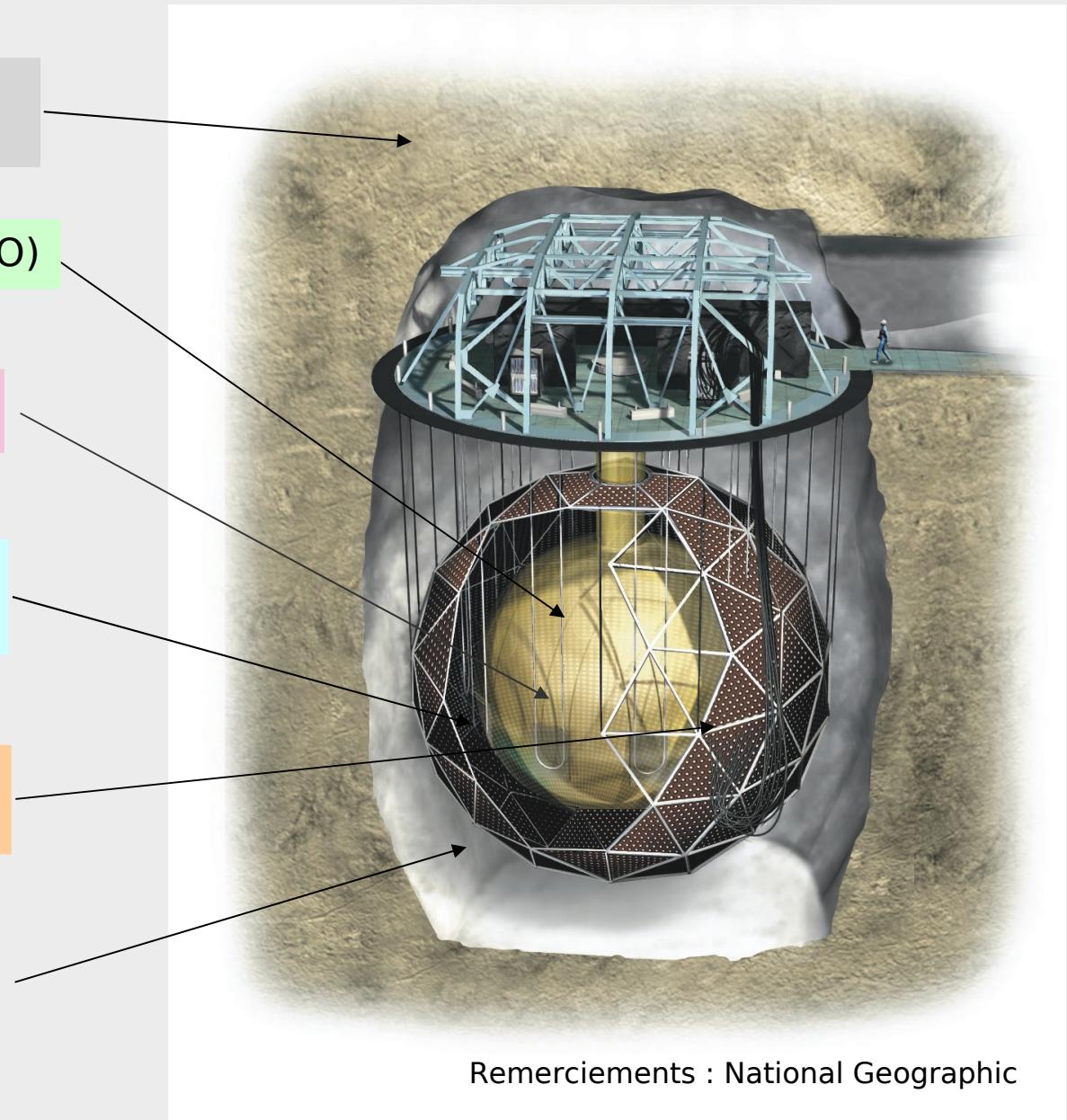
1000 tonnes d'eau lourde (D_2O)

Sphère de 12 m de diamètre

1700 tonnes de protection
interne (H_2O)

Structure de support, 9500
PMTs, 60% de couverture

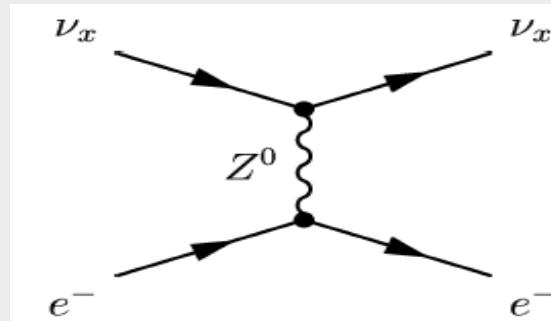
5300 tonnes de
protection externe (H_2O)



Remerciements : National Geographic

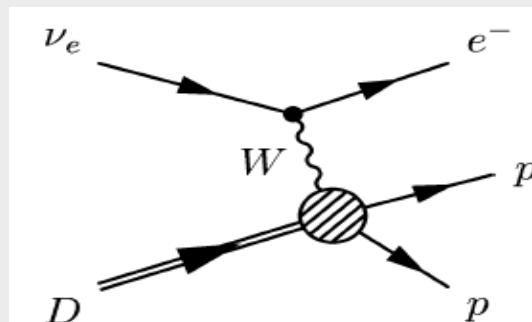
Les interactions dans SNO

Elastic Scattering (ES):



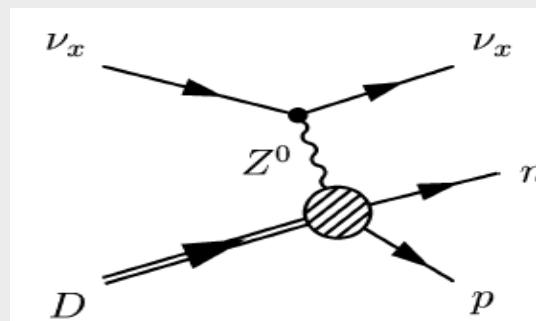
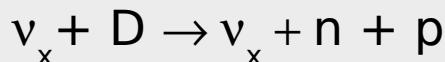
Majorité de ν_e
Sensibilité
directionnelle

Charged-currents (CC):



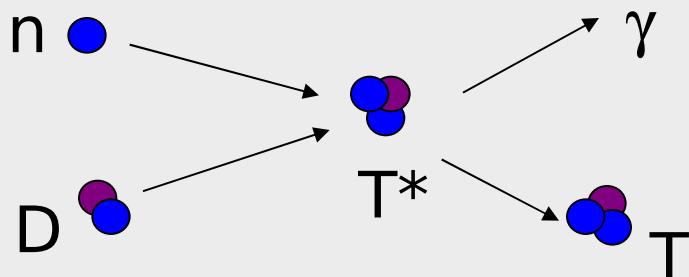
Seulement ν_e
Energies
corrélées

Neutral-currents (NC):



Toutes les
saveurs
Flux total

Techniques de capture du neutron

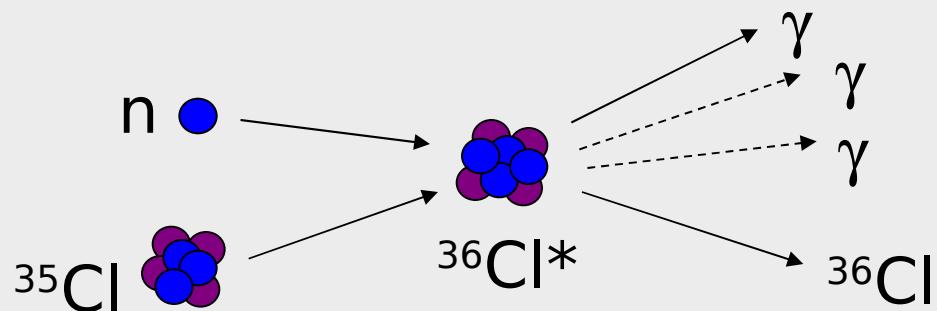


Phase “D₂O” :

$$\sigma = 0.0005 \text{ b}$$

$$\varepsilon = 14\%$$

Seuil d'énergie près du bruit de fond

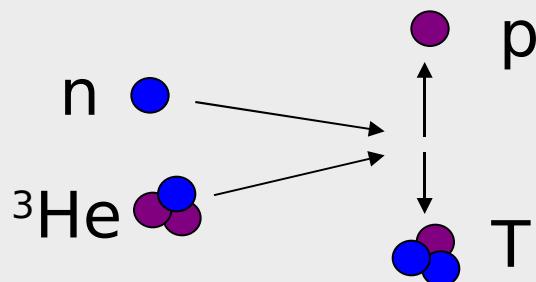


Phase “sel” (2 t. NaCl) :

$$\sigma = 44 \text{ b}$$

$$\varepsilon = 41\%$$

Seuil d'énergie plus haut



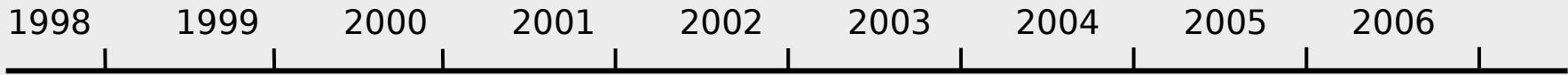
Phase “NCD” :

$$\sigma = 5330 \text{ b}$$

$$\varepsilon = 21\%$$

Nouveaux détecteurs

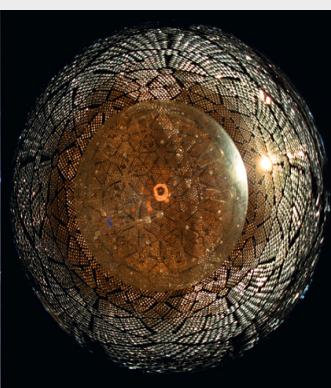
Calendrier de SNO



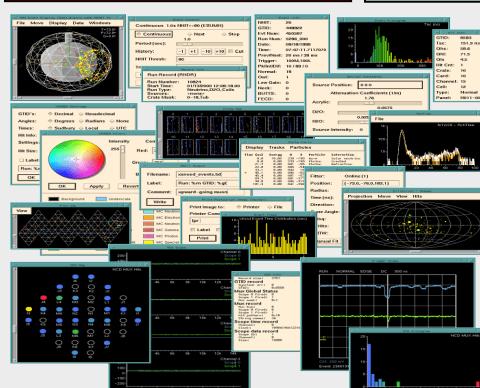
Construction/
Preparation



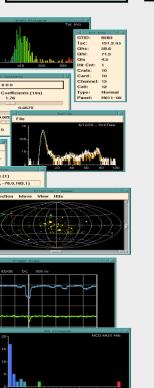
Phase D₂O



Phase Salt



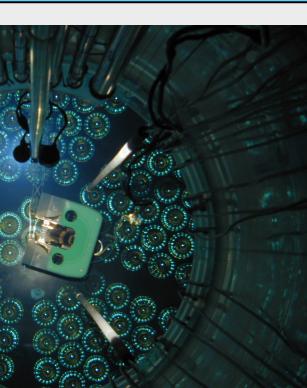
D₂O



Prep.
NCD



Phase NCD



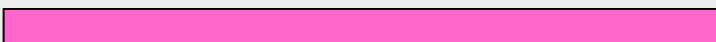
Retour
D₂O



Super-Kamiokande



CI



GNO



SAGE



Borexino



KamLAND



KamLAND Solaire



Résultats de la phase “sel”

Flux et rapports ($10^{-6} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) :

$$\Phi_{\text{CC}} = 1.68 \pm 0.06 \text{ (stat.)} {}^{+0.08}_{-0.09} \text{ (syst.)}$$

$$\Phi_{\text{NC}} = 4.94 \pm 0.21 \text{ (stat.)} {}^{+0.38}_{-0.34} \text{ (syst.)}$$

$$\Phi_{\text{ES}} = 2.35 \pm 0.22 \text{ (stat.)} \pm 0.15 \text{ (syst.)}$$

$$\frac{\phi_{\text{CC}}}{\phi_{\text{NC}}} = 0.34 \pm 0.023 \text{ (stat.)} {}^{+0.029}_{-0.031} \text{ (syst.)}$$

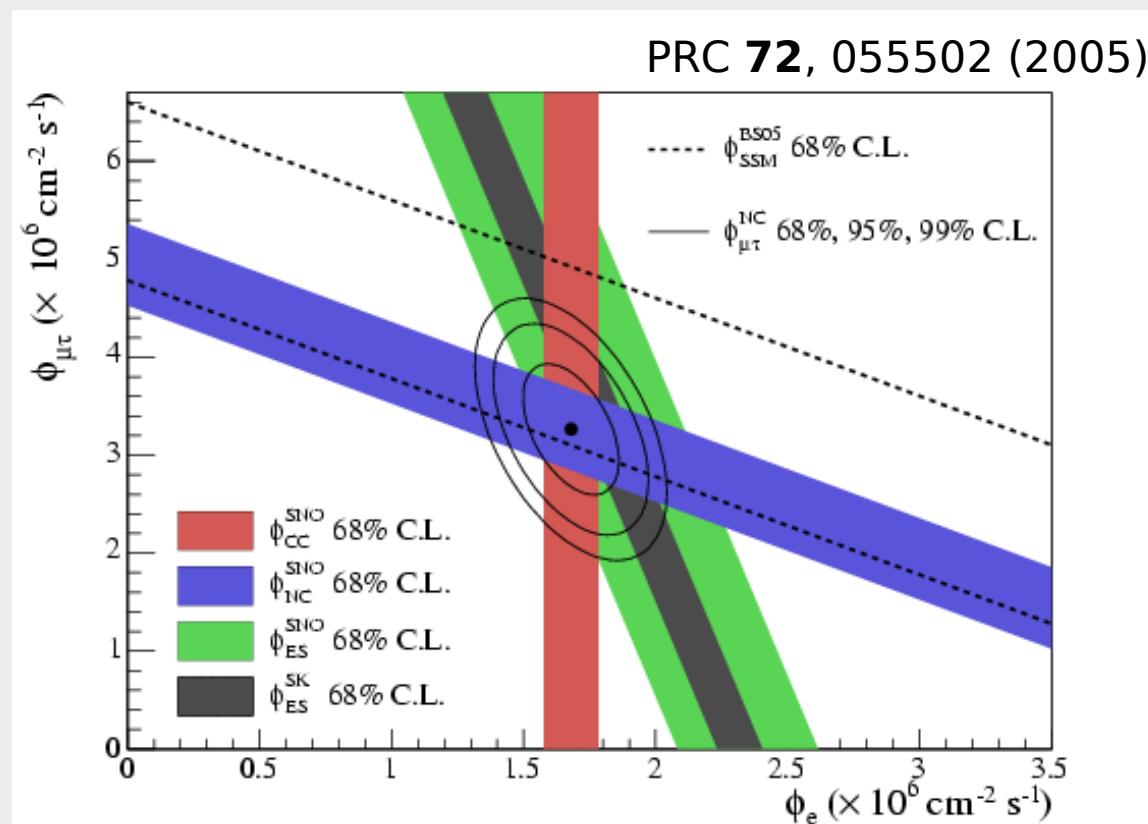
$$(\Phi_{\text{CC}}/\Phi_{\text{NC}} \sim \sin^2 \theta_{12})$$

Masse :

$$\Delta m^2 = 0.8 {}^{+0.6}_{-0.4} \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$$

Angle de mélange:

$$\theta_{12} = 33.9 {}^{+2.4}_{-2.2} \text{ degrés}$$



Neutral Current Detectors

Pourquoi ?

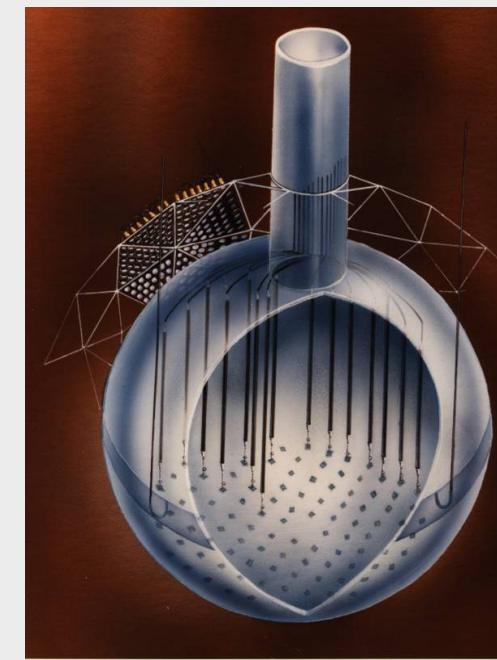
- Systématiques différentes des autres phases
- meilleure mesure du flux CC
- corrélations CC/NC grandement réduites

Défis :

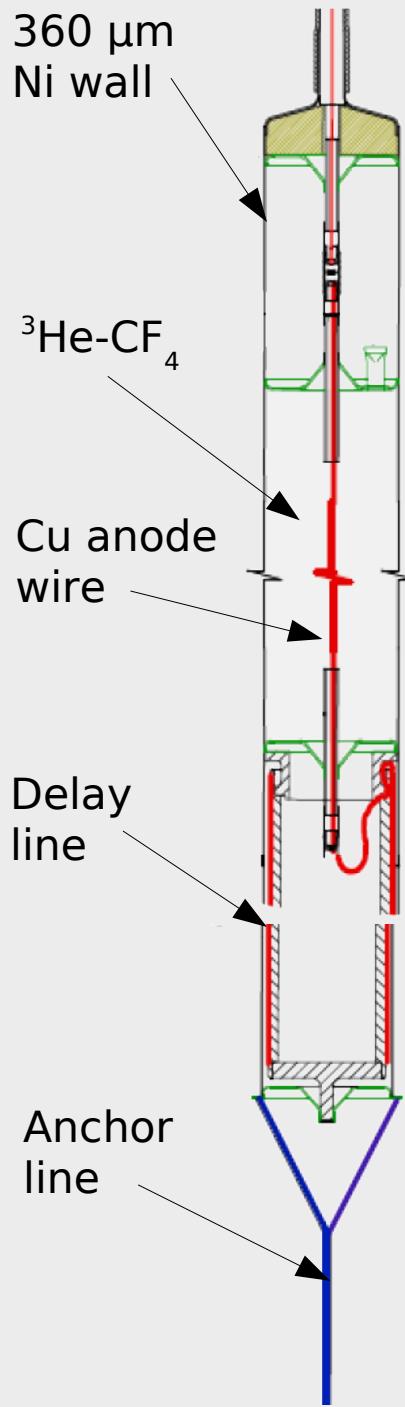
- Taux de signal très bas : ~ 1000 neutrons/an détectés
- Matériel ultra-pur nécessaire
- Perte de lumière ($\sim 10\%$) due aux détecteurs



36 compteurs ${}^3\text{He}$
et 4 compteurs
 ${}^4\text{He}$ sur une grille
de 1x1m.
Longueur totale
398 m.



Compteurs proportionnels



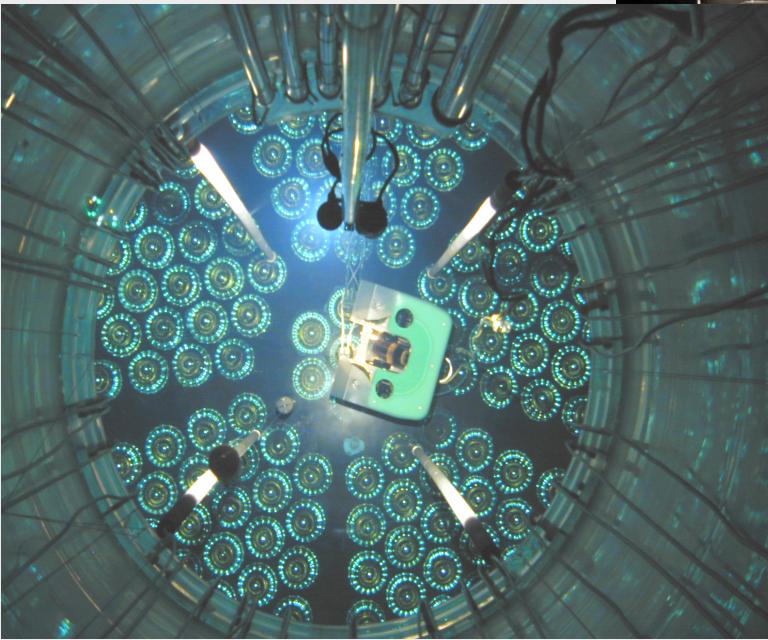
Nickel "CVD" ultra-pur :

$$3.43 {}^{+1.49}_{-2.11} \times 10^{-12} \text{ gTh/gNi}$$

$$1.81 {}^{+0.80}_{-1.12} \times 10^{-12} \text{ gU/gNi}$$

(100 fois plus pur que les compteurs précédents !)

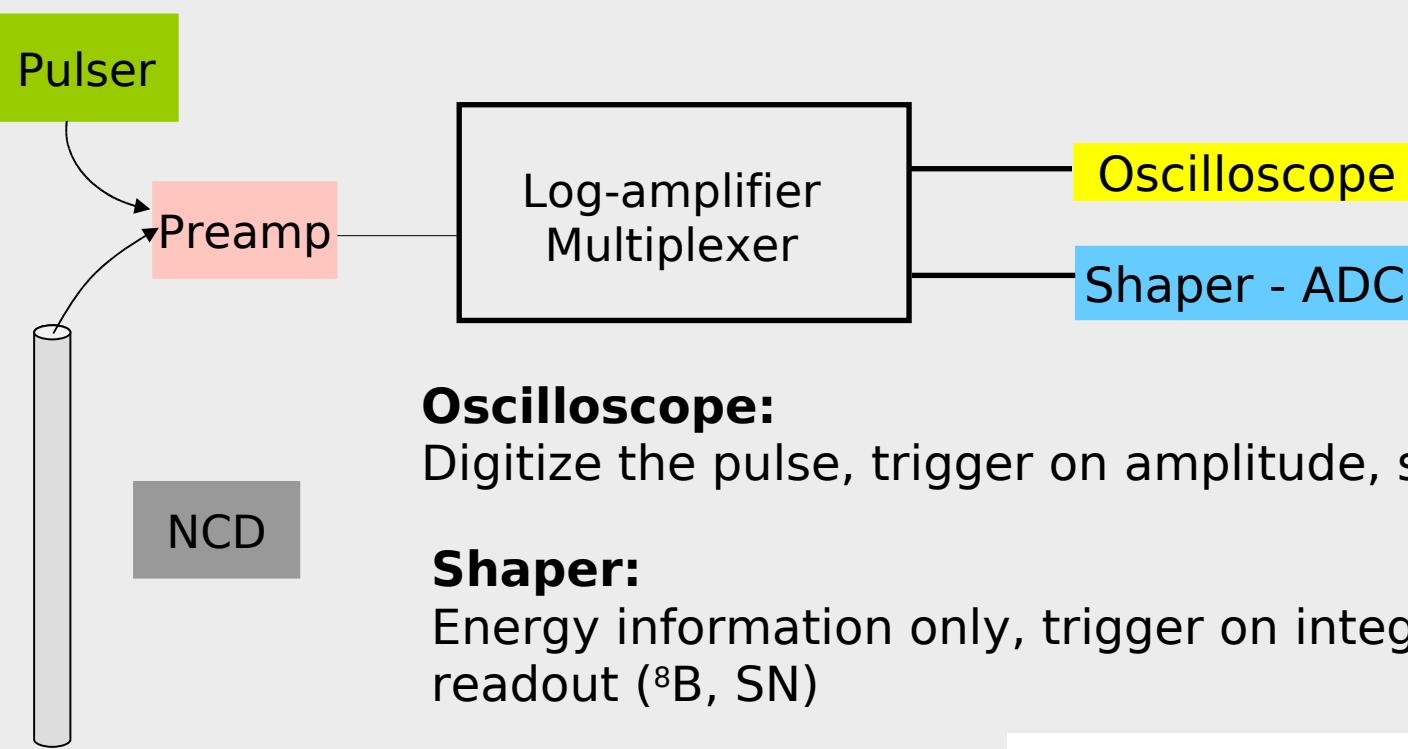
"ROV" en opération



Soudure laser des compteurs



Electronique des NCD et signal

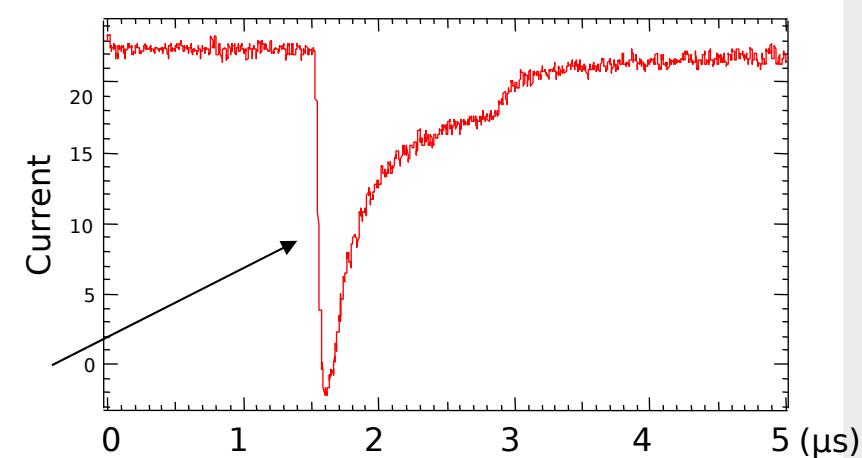
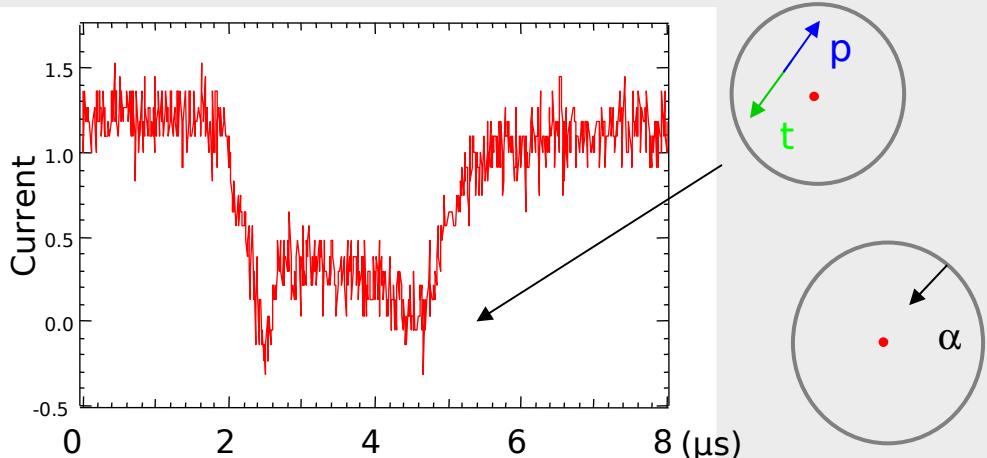


Oscilloscope:

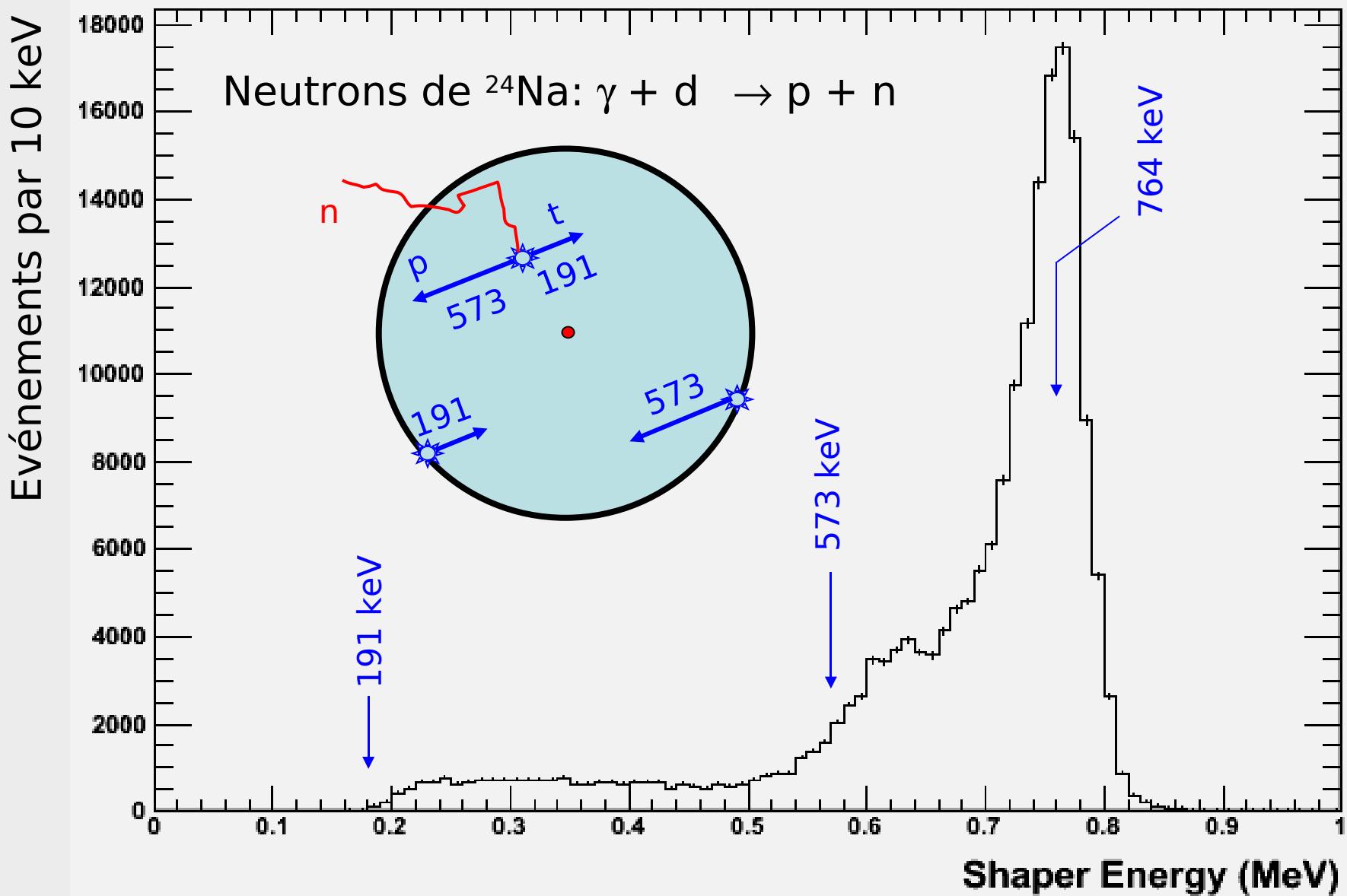
Digitize the pulse, trigger on amplitude, slow readout (${}^8\text{B}$)

Shaper:

Energy information only, trigger on integral charge, fast readout (${}^8\text{B}$, SN)

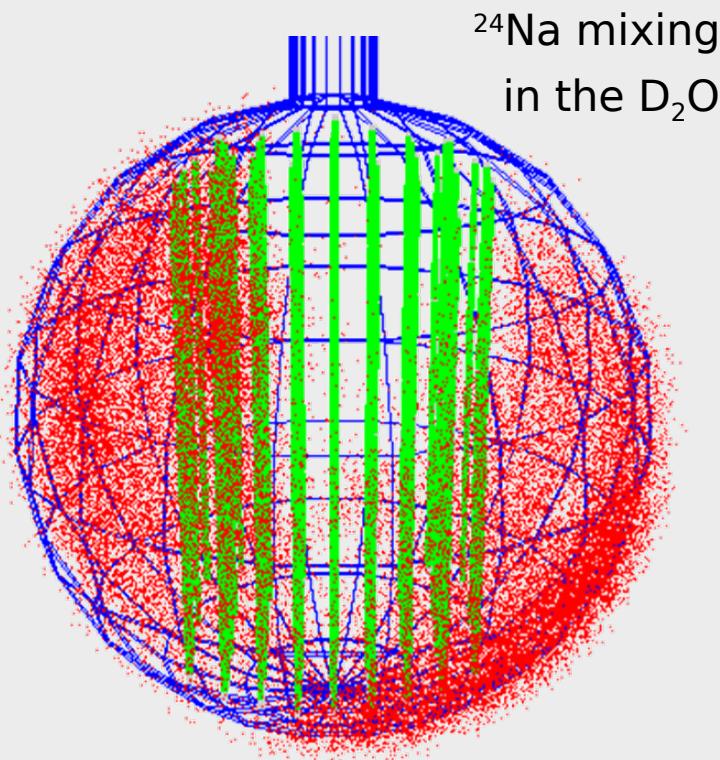


Spectre d'énergie de ${}^3\text{He}(\text{n},\text{p})\text{t}$



Efficacité de capture des neutrons

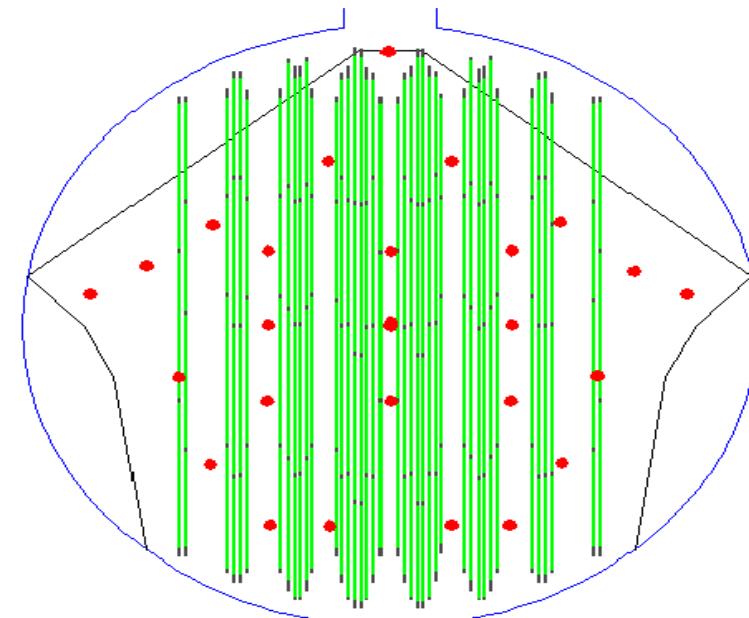
1- Méthode ^{24}Na : imite le signal avec ^{24}Na mélangé qui génère les neutrons par $\gamma + \text{d} \rightarrow \text{n} + \text{p}$.



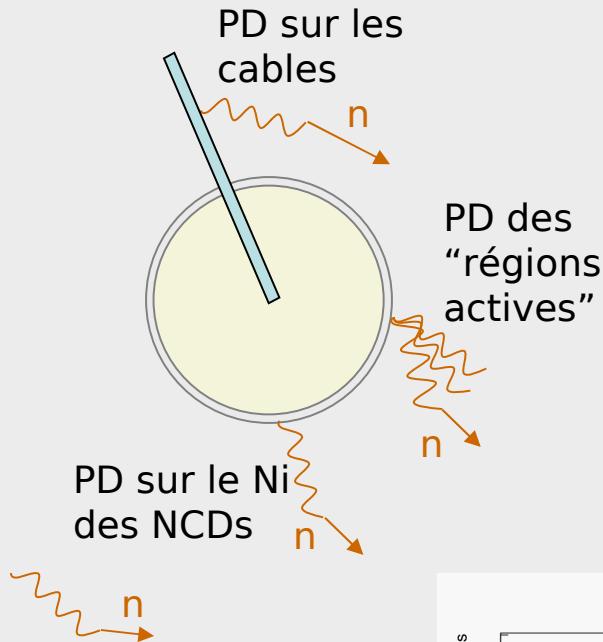
$$\varepsilon_n = 0.211 \pm 0.007$$

2- Méthode Monte Carlo : calibre le Monte Carlo avec sources ponctuelles AmBe et ^{252}Cf .

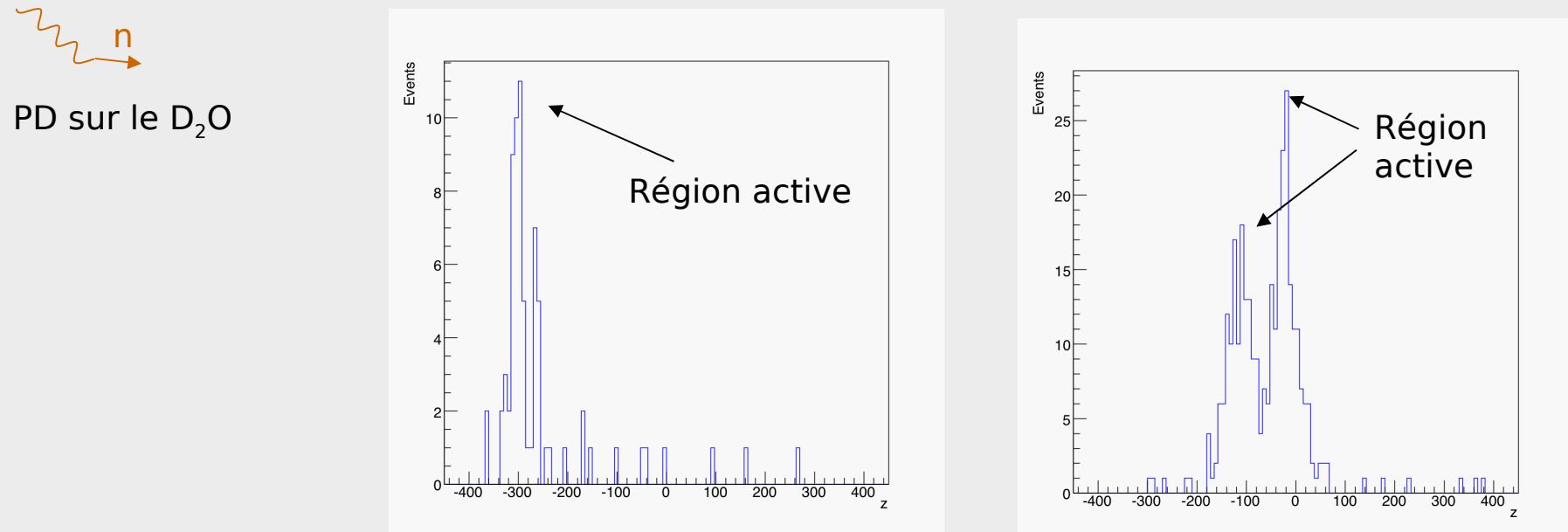
- Source run locations



Bruit de fond de neutrons

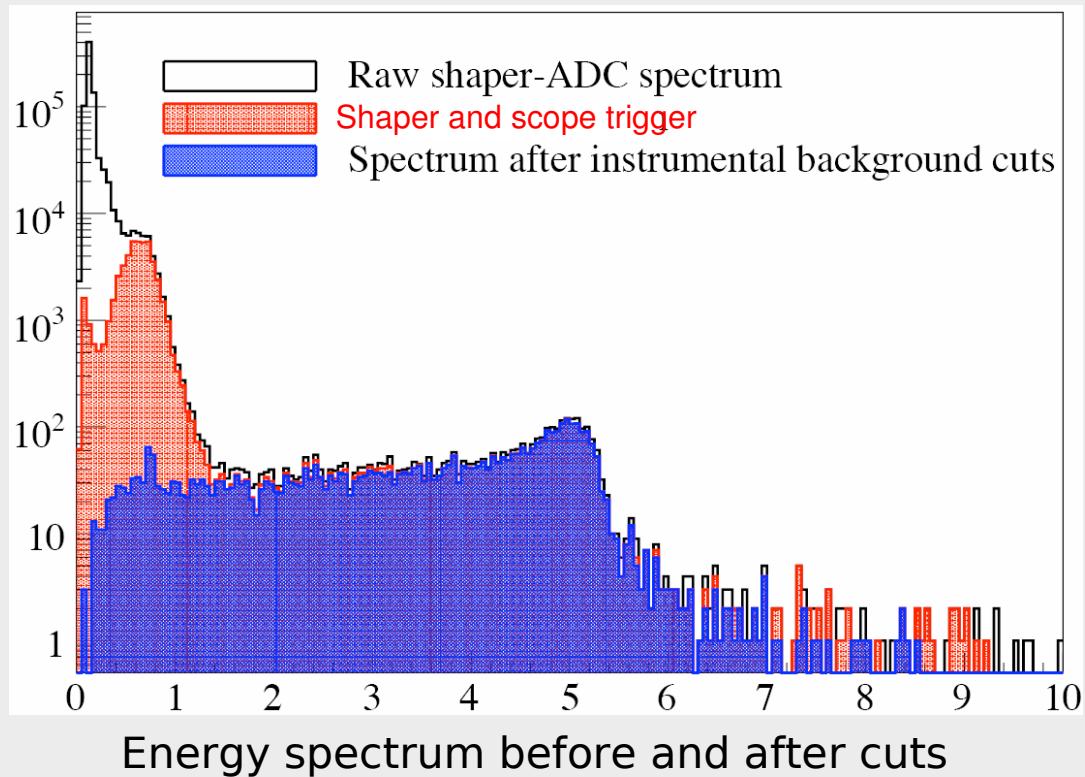
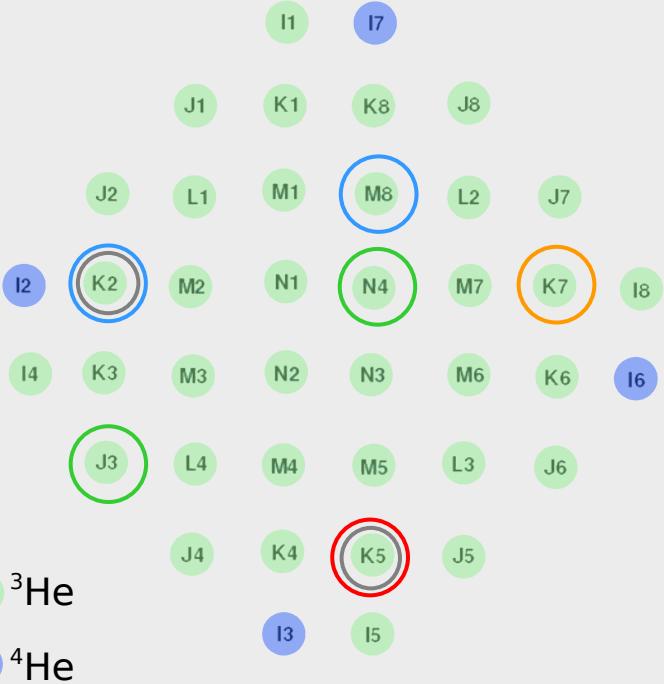


Source	PMT Events	NCD Events
D_2O photodisintegration	7.6 ± 1.2	28.7 ± 4.7
NCD bulk/ ^{17}O , ^{18}O	$4.6^{+2.1}_{-1.6}$	$27.6^{+12.9}_{-10.3}$
Atmospheric ν / ^{16}N	24.7 ± 4.6	13.6 ± 2.7
Other backgrounds †	0.7 ± 0.1	2.3 ± 0.3
NCD "hotspots"	17.7 ± 1.8	64.4 ± 6.4
NCD cables	1.1 ± 1.0	8.0 ± 5.2
Total internal neutron background	$56.4^{+5.6}_{-5.4}$	$144.6^{+13.8}_{-14.8}$
External-source neutrons	20.6 ± 10.4	40.9 ± 20.6

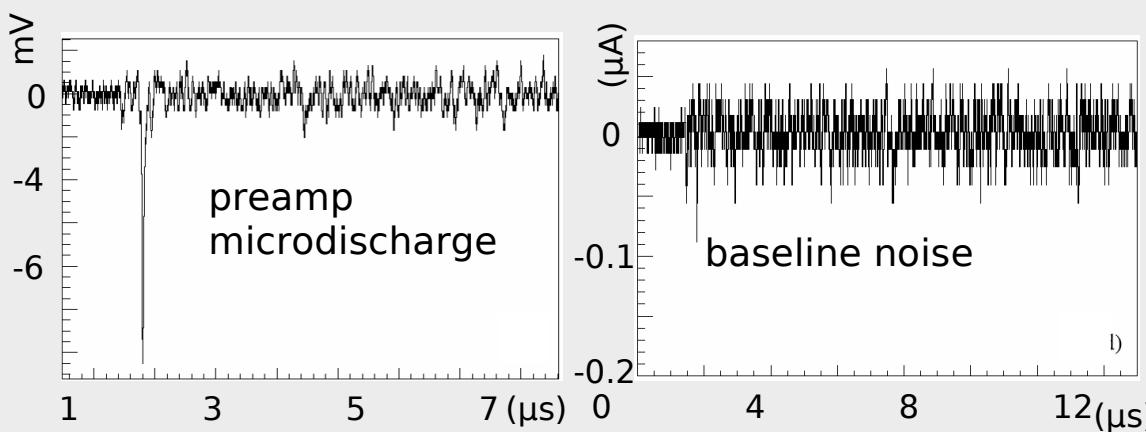


Bruit de fond instrumental

- Régions actives
- Fuite de gaz entre deux compteurs
- Mauvaise connexion électrique
- Micro-décharge
- Gain instable

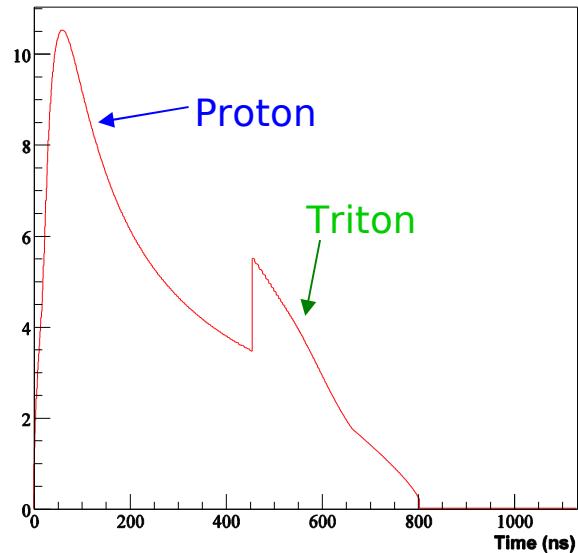


Energy spectrum before and after cuts

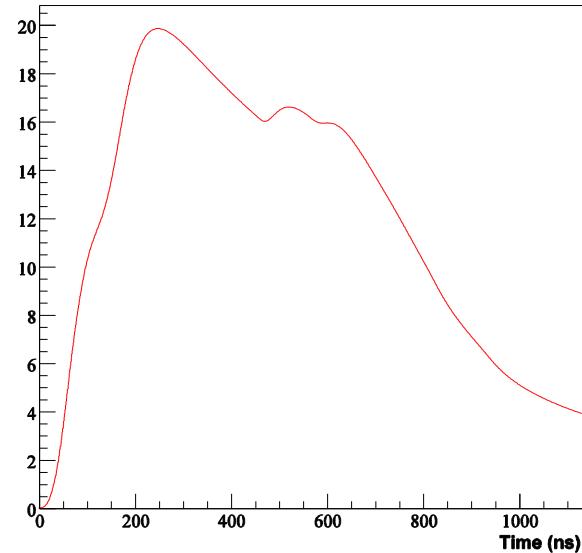


Simulation de pulse des NCD

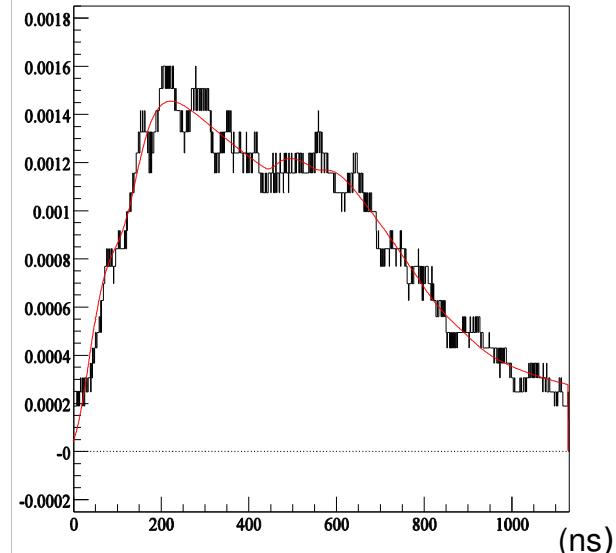
Energy deposition, electron drift



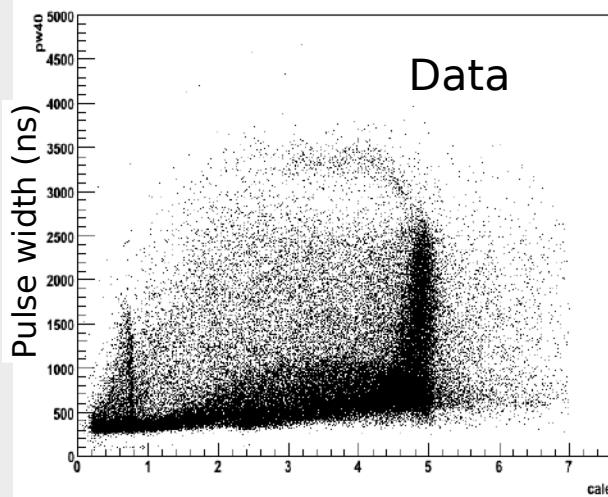
Charge multiplication, ion drift,
pulse propagation, electronics



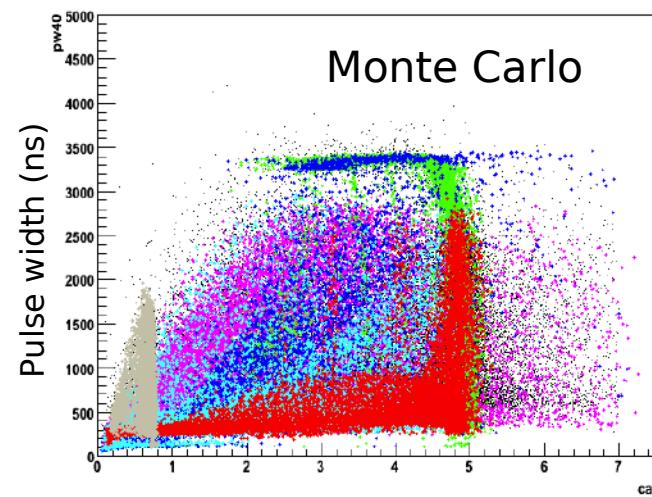
Noise



pw40:cale {cale<7.}



pw40:cale {cale<7.}



alphas background:

- wall Po alphas
- wire Po alphas
- wire U/Th alphas
- endcap Po alphas
- wall U/Th alphas

Schéma de “blindness” et signal

Premier mois de prise de données “open”

- 1- Soustraire une fraction inconnue de candidats neutrinos
- 2- Ajouter une quantité inconnue de neutrons “muon followers”

Log-likelihood fit $L = L_{PMT} + L_{NCD}$:

$$L_{PMT} = - \sum_{d=1}^{N_d} \log \left(\sum_{s=1}^{N_s} n_s f_s(\bar{x}_d) \right) + \sum_{s=1}^{N_s} n_s - \frac{1}{2} \sum_{p=1}^{N_p} \left(\frac{\lambda_p - \bar{\lambda}_p}{\sigma_p} \right)^2$$

$$L_{NCD} = - \sum_{d=1}^{N'_d} \log \left(\sum_{s=1}^{N'_s} n'_s f'_s(\bar{x}_d) \right) + \sum_{s=1}^{N'_s} n'_s - \frac{1}{2} \sum_{p=1}^{N'_p} \left(\frac{\lambda'_p - \bar{\lambda}'_p}{\sigma'_p} \right)^2$$

Signal:

$$f(T, \cos\theta_{\text{sun}}, \rho)$$
$$f(E_{\text{ADC}})$$

Bruit de fond:

$$f(T) \times f(\cos\theta_{\text{sun}}) \times f(\rho)$$
$$f(E_{\text{ADC}})$$

Ouverture de la boite le 2 mai 2008 :

- ~10% différence dans les incertitudes du flux NC entre les 3 codes d'extraction du signal : après correction de résolution de l'énergie servant comme contrainte sur les systématiques, les erreurs sont en accord, pas d'effet sur les valeurs centrales du fit.
- Problème paramétrisation d'un algorithme (pour un code d'extraction) utilisé dans le fit de la valeur du pic de la distribution de chaque bin ES : méthode plus robuste de fit implementée, flux ES en accord.

Markov Chain Monte Carlo

The physics parameters (“fluxes”) are fitted allowing nuisance parameters (calibration constants, etc.) to vary weighted by their external uncertainties. The likelihood is maximized via randomized search steps.

Algorithm:

Initial step i

parameter guesses p_i
calculate likelihood L_i

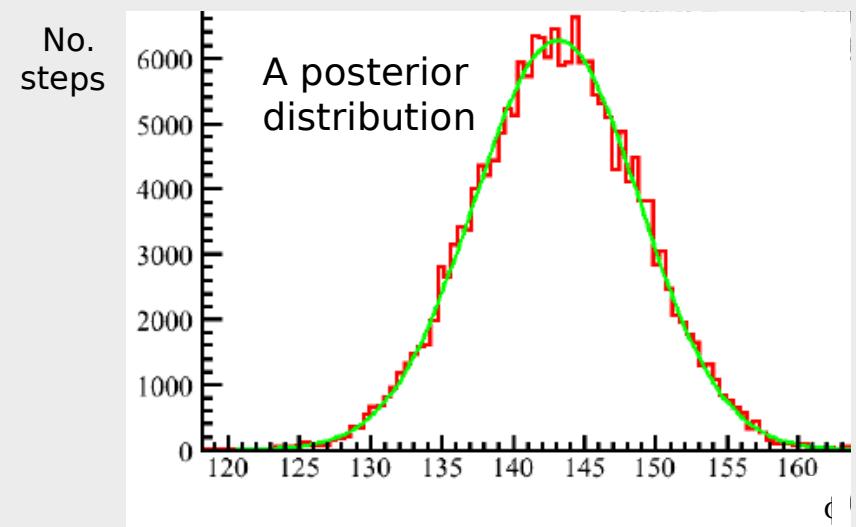
Add random amounts to all parameters

$p_{i+1} = p_i + \text{Norm}(0, \sigma_i)$
calculate likelihood L_{i+1}

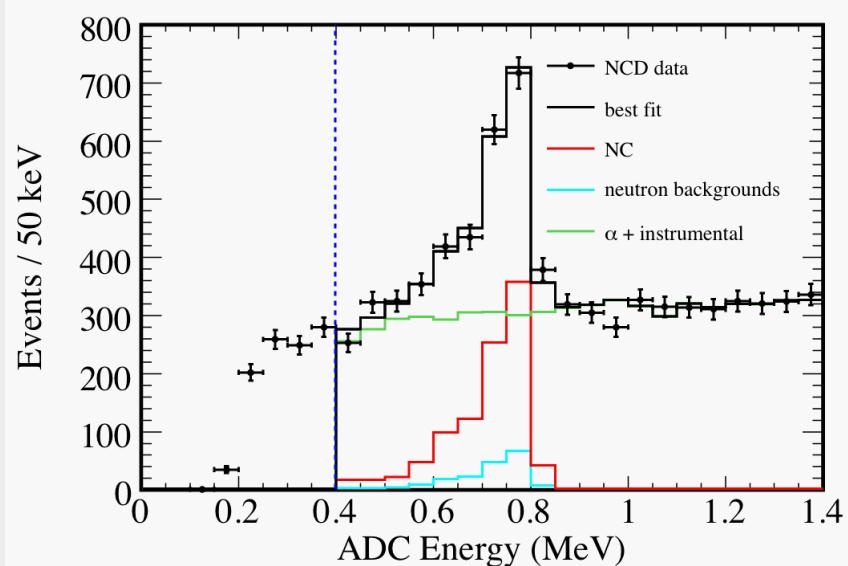
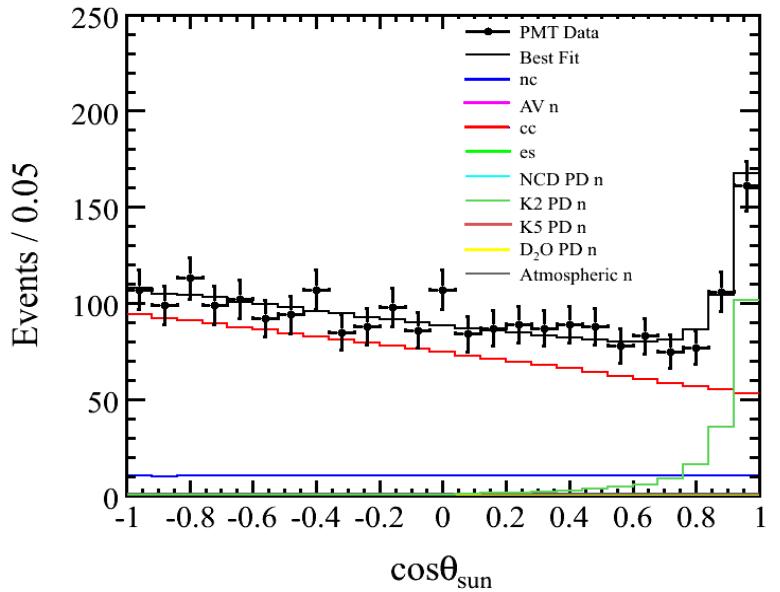
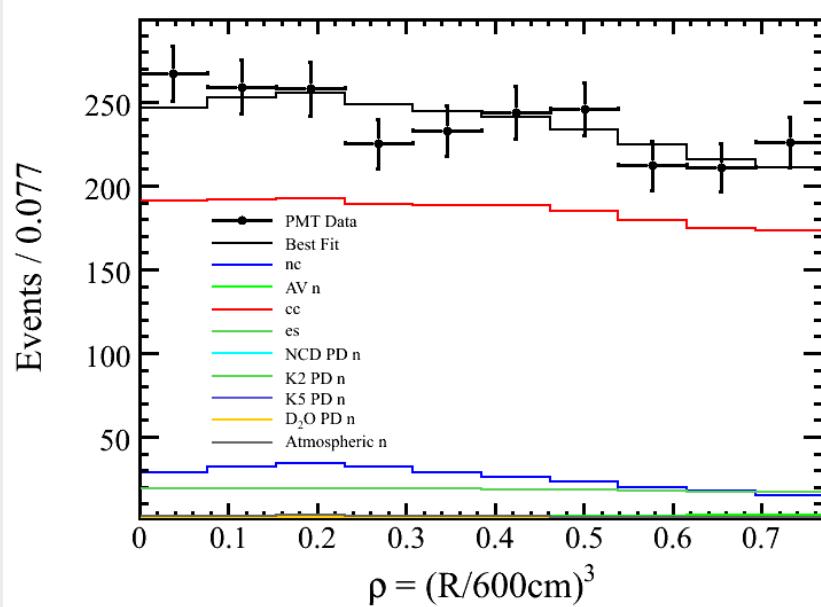
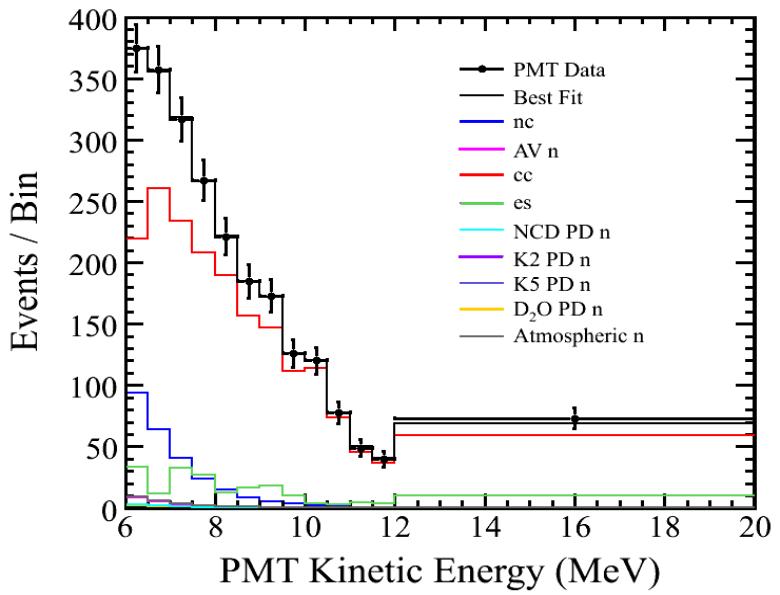
Keep p_i or p_{i+1} :

$p_{\text{keep}} = \max(1, L_{i+1} / L_i)$

62-parameter likelihood function
- 13 CC flux energy bins
- 13 ES flux energy bins
- NC flux
- 35 systematic parameters



Résultats



Flux et nombre d'événements

Fluxes (in unit of $10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$):

CC $1.67^{+0.05}_{-0.04}$ (stat) $^{+0.07}_{-0.08}$ (sys)

ES $1.77^{+0.24}_{-0.21}$ (stat) $^{+0.09}_{-0.10}$ (sys)

NC $5.54^{+0.33}_{-0.31}$ (stat) $^{+0.36}_{-0.34}$ (sys)

PMT events:

CC 1867^{+91}_{-101}

ES 171^{+24}_{-22}

NC 267^{+24}_{-22}

Background 77^{+12}_{-10}

Correlation matrix for the Salt phase:

	CC	ES	NC
CC	1.00		
ES	-0.16	1.00	
NC	-0.52	-0.06	1.00

Correlation matrix for the NCD phase:

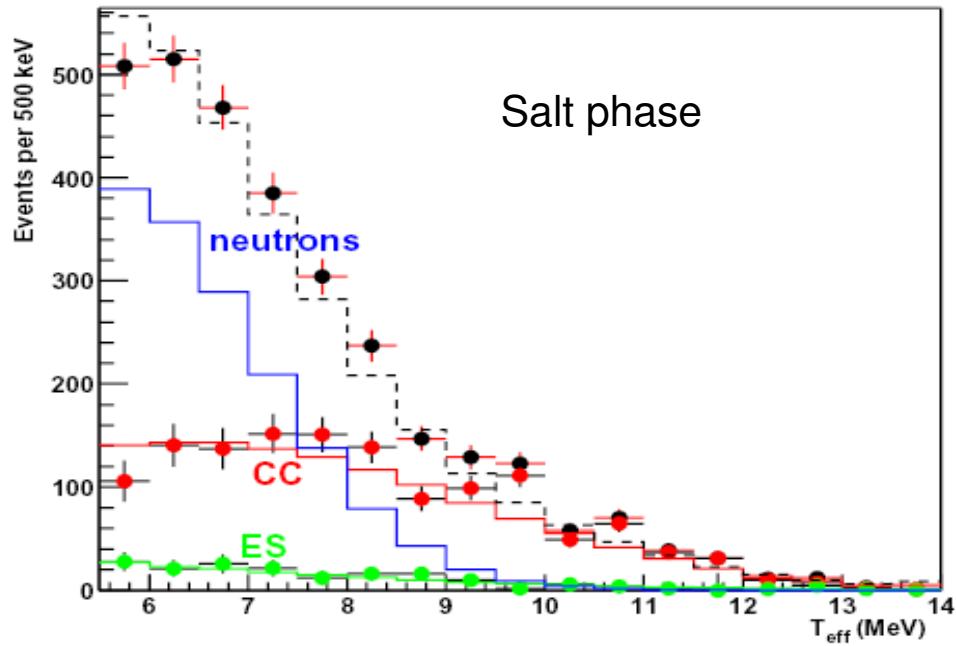
	CC	ES	NC
CC	1.00		
ES	0.24	1.00	
NC	-0.19	0.02	1.00

NCD events:

NC 983^{+77}_{-76}

Background 185^{+25}_{-22}

Salt and NCD phases comparison

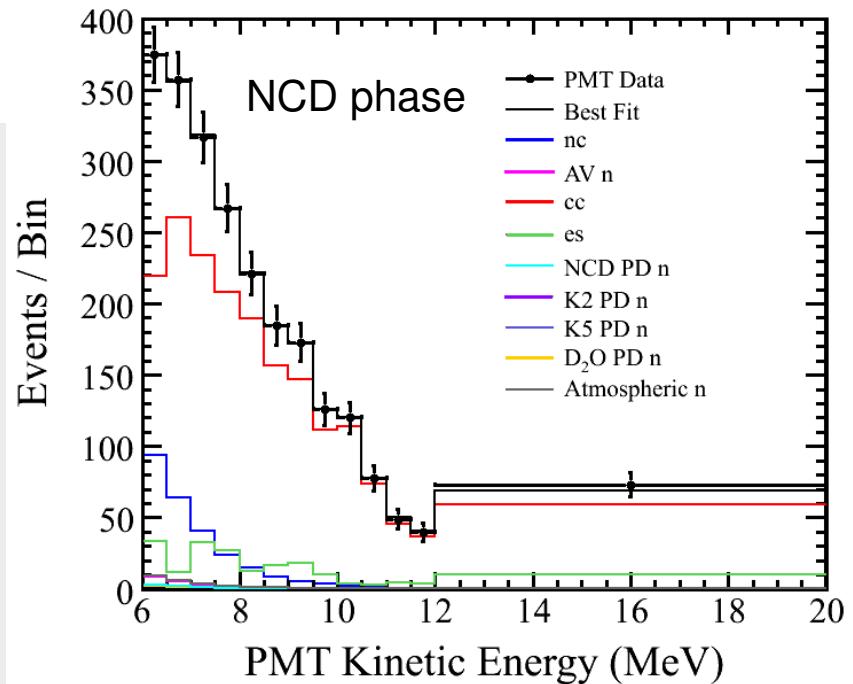


Salt phase

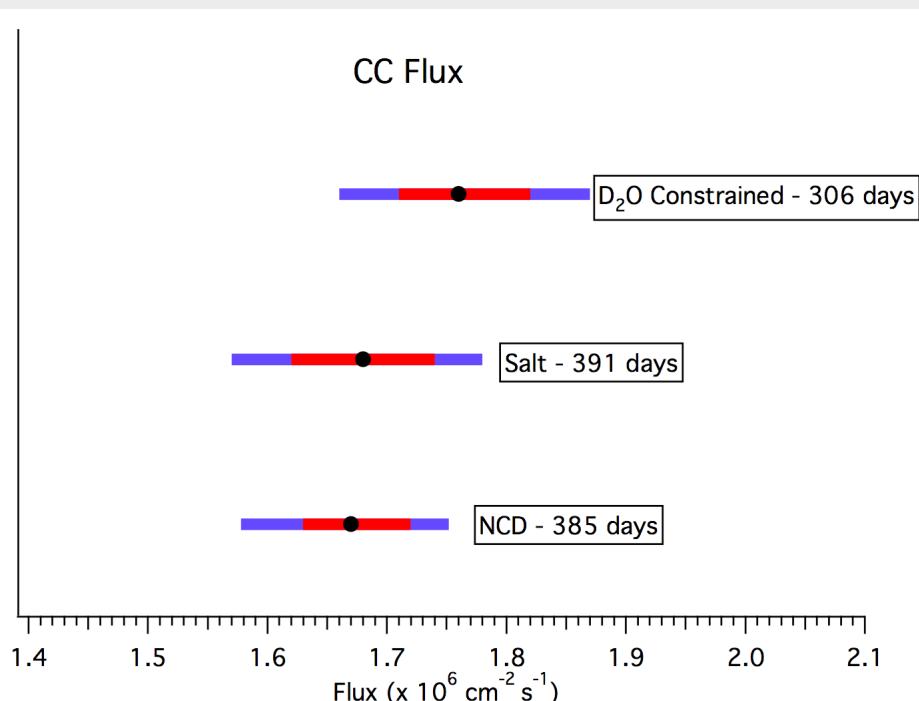
Better measurement of the CC flux.

Lower ES flux.

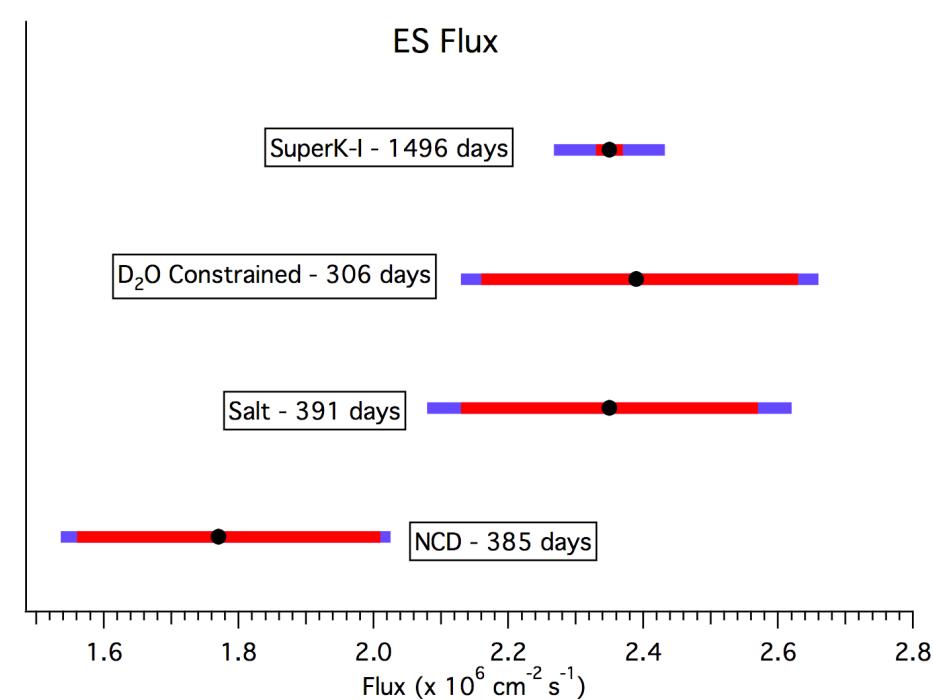
ES results deviation from prior results due to a statistical fluctuation.



Résultats

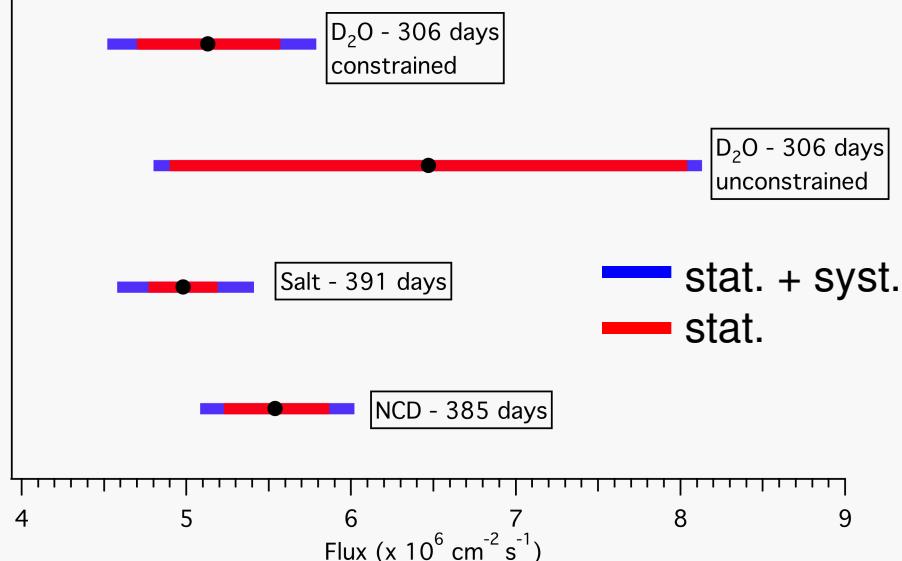


Les trois phases sont en accord !



Comparisons

NC flux (corrected to ${}^8\text{B}$ spectrum of Winter *et al.*)



Agreement with previous measurements
(estimated p-value = 0.328)

Agreement with standard solar models

Fluxes (in unit of $10^4 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

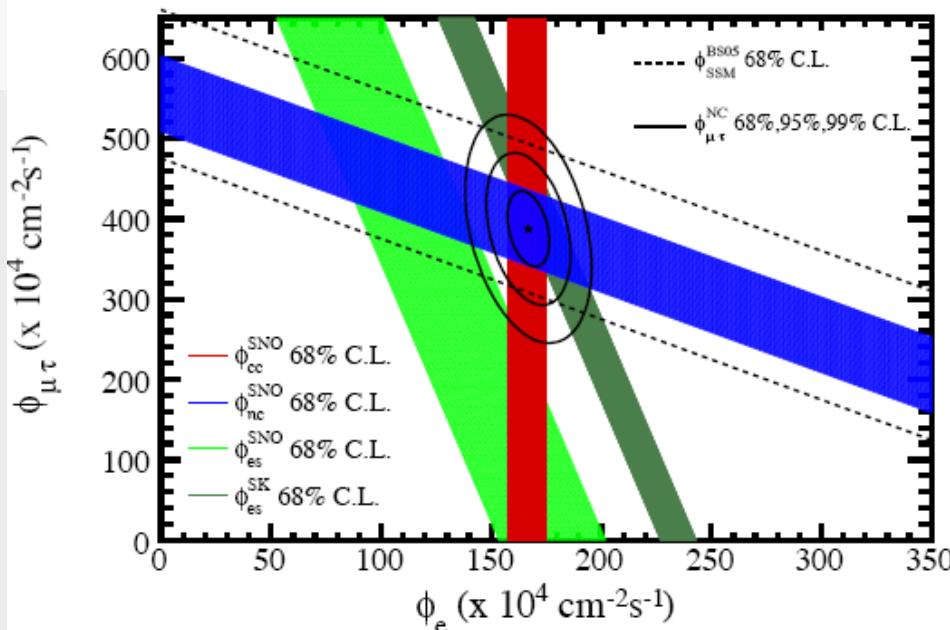
CC: 167(9)

ES: 177(26)

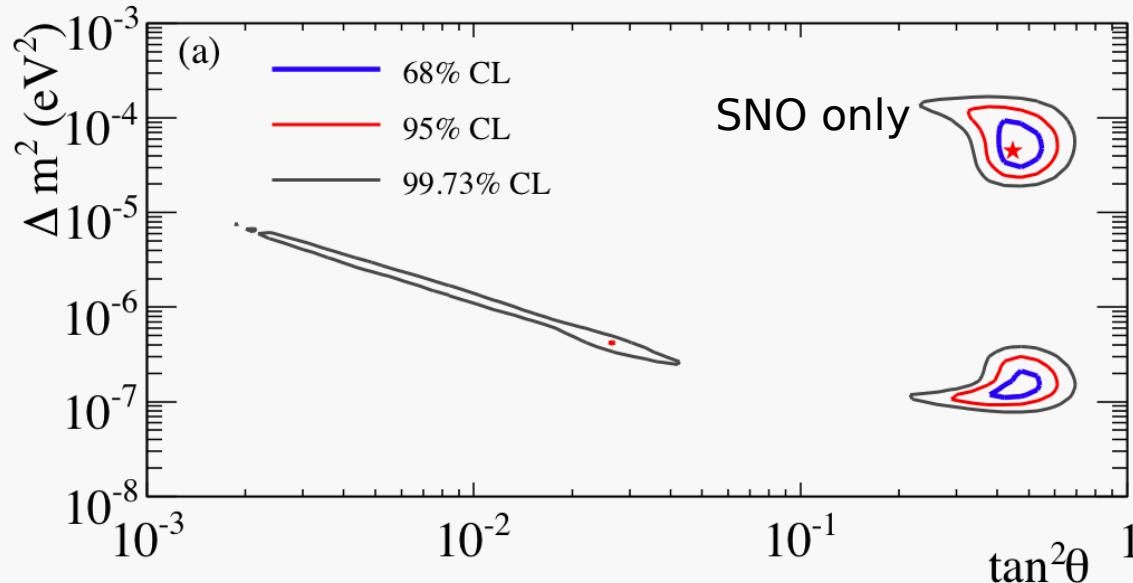
NC: 554(49)

SSM: 569(91) [BSB05-OP: Ap. J. 621, L85, 2005]

Super-K: 235(8) [PRD 73, 112001, 2006]



2-neutrinos oscillation contours



a) SNO only:
 D_2O & Salt day and night
spectra, NCD phase fluxes

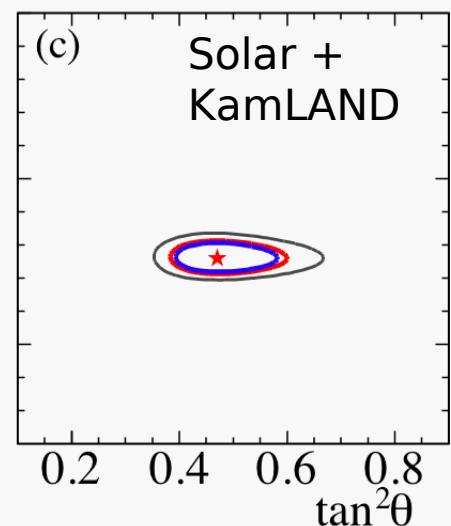
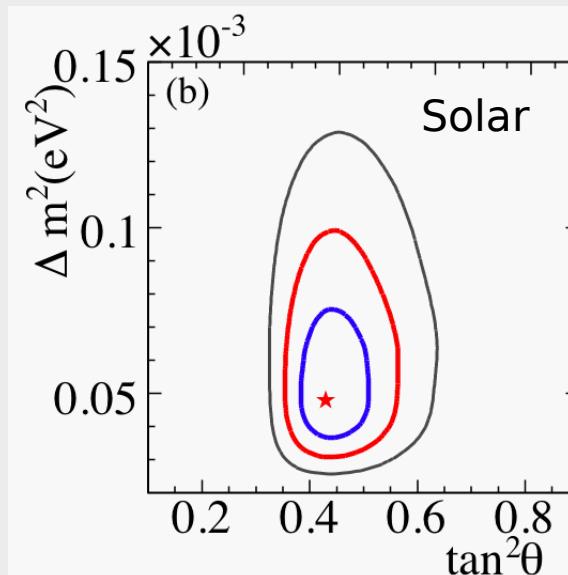
- b) Solar Global:
SNO, Super-K, Cl, Ga,
Borexino
c) Solar Global +
KamLAND

Solar+KamLAND best fit:

$$\Delta m^2_{12} = 7.59^{+0.19}_{-0.21} \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\theta_{12} = 34.4^{+1.3}_{-1.2} \text{ degrés}$$

$$\tan^2 \theta_{12} = 0.468^{+0.048}_{-0.040}$$



Conclusion

Résultats de la phase NCD : [PRL 101-111301 (2008)]

Mesure indépendante du flux ${}^8\text{B}$.

En accord avec les phases précédentes.

Corrélations réduites entre CC et NC.

Systématiques différentes.

Nouvelle précision sur θ_{12} avec 40% amélioration.

Futur :

μ , atmosphérique ν [accepted by PRD]

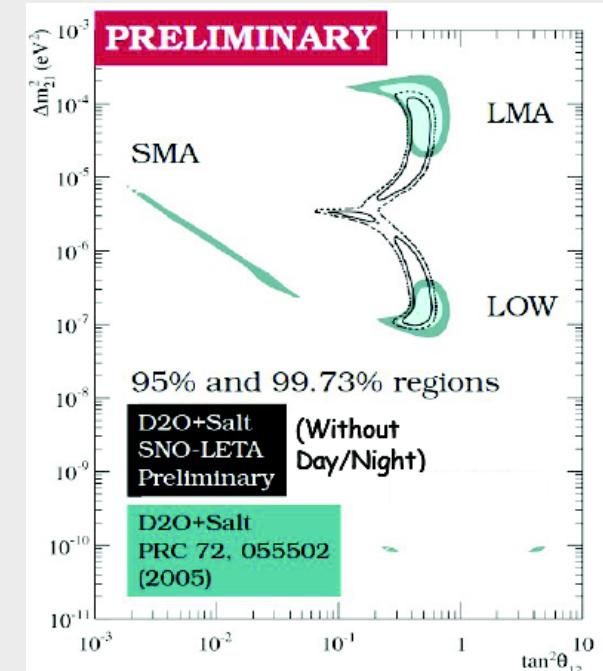
LETA (Low Energy Threshold Analysis)

Analyse des trois phases

Analyse trois neutrinos

Flux *hep*

Jour-nuit, autres variations



Puzzle complet ?

$$\begin{pmatrix} v_e \\ v_\mu \\ v_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i\alpha_{1/2}} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\alpha_{21/2}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix}$$

2 Δm^2 mais **hierarchie** et **masse absolue** inconnues

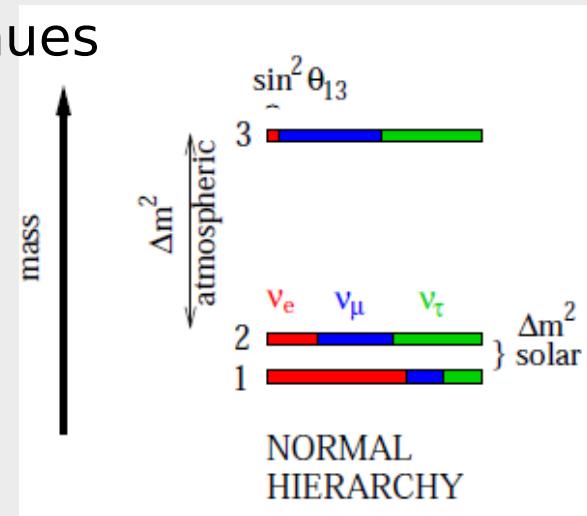
3 angles de mélange mais θ_{13} inconnu

1 phase de violation CP δ inconnue

2 phases Majorana α_1 et α_2 inconnues

→ **experiences $\beta\beta 0\nu$**

→ **superbeam,beta-beam,neutrino factory**



Mais aussi:
 MINOS, Opera, SuperK,
 Borexino, KamLAND, T2K,
 double CHOOZ, Daya Bay,
 RENO...

Canada:

Natural Sciences and Engineering Research Council

Industry Canada - National Research Council

Northern Ontario Heritage Fund - Vale Inco

Atomic Energy of Canada, Ltd.

Ontario Power Generation

High Performance Computing Virtual Laboratory

Canada Foundation for Innovation

Canada Research Chairs - Westgrid

US:

Department of Energy

NERSC PDSF

UK: STFC

Portugal: FCT

La collaboration SNO



University of Alberta,
University of British Columbia,
Carleton University, Univ. of Guelph
Laurentian University, Queen's U.
SNOLAB, TRIUMF



Brookhaven National Laboratory,
Lawrence Berkeley National Lab,
Los Alamos National Laboratory,
Louisiana State University, MIT,
University of Pennsylvania,
University of Texas at Austin,
University of Washington



LIP (Lisbon)



University of Oxford



Backup Slides

The big picture

The Maki-Nakagawa-Sakata-Pontecorvo (MNSP or PMNS or MNS) matrix:

$$\begin{pmatrix} v_e \\ v_\mu \\ v_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i\alpha_1/2} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\alpha_2/2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix}$$

Equation of evolution:

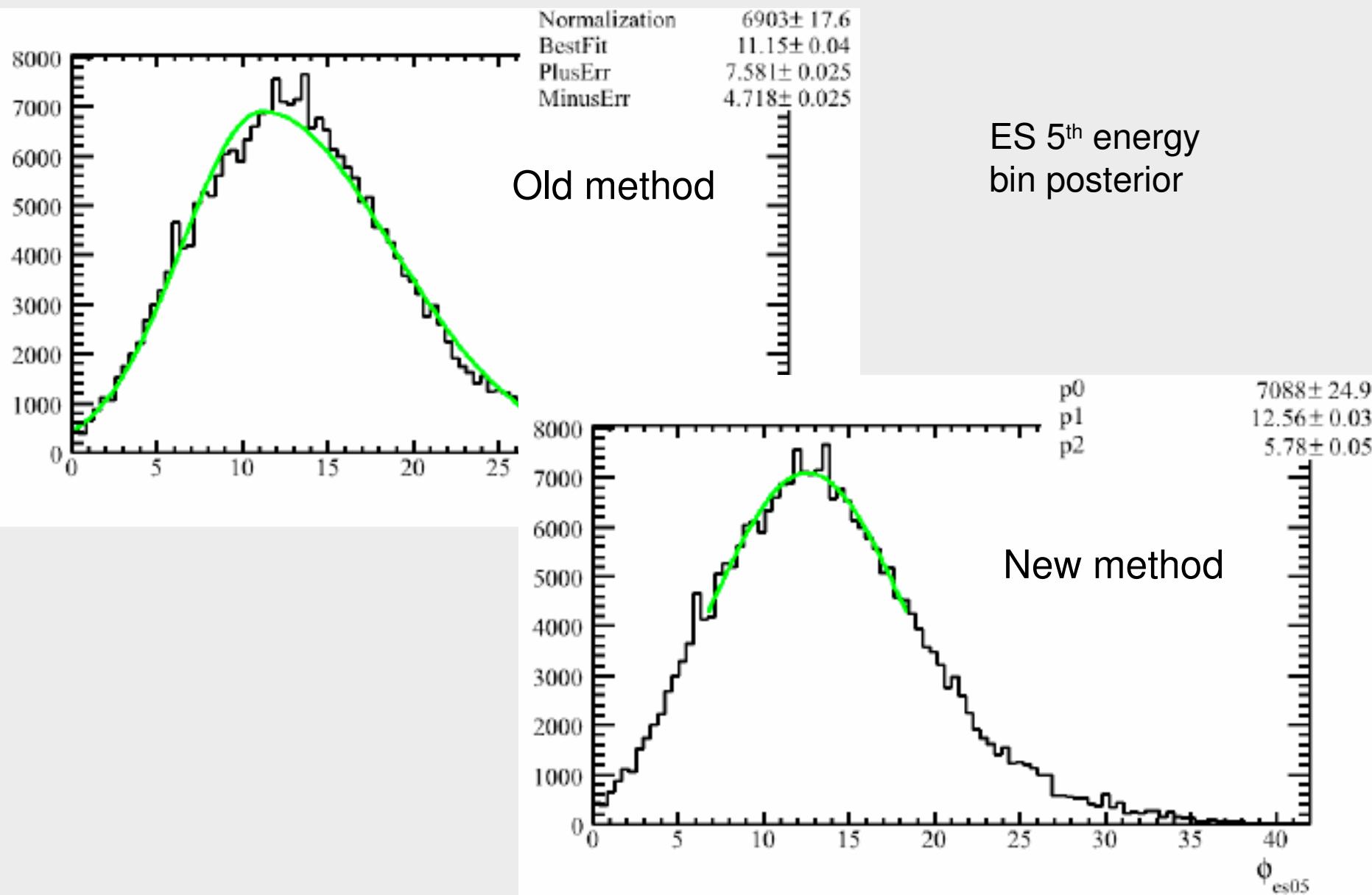
$$|v_\alpha(L)\rangle = \sum U^*_{\alpha i} \exp(-i m_i^2 L/2E) |v_i(L=0)\rangle$$

- 3 mixing angles
- 1 CP violation phase
- 2 Majorana phases

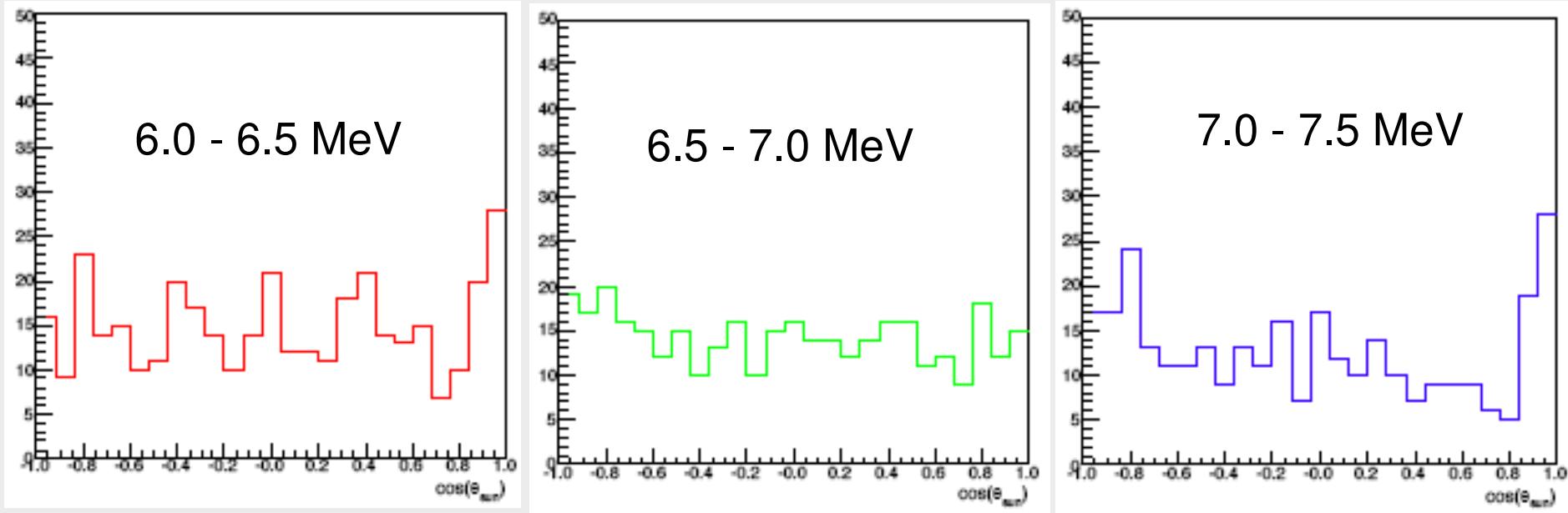
Oscillation probability (vacuum case):

$$P(v_\alpha \rightarrow v_\beta) = |\langle v_\alpha | v_\beta \rangle|^2 = \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum U^*_{\alpha i} U_{\beta i} U_{\alpha j} U^*_{\beta j} \sin^2(\Delta m_{ij}^2 L / 4E)$$

Change in parameterization for ES fit



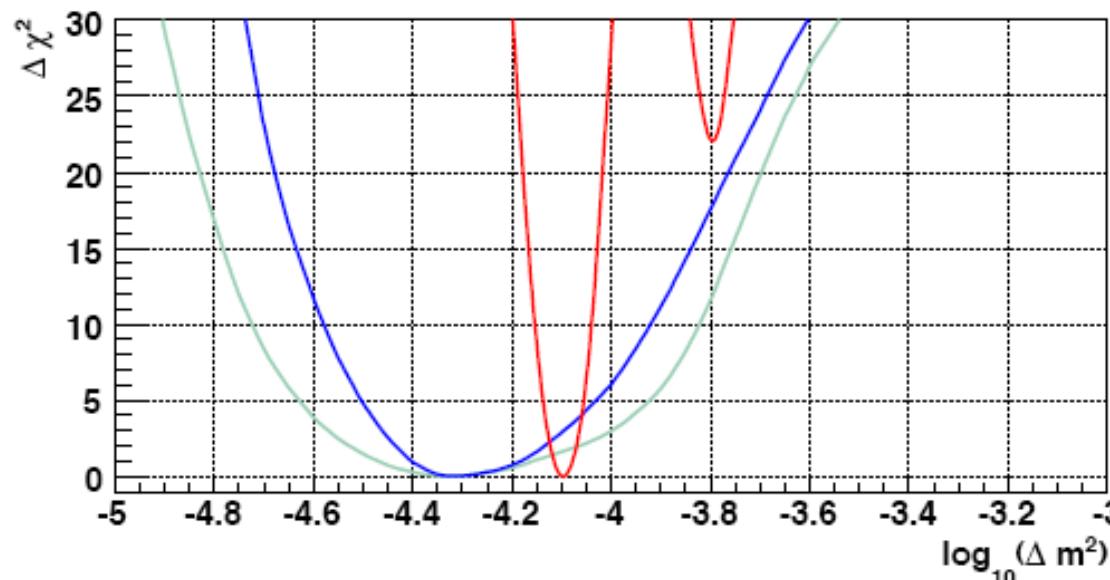
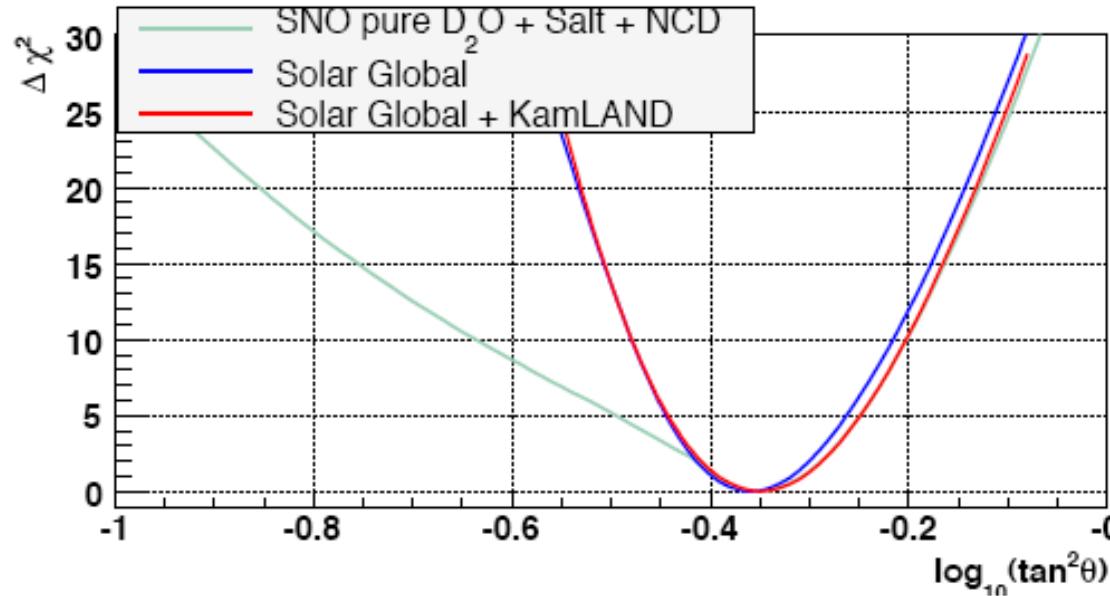
Angular distributions for ES

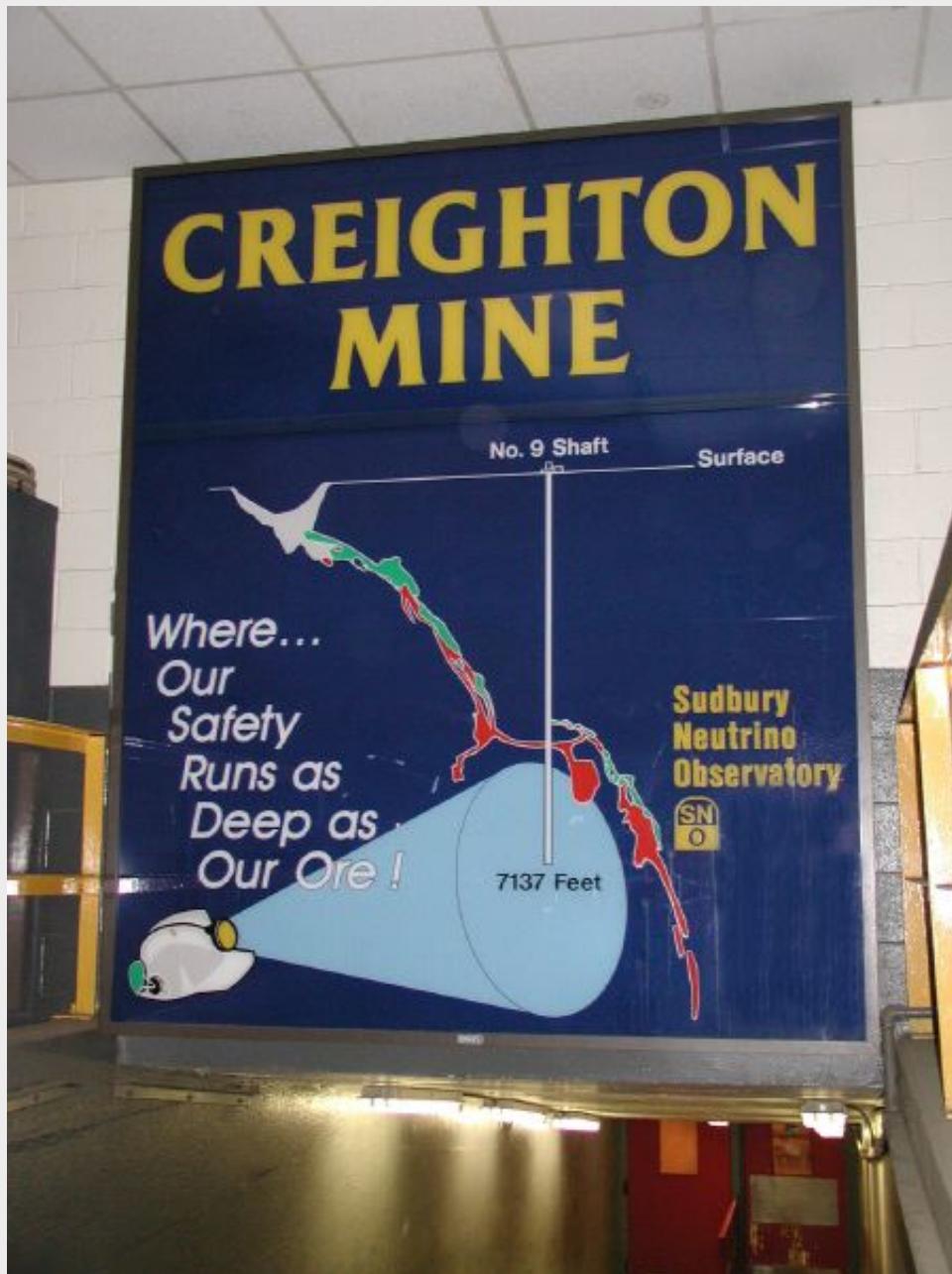


Distribution for the energy bin 6.5-7.0 MeV: no peak at $\cos(\theta_{\text{sun}})= 1$ as expected.

Statistical fluctuation (1.3% probable to obtain such a low number in this bin assessed by a MC of 10000 trials).

χ^2 map (SNO collaboration)





- vêtements avec bandes réfléchissantes
- lampe avec batterie
- chaussures à bout renforcés
- casque
- badge avec son nom à l'entrée



cage descendant à 7 km/h dans le noir.



Marche de plus d'un km dans la boue ou la poussière et le bruit .

On lave nos bottes avant de rentrer dans le laboratoire.





Salle “propre” avec système de ventilation spécial

La salle à manger







