

STEREO

Recherche de neutrinos stériles auprès du réacteur de l'ILL

Postdoc ENIGMASS
15 juillet 2013

LPSC : S. Kox, F. Montanet, J.S Réal, **A. Stutz**
LAPP : D. Duchesneau, P. Del Amo Sanchez, H. Pessard
LAPTH : P Serpico



Ces 20 dernières années ont constitué une période riche en succès expérimentaux dans le domaine de la physique des neutrinos

- Observation des oscillations de saveur avec différentes sources de neutrino, différentes techniques, couvrant un vaste domaine d'énergies et de distances
- Les résultats forment un ensemble cohérent avec des neutrinos disposant de 3 états de masse différents
- Le Modèle Standard Minimal est incomplet et nécessite une extension

Mais quelques anomalies ont été observées

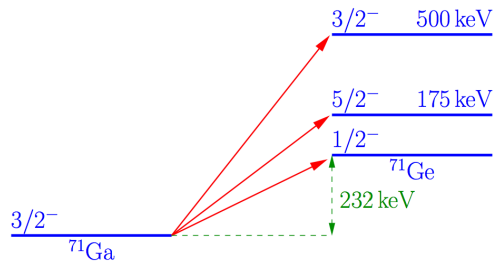
- LSND, MiniBoone : apparition $\bar{\nu}_e$, 3.8σ LSND
- Gallex et Sage : disparition ν_e , 2.9σ
- Anomalie des neutrinos de réacteur : disparition d' $\bar{\nu}_e$, 2.9σ
- Elles pourraient s'expliquer par l'existence d'au moins un quatrième neutrino stérile de l'ordre de 1 eV
- Elles nécessitent une clarification expérimentale
- Livre blanc de la communauté : arXiv:1204.5379

L' anomalie Gallium

Observation d'un déficit de neutrinos dans l'étalonnage des détecteurs de neutrinos solaires Gallex et Sage

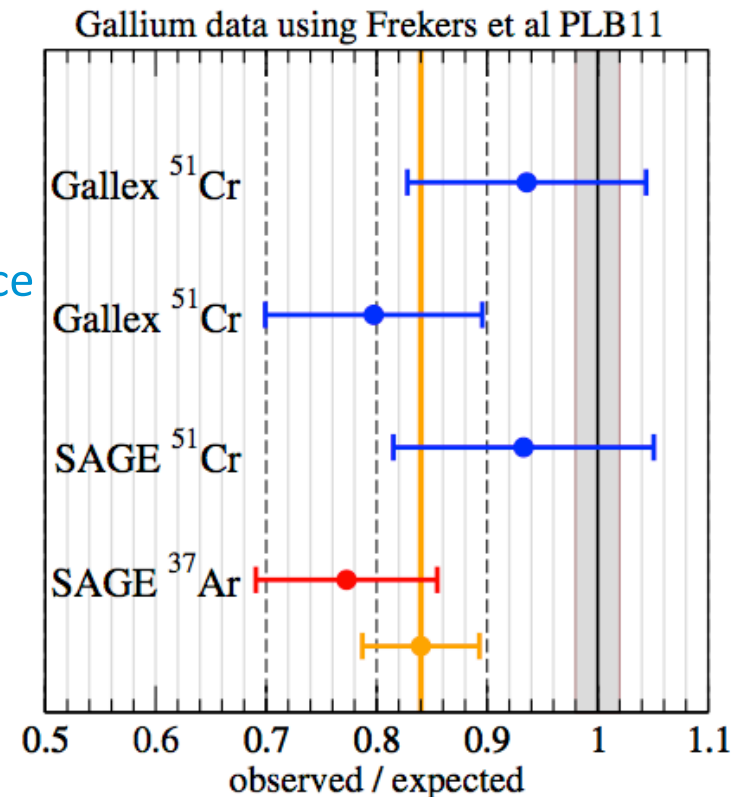
- Détection : $\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \rightarrow {}^{71}\text{Ge} + e^-$
- Sources de ν_e : ${}^{51}\text{Cr}$ et ${}^{37}\text{Ar}$
- Distances $\approx 1\text{m}$, Energies $\approx 0.7\text{ MeV}$

Renforcé par de nouvelles mesures de section efficace



$R = 0.84 \pm 0.05 \rightarrow$ Anomalie à 2.9σ

C.Giunti et al : 1210.5715v2



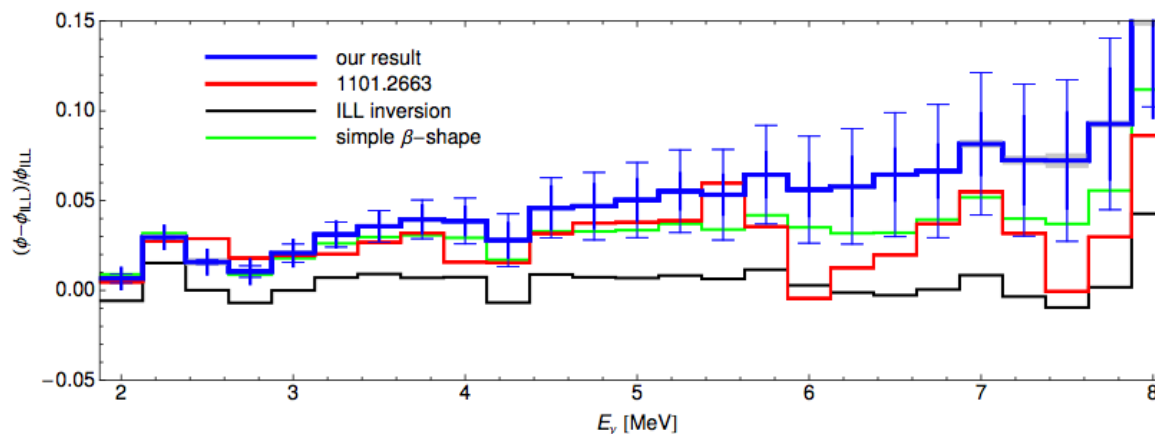
L'anomalie des neutrinos de réacteur

Réévaluation du spectre des neutrinos de réacteur

- Neutrinos de réacteurs
 - Emis par désintégration β^- des produits de fission \rightarrow flux quasi pur en $\bar{\nu}_e$: $1 \text{ GWth} \approx 2 \cdot 10^{20} \bar{\nu}_e/\text{s}$
 - Détection par désintégration β inverse (IBD) : $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$
- Spectre des neutrinos émis
 - Mesures très précises du spectre d' e^- des produits de fission faites à ILL $\sigma=1.8\%$
Shrekenbach et al. 1982,85,89
 - Conversion $e^- \rightarrow \bar{\nu}_e$
 - Avant 2011 : utilisation de 30 spectres virtuels
 - Après 2011 : Utilisation des données nucléaires

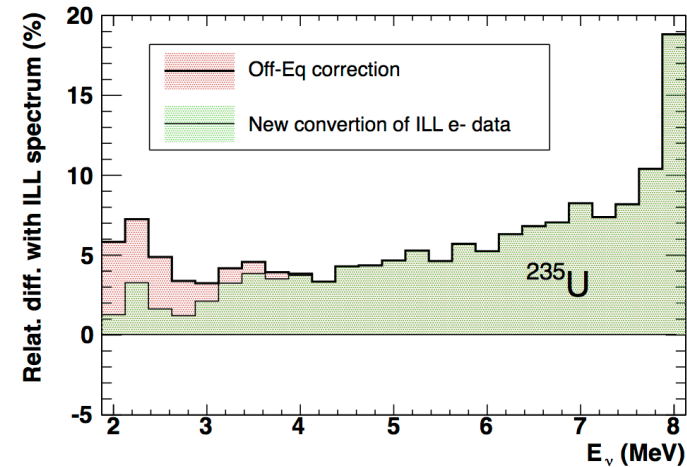
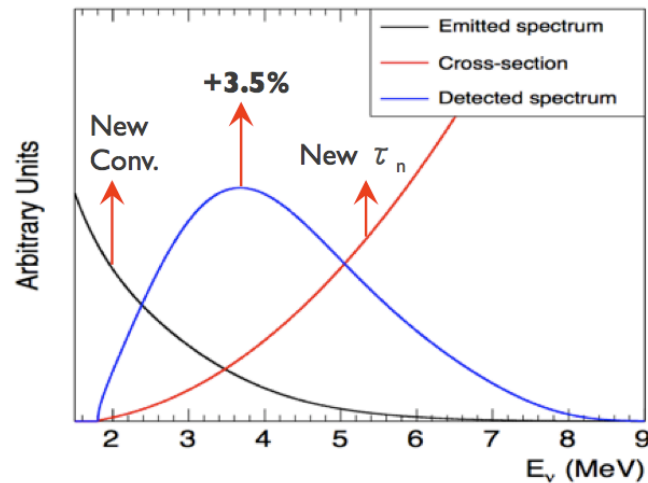
\rightarrow Biais : $\approx 3\%$

Mueller et al. 1101.2663 + confirmation indépendante par Huber, 1106.0687



L'anomalie des neutrinos de réacteur

- Spectre des neutrinos détectés : section efficace par fission
 - Nouveau spectre : + 3%
 - Correction off-équilibre : + 1%
 - Durée de vie du neutron, $\sigma_{\text{IBD}} \sim 1/\tau_n$: + 1.5 %
→ $\tau_n = 881,5 \pm 1.5 \text{ s}$ (PDG 2011)



➔ Augmentation du taux de neutrinos prédit de 3-4 %
par rapport aux calculs précédents

L'anomalie des neutrinos de réacteur

Réanalyse des 19 expériences à $L \leq 100$ m

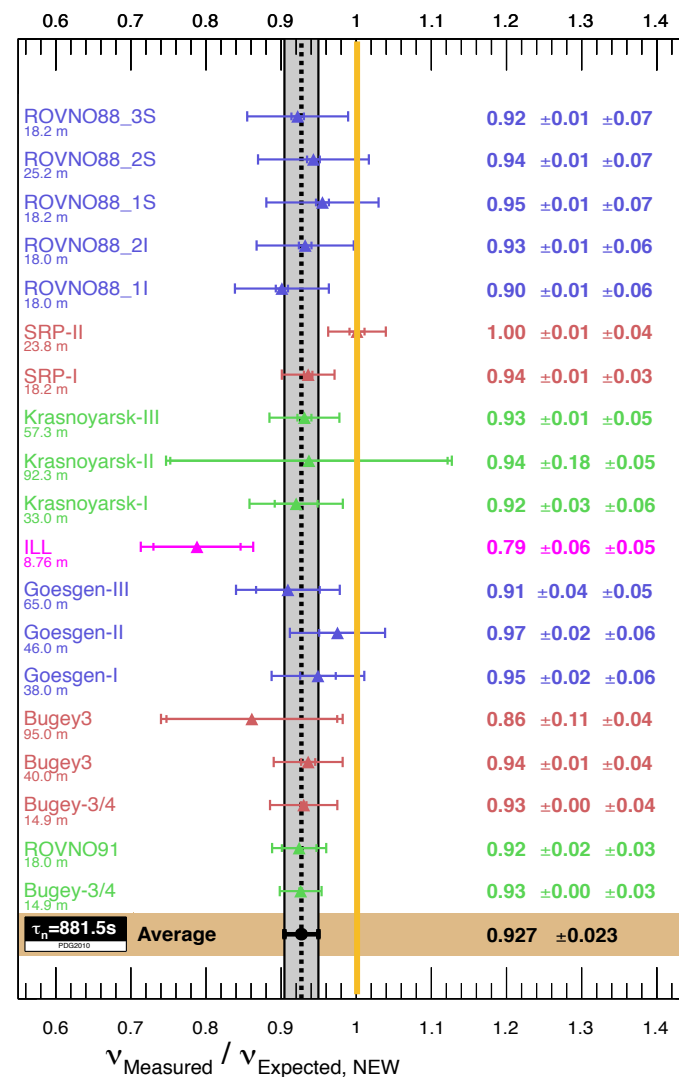
- Ajustement avec un facteur de normalisation
- Prise en compte des corrélations entre expériences
- Déficit $R = 0.927 \pm 0.023$

→ Anomalie des neutrinos de réacteur 3σ

Mention et al. 1101.2755

Explications

- Statistique ?
- Biais dans la prédiction du flux ?
 - Différents type de réacteur
 - Toutes les mesures dépendent de
 - la durée de vie du neutron
 - la mesure initiale du spectre d'électron
- Biais expérimental ?
 - Différentes techniques de détection
- Nouvelle physique à courte distance ?

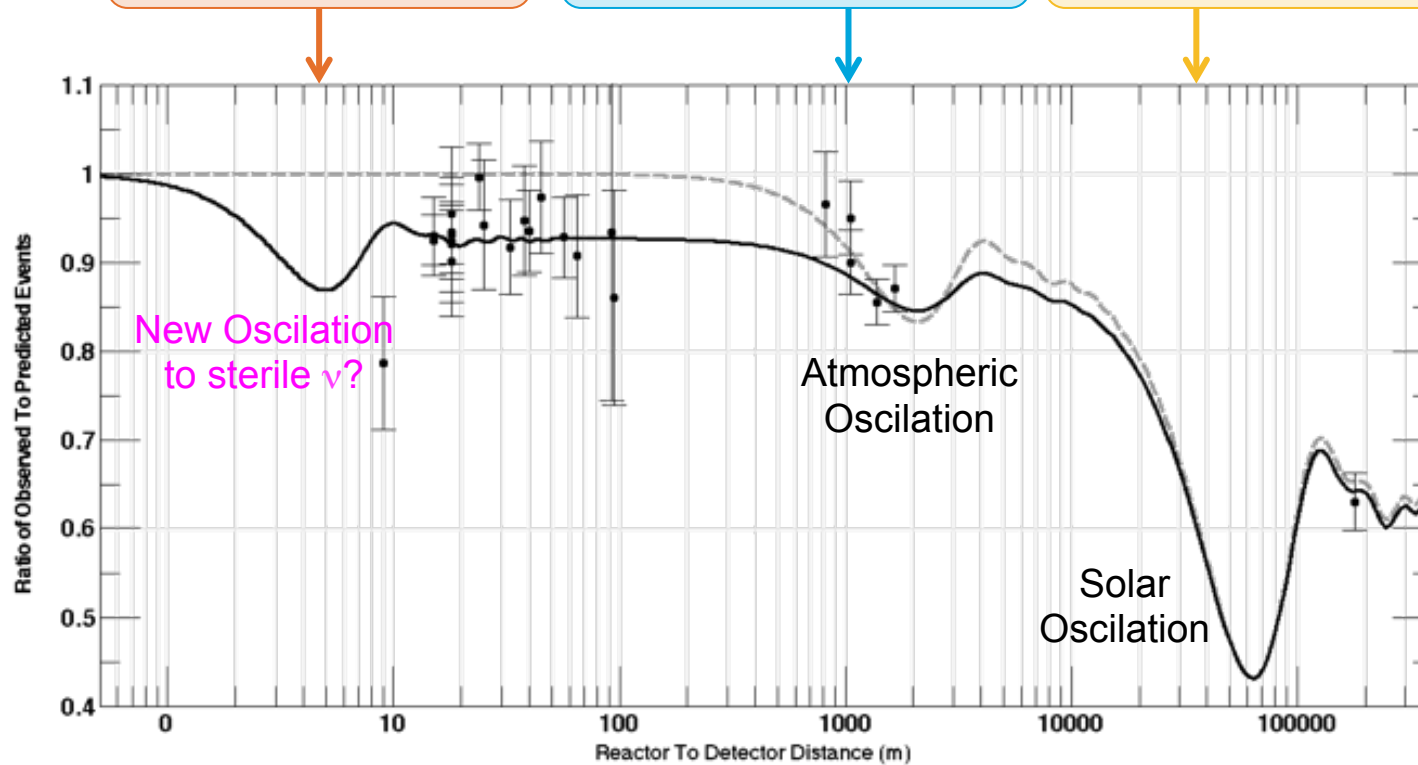


arXiv:1204.5379

Nouvelle oscillation vers un neutrino stérile ?

- Pas de couplage par interaction faible → Visible uniquement par effet d'oscillation

$$P_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e} = 1 - \boxed{\sin^2 2\Theta_{14} \sin^2 \left(1.27 \Delta m_{41}^2 \frac{L}{E} \right)} - \boxed{c_{14}^4 \sin^2 2\Theta_{13} \sin^2 \left(1.27 \Delta m_{31}^2 \frac{L}{E} \right)} - \boxed{c_{14}^4 c_{13}^4 \sin^2 2\Theta_{12} \sin^2 \left(1.27 \Delta m_{21}^2 \frac{L}{E} \right)}$$

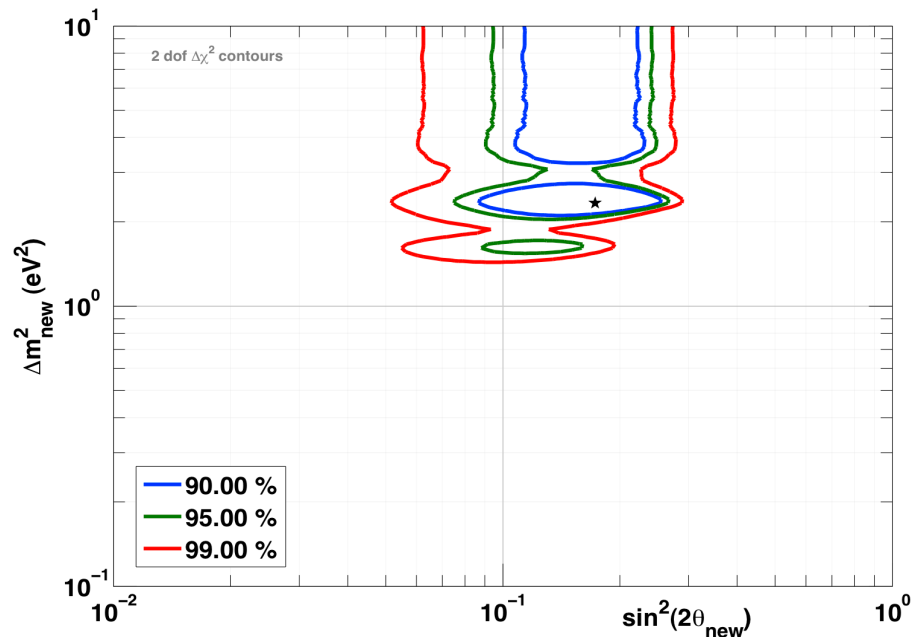


G. Mention et al. Phys Rev D 83 073006 (2011)

Analyse globale réacteurs SBL + Gallium

Réacteurs SBL + Gallium

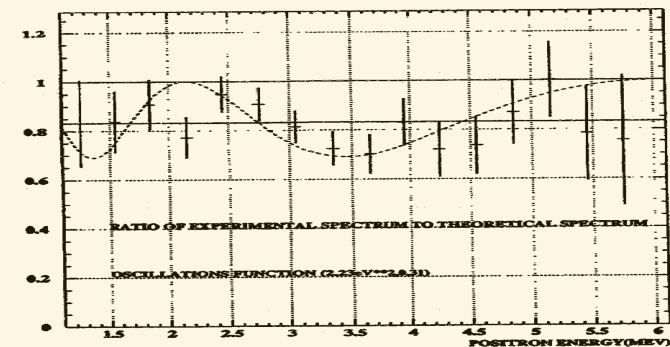
- $|\Delta m^2| = 2.3 \pm 0.1 \text{ eV}^2$
- $\sin^2(2\theta_{\text{new}}) = 0.17 \pm 0.04$
- non oscillation exclue à 3.6σ



arXiv:1204.5379

- Déclenchement d'une forte activité dans la communauté neutrino
- De nombreux projets sont en préparation : accélérateurs, sources, réacteurs

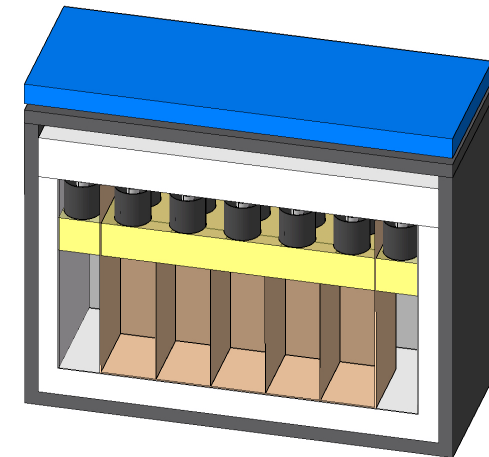
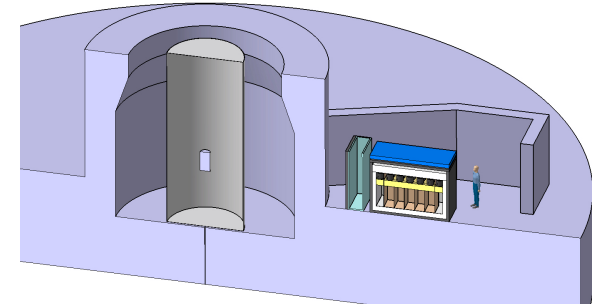
Les oscillations étaient-elles déjà présentes dans les données de l'ILL en 1981 ?



Phys. Rev. D 24.1097 1981
App. Rad. Isot. 46,449(1995)

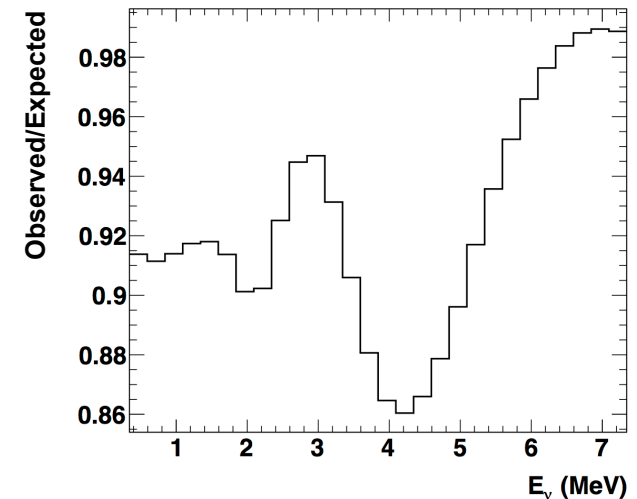
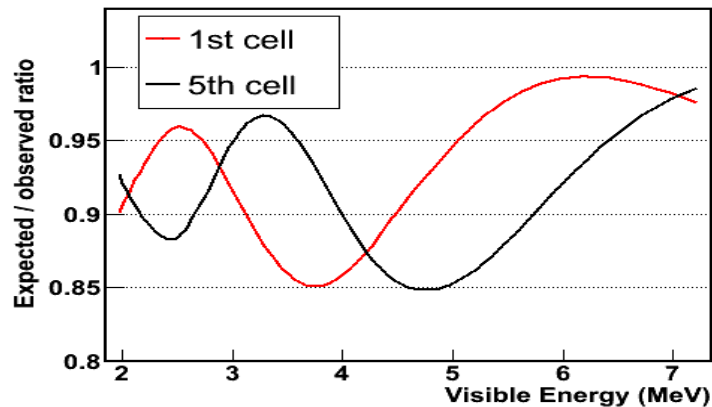
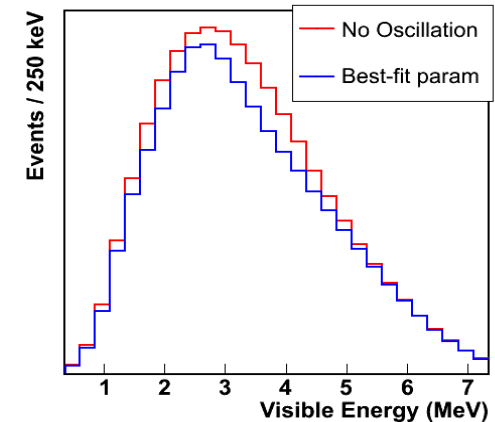
Les objectifs du projet STEREO@ILL

- Couvrir le contour de l'anomalie avec une très grande précision
- Proximité du réacteur très compact de l'ILL
- Signature non ambiguë de l'oscillation
 - Déformation du spectre en énergie et en distance
 - Analyse de forme indépendante de la normalisation (puissance, flux, normalisation)
- Utilisation d'une technologie éprouvée pour une prise de données en 2015



$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_e}(E_{\nu_e}, L) = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2\left(1.27 \frac{\Delta m^2 L}{E_{\nu_e}}\right)$$

- Analyse robuste de l'oscillation
 - Observation de la déformation du spectre en énergie
 - Evolution de la phase avec la distance
- Conditions
 - Bonne résolution en distance (source + détecteur)
 - Bonne résolution en énergie
 - Point critique : bruit de fond



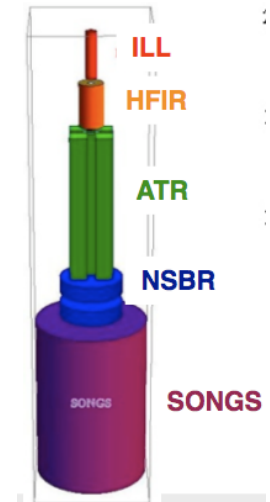
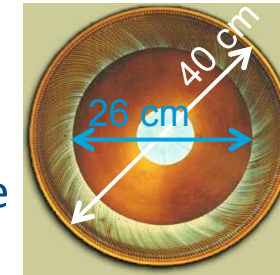
Le réacteur de l'ILL

Cœur compact

- $\Phi \approx 40$ cm, $h \approx 80$ cm
- Un des plus compact au monde
- Evite de moyenner l'oscillation par la taille de la source

$$\text{RMS}_{\text{cœur}} = 24 \text{ cm} \ll L_{\text{osc}} = 3.2 \text{ m à } 3 \text{ MeV}$$

- Déplacement du barycentre 10 cm au cour d'un cycle perpendiculairement à l'axe du détecteur/réacteur

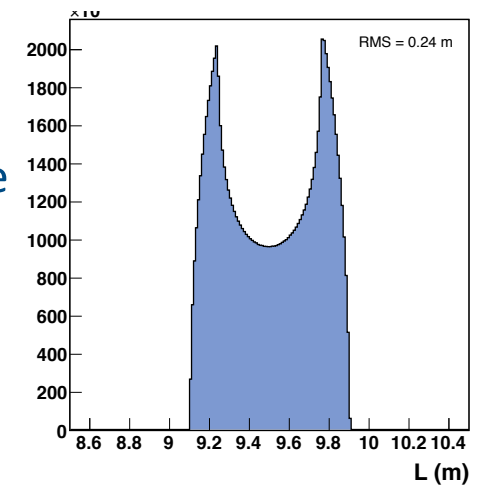


Cœur fortement enrichi en ^{235}U (93%)

- Spectre indépendant des effets d'évolution du combustible
 - $E = 201.9 \pm 0.5$ MeV/fission
- Spectre le mieux connu

Puissance : 57 MW

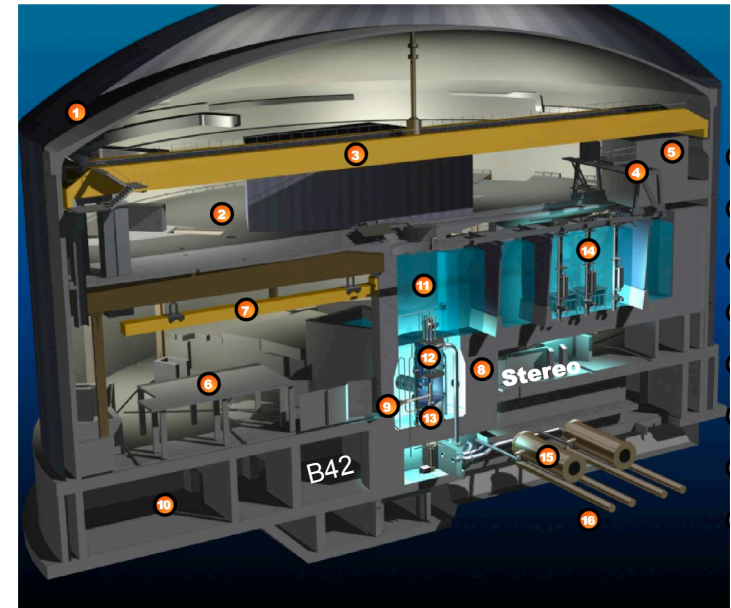
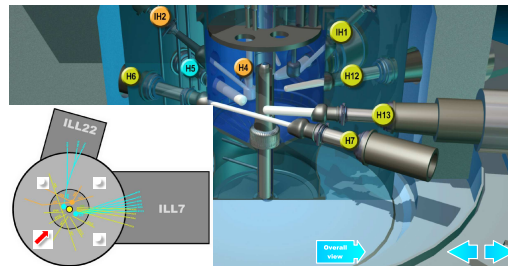
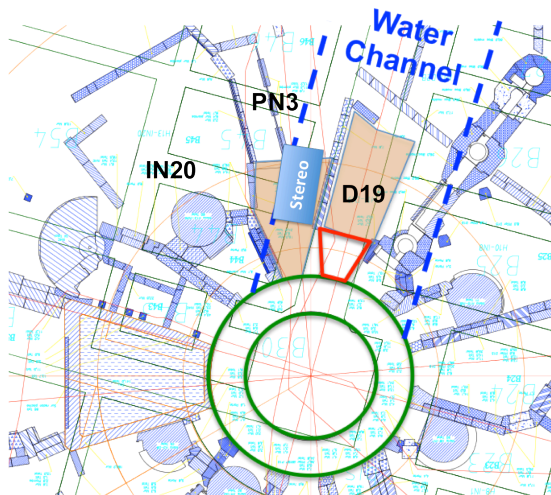
- 4 cycles de 50 jours par an \approx 200 jours ON



Le réacteur de l'ILL

Plusieurs possibilités d'accès à très courte distance, mur du réacteur à 5 m

- B42 : expérience précédente à 8.78 m
- Niveau C
 - Axe du réacteur
 - Protection canal d'eau

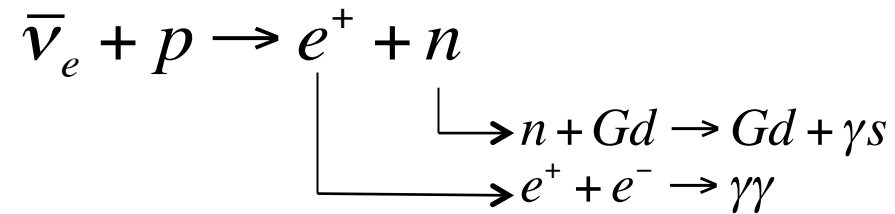


Evaluation de STEREO par le conseil scientifique de l'ILL en avril 2013

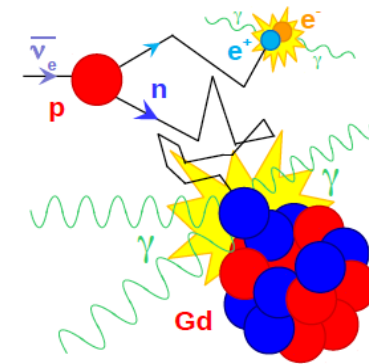
→ Accord pour une installation au niveau C en PN3

Le principe de détection

Détection par désintégration β inverse dans du scintillateur dopé au Gd :



- Seuil : $\Delta + m_e = 1.804 \text{ MeV}$ ($\Delta = M_n - M_p$)
- $E_n \approx 25 \text{ keV}$
- $E_{\text{vis}} \approx E_\nu - \Delta + m_e \approx E_\nu - 0.782 \text{ MeV}$



Signature en coïncidence temporelle :

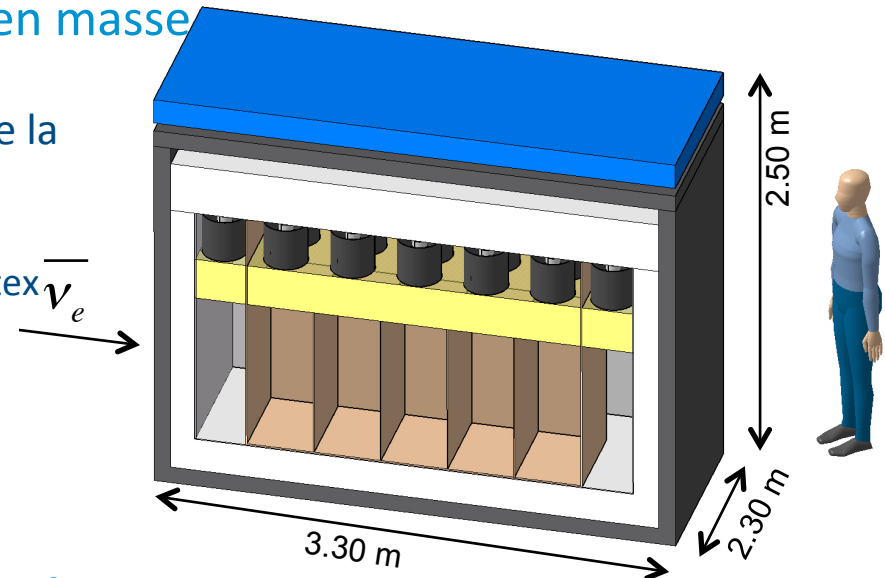
- Signal prompt : Ionisation du positron + γ d'annihilation
- Signal retardé : capture du neutron sur Gd
 - Cascade de gammas, énergie totale $\approx 8 \text{ MeV}$ (\gg radioactivité naturelle ^{208}Tl à 2.6 MeV)
- $\Delta T \approx 15 \mu\text{s}$ (0.2% Gd)

Le détecteur

2m³ de scintillateur liquide dopé à 0.2% Gd en masse

- Cible + capture du neutron
- 5 cellules de 40 cm de profondeur le long de la direction du cœur
 - 90 cm haut, 1.10 m de large
 - Détermination passive de la position du vertex \vec{v}_e
 - Profondeur comparable à la taille du cœur

→ $\delta L_{osc} = 32 \text{ cm } (1\sigma)$

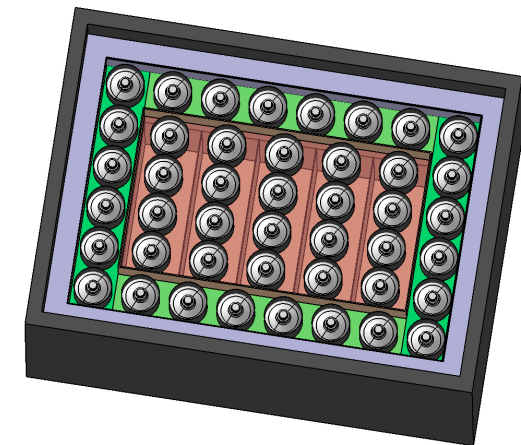


Couronne 30 cm scintillateur non dopé (1.7 m³)

- Améliore la résolution en énergie et l'efficacité neutron
- Veto actif pour le bruit de fond externe

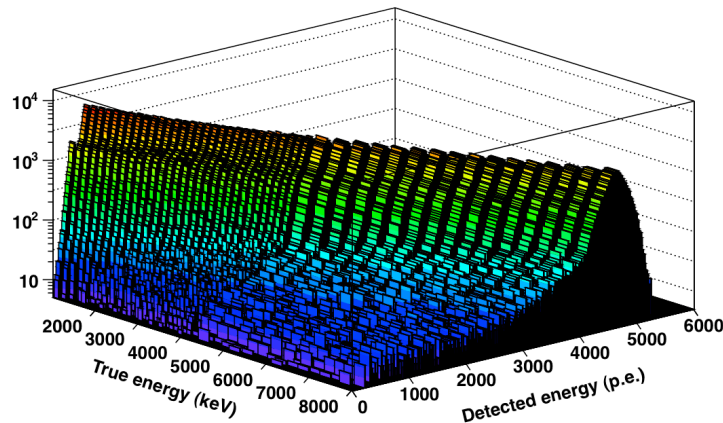
Collection lumière

- Par le dessus avec 44 PMTs 10'' (50% surface)
- Buffer en acrylique 20 cm
 - Homogénéité de la réponse de la cellule dans tout le volume
- Contact optique Buffer/PMT avec huile minérale



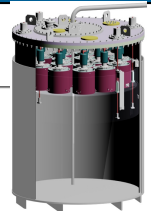
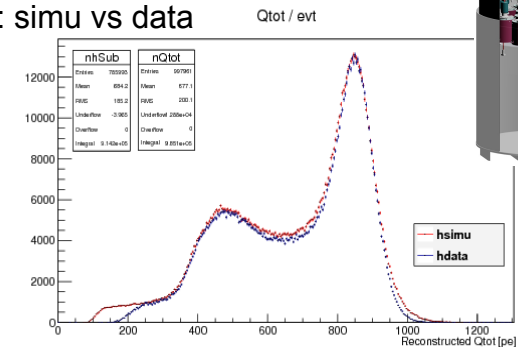
La réponse en énergie

- Réponse en énergie estimée par simulation Geant4
 - simulation adaptée de DC et Nucifer
 - modèle de scintillation détaillé et validé
- ≈ 460 pe /MeV (5%), Effet haut/bas $\approx 3\%$ / m
- Résolution dominée par échappement 511 keV
- Réponse homogène centre/bord grâce à la couronne externe
 - $\delta E/E \approx 10\%$ $e^+ 2$ MeV (≈ 3.02 MeV $E_{\text{déposée}}$)

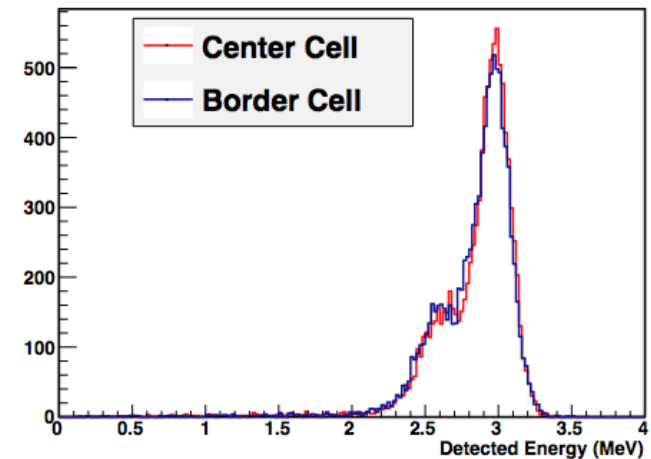


- Calibration individuelle de chaque cellule avec des sources
 - Dispositif automatique de déplacement
 - Précision de 2% sur l'échelle d'énergie
- Contrôle du gain des PMTs et transmission optique
 - système d'injection de lumière par LED et fibres
 - Précision de 1% sur la stabilité du détecteur

^{60}Co Nucifer : simu vs data

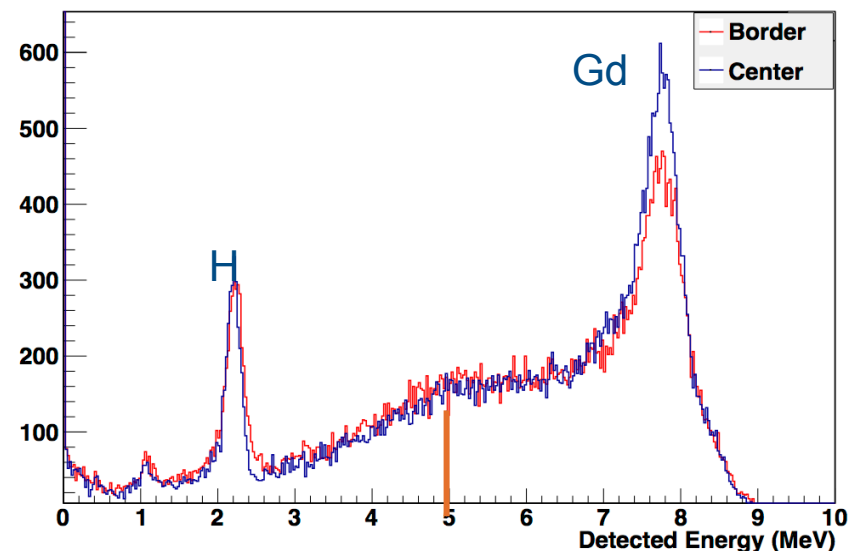


Cible + couronne e^+ de 2 MeV



L'efficacité de détection neutron

- $\approx 90\%$ des captures sur Gd
- Temps de capture $\approx 15\ \mu\text{s}$ Gd vs $200\ \mu\text{s}$ H
- Cascade de gammas d'énergie totale 8 MeV
 - $\approx 30\ \text{cm}$ dans le scintillateur
 - Couronne externe réduit les fuites de γ
- Efficacité de détection moyenne
 - 64 % pour $E_{\text{dep}} > 5\ \text{MeV}$
 - 51 % pour $E_{\text{dep}} > 6\ \text{MeV}$
- Effet centre/bord
 - Cellule centre : 66 %
 - Cellule bord : 62 %
- Etalonnage avec source Am-Be
 - Corrélation neutron et γ de 4.4 MeV
 - Précision 2 % sur l'efficacité de détection



Bruit de fond corrélé au réacteur

- Gammas et neutrons thermiques -> **Bruit de fond fortuit**
- Neutrons rapides (signal prompt = proton de recul + signal retardé = capture du neutron)
 - **bruit de fond corrélé** → **Doit être rendu négligeable**
- Protection par des blindages lourds
 - la tenue de la dalle est suffisante 10 à 20 t/m² (étude ILL 2010)

Bruit de fond indépendant du réacteur

- Neutrons rapides induits par interactions des muons -> **bruit de fond corrélé**
- Protection par le canal d'eau et un véto muon
- Radioactivité des matériaux -> **bruit de fond fortuit**
- Test des matériaux

Le bruit de fond fortuit est mesuré en ligne avec une grande précision

- $R_p \times R_d \times \Delta t < R_v$
- Signal prompt : $E_{\text{dep}} > 2 \text{ MeV}$ (γ s) → $R_p < 200 \text{ Hz}$
- Signal retardé : $5 < E_{\text{dep}} < 10 \text{ MeV}$ → $R_d < 1 \text{ Hz}$
-

Le bruit de fond corrélé est mesuré pendant les périodes de réacteur OFF

- OFF $\approx 45 \%$ du temps
- Corrélés avant PSD $< 5.10^{-3} \text{ Hz}$

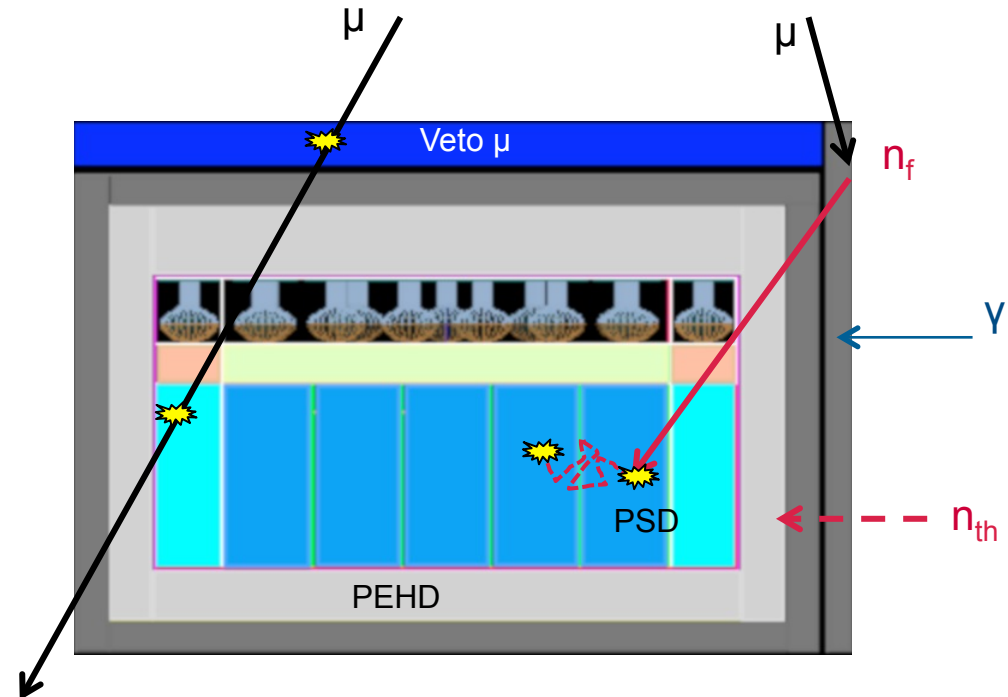
Les blindages

Blindage passif

- Pb 10 cm
- Mur frontal Pb 10 cm coté réacteur
- Polyéthylène boré 15 cm faces latérales
20 cm en bas, 30 cm en haut

Blindage actif

- Veto muon : Cerenkov à eau 20 cm
- Couronne externe 30 cm LS



Aménagement de la casemate PN3 pour STEREO

- Opportunité offerte par l'arrêt prolongé du réacteur de l'ILL du 9 août 2013 -> juin-juillet 2014

Validation des protections nécessaires

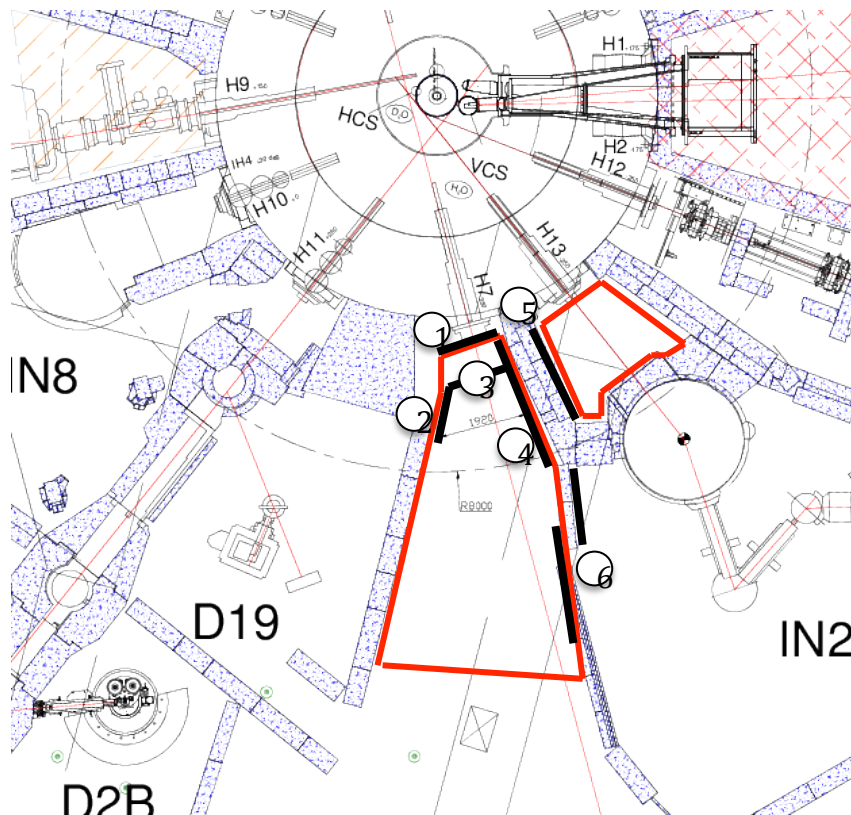
- Mesures sur sites avec détecteurs Ge et ^3He : 4 campagnes depuis juin 2012
- Comparaison avec des expériences similaires ILL-1@B42 Nucifer@OSIRIS
- Simulations Geant4 MCNPX

Aménagement de la casemate pour STEREO

Objectif : protéger le détecteur des sources de bruit identifiées

- Installation d'un bouchon dédié pour le tube H7
- Couverture des surfaces des casemates en B4C 5mm
- Murs de plomb devant les sources identifiées (20 cm)

ILL-1 : les taux de comptage single étaient indépendants de l'état du réacteur



- Mise en place durant le grand arrêt du réacteur
- Profiter des premiers cycles pour valider et optimiser l'installation des blindages avant d'installer le détecteur

- 1 10 cm Pb à compléter
- 2 10 cm Pb : 5 cm existant + 5 cm
- 3 10 cm Pb existant prévoir une possible extension
- 4 Prévoir possibilité d'ajouter 5 cm Pb
- 5 15 cm Pb : 10 cm à compléter + 5 cm + marge de 5 cm

Contraintes d'installation

- Sécurité sismique
- Sécurité incendie
- Dossier ASN à déposer fin 2013
- Travail en cours avec expert incendie et ingénieure de sécurité ILL

Modification du détecteur par rapport au projet initial

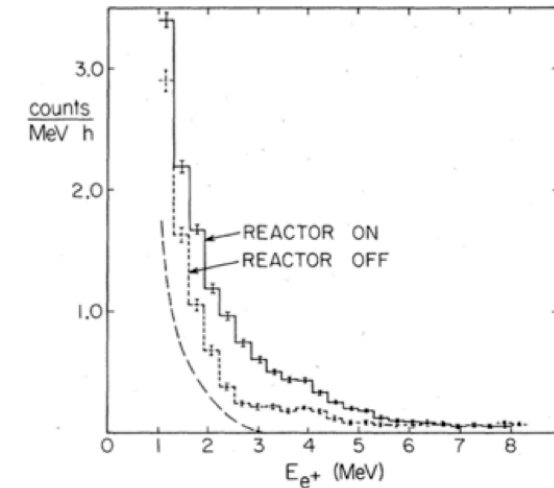
- Distance STEREO/réacteur : 10 m
- Largeur de la cible réduite de 1.1 à 0.9 m
- 6 cellules au lieu de 5

Caractéristiques principales de STEREO

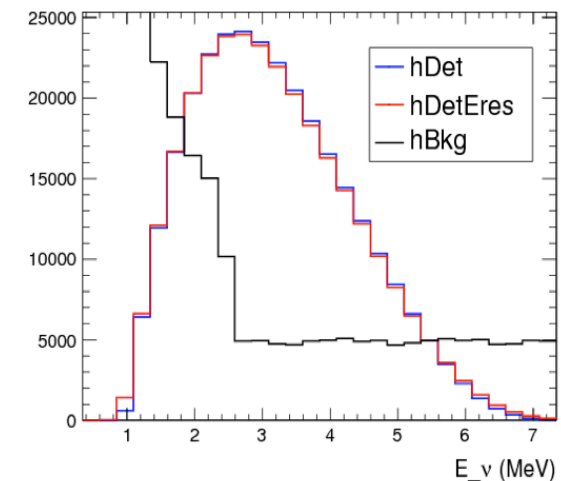
Puissance du réacteur	57 MW
σ (^{235}U) /fission	$6.69 \cdot 10^{-43} \text{ cm}^2$
Distance moyenne au cœur	10 m
Nombre de protons cibles	$1,3 \cdot 10^{29}$
Seuil Evis à 2 MeV ($E_\nu > 2.8 \text{ MeV}$)	81 %
Efficacité neutron ($E_{\text{dep}} > 5 \text{ MeV}$)	64 %
Temps mort	5 %
$\delta E/E$ @ 2 MeV	10 %
δL evt by evt	32 cm

Signal attendu 480 v/ jrs

Challenge : $S/B > 1.5$ (\approx ILL-1)

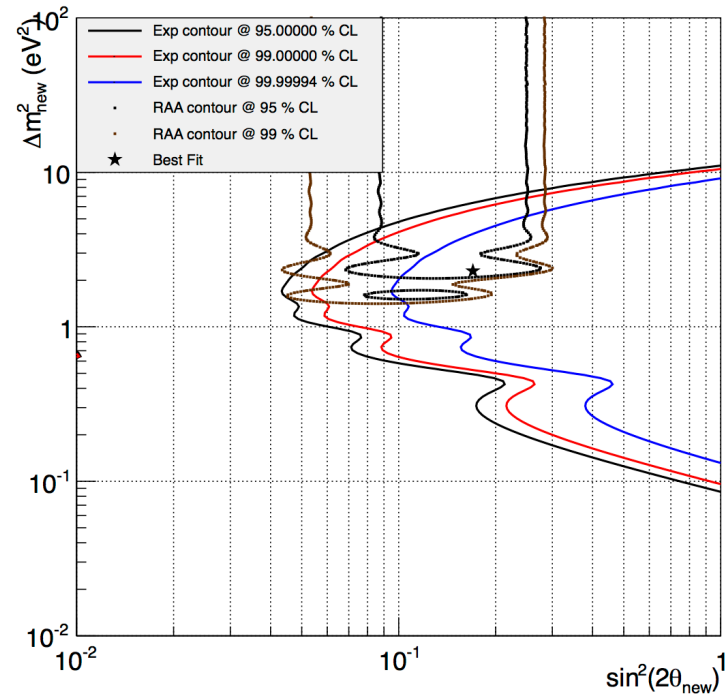


Phys. Rev. D 24.1097 1981



- 300 jours de réacteur ON - 160 jours de OFF - S/B= 1.5

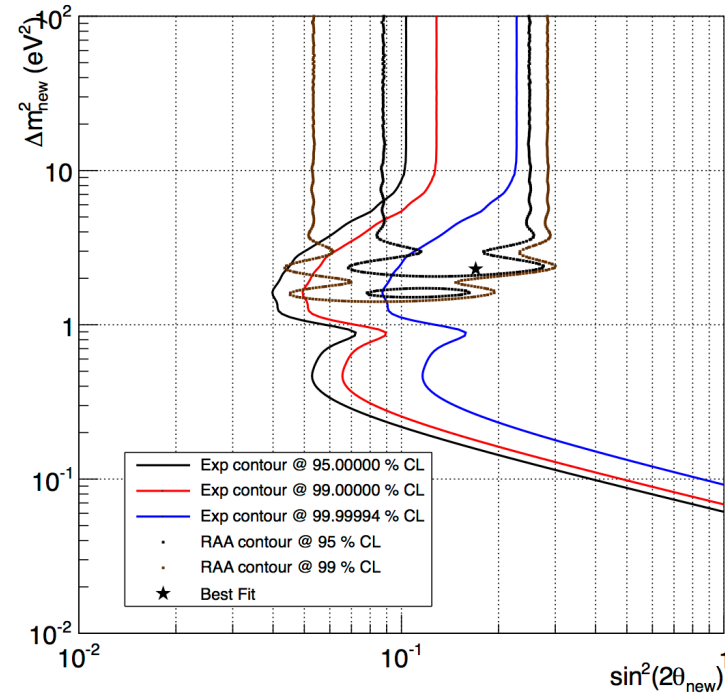
Analyse de forme



Erreurs systématiques

- Spectre de fission 0.7 -> 4 %
- Magnétisme faible (E-1.0)*1.0%/MeV
- Distance evt/evt $\delta L = 32$ cm
- Calibration énergie sources 2.0 %
- Monitoring 1%

Analyse de forme + norme



Erreurs systématiques normalisation 3.5%

- N_p 0.5%
- Spill in Spill out 1%
- Efficacité de détection 2%
- Puissance thermique 2.0 %
- Spectre de fission 1.8 %

- Aout 2013- mi juin 2014 : Grand arrêt réacteur de 10 mois
 - Remplacement bouchon-collimateur
 - Couverture B4C des casemates PN3 et IN20
 - Montage des murs de plomb supplémentaires
- juin 2014 : 1 cycle court réacteur ON de 1 mois
 - test de bruit de fond de la casemate aménagée
- 3 cycles jusqu'à fin 2014
 - Installation de STEREO : blindages et détecteur
 - Tests de bruit de fond à chaque étape
- 2 cycles en 2015 pour comissionning
- 6 cycles d'avril 2105 à fin 2016 : Prise de données effectives
- Début 2017 : changement du tube H6-H7

Répartition des tâches

Partenaires (nb Phys. permanents)	Tâches
CEA/Irfu (7)	Coordination du projet Conception et réalisation du détecteur interne Calcul du spectre neutrino
IN2P3/LPSC (4)	Veto muon Electronique, acquisition de données et contrôle lent Fabrication et montage du blindage Coordination de la simulation
IN2P3/LAPP (2)	Dispositif de calibration Conception du blindage Fabrication de la structure du blindage
MPIK-Heidelberg (2)	Scintillateur liquide, système de remplissage, PMTs
ILL (4)	Conception et réalisation du bouchon Etudes de sécurité Aménagement de l'aire expérimentale, installation sur site
Casablanca Univ. (2)	Système d'injection de lumière

Demande ANR 2013

- Investissement + Missions
- 2 Postdocs (LAPP et IRFU)

→ Financement à 85 % par l'ANR

Recommandation d'un seul postdoc et réduction du budget blindage

→ Complément demandé à l'IN2P3 et à l'Irfu

Présentation du projet au CS de l'IN2P3 en juin 2013

Demande d'un Postdoc pour le LPSC au Labex ENIGMASS

- Implication dans les tâches dont le LPSC a la responsabilité :
 - Conception, réalisation et test du détecteur veto muon
 - Simulation des performances du détecteur et préparation des programmes d'analyse de données
 - Test de l'électronique et participation au soft d'acquisition de données
- Installation à l'ILL et analyse des données
 - Rôle majeur du fait de la proximité du LPSC et du site de l'ILL
- Collaboration régulière avec le LAPP et interaction à plus long terme avec le LAPTH pour l'implication théorique des résultats
- Essentiel pour l'expérience
- Contribution visible

- STEREO propose une mesure de précision à moins de 10 m du cœur compact du réacteur de recherche de l'ILL de Grenoble.
- La recherche d'une distorsion du spectre en énergie le long de l'axe du détecteur offre une signature claire d'une possible nouvelle oscillation, indépendante des paramètres du réacteur.
- Le calendrier d'installation proposé et la sensibilité de la mesure offrent un potentiel de découverte élevé.
- Le projet STEREO fait partie des activités du pôle neutrino d'ENIGMASS et la demande de postdoc est faite en synergie avec la demande ANR (LAPP/LPSC/IRFU)
- Un postdoc ENIGMASS est essentiel pour mener à bien ce projet expérimental dans le calendrier proposé, il offre aussi une très grande visibilité au candidat.