Recherche du neutrino stérile avec l'expérience Stereo : influence de la non-linéarité de la réponse du détecteur sur la sensibilité

Thomas Salagnac

Laboratoire de Physique Subatomique et Cosmologie

July 2015

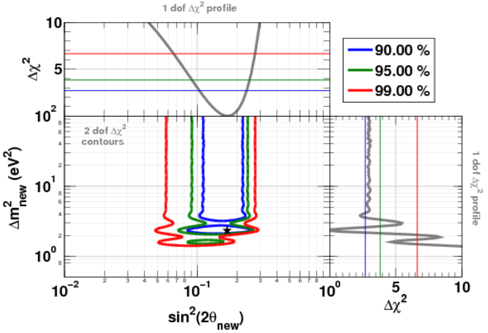
Sommaire

Anomalie ν à courte distance

- Expériences réacteurs, à courte distance (10-500 m) $\Rightarrow \sim 7\%$ déficit de $\overline{\nu_e}$
- Expériences solaires Gallium, étalonnées avec des sources radioactives, SAGE & GALLEX $\Rightarrow \sim 16\%$ déficit de ν_e

Hypothèse : disparition de $\nu_e / \overline{\nu_e}$ vers un **neutrino stérile**

$$P_{e\to e} = 1 - P_{e\to st} = 1 - \mathbf{\sin^2(2\theta_{st})}\sin^2\left(1,27 \cdot \frac{\mathbf{\Delta m^2_{st}}[eV^2]\cdot L[m]}{E_{\bar{\nu}_e}[MeV]}\right)$$



Limites sur les paramètres d'oscillation :

$|\Delta m^2_{st}| > 1.5$ eV^2 (99% C.L)

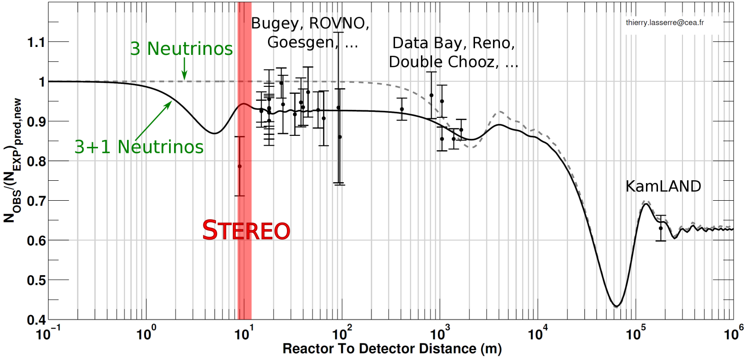
$\sin^2(2\theta_{st}) = 0.17 \pm 0.04\ (1\sigma)$

Hypothèse sans oscillation **défavorisée** à $\mathbf{3.6\sigma}$

Réf. : Abazajian, K. N. et al. Light Sterile Neutrinos: A White Paper. (2012)

Motivations de l'expérience Stereo

But de l'expérience Stereo : Vérification de l'existence d'une nouvelle oscillation de ν à coute distance des réacteurs (~ 10 m)



Méthode : Observation de la déformation du spectre en énergie [1.8 - 10 MeV] en fonction de la distance au réacteur

$\Rightarrow$ permet de s'affranchir de la norme du flux de $\overline{\nu_e}$ qui est entachée de fortes incertitudes

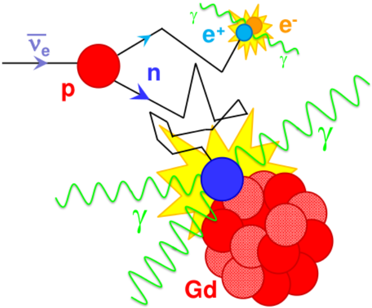
Principe de détection de Stereo

Inverse Beta Decay (IBD) : $\overline{\nu_e} + p \longrightarrow e^+ + n$

Volume cible : Liquide Scintillant (LS) + Gadolinium (Gd)

Signal "Prompt" :

- Thermalisation de e^+
  $\rightarrow$ scintillation
- Annihilation $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$ (511 keV)
  $\rightarrow$ scintillation



Signal "Retardé" ($\tau \sim$ qqs μs) :

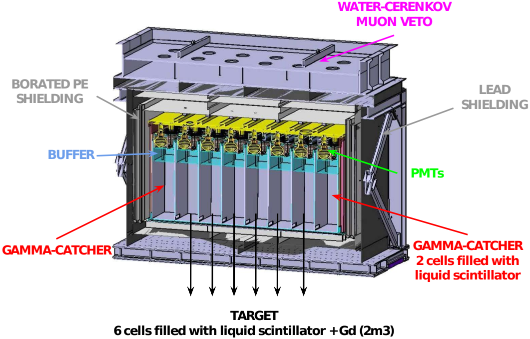
- Thermalisation du n
- Capture du n par un noyau de Gd
  $\rightarrow$ émission de γ
  $\rightarrow$ scintillation

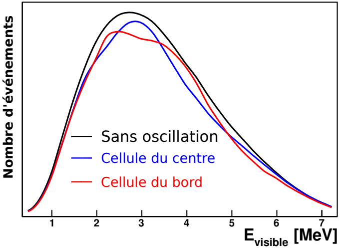
Photons de scintillation = UV/visible $\rightarrow N_{photons} = f(E_{déposée})$

Coïncidence temporelle $\Rightarrow$ Signature du $\overline{\nu_e}$: Séparation du bruit de fond

Le détecteur Stereo

Volume cible (LS + Gd) : 6 cellules identiques pour mesurer la déformation du spectre en énergie en fonction de la distance
Gamma-catcher (LS) : couronne entourant le volume cible pour récupérer les γ qui s'échappent

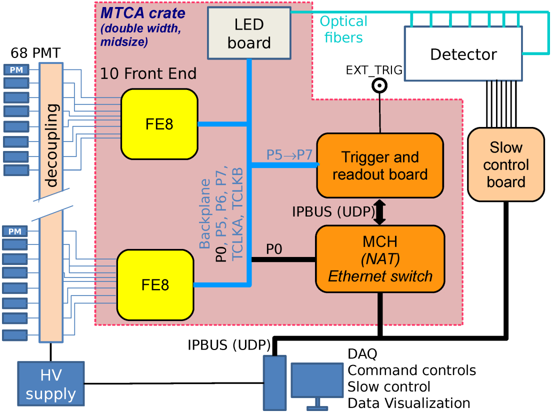




68 Photomultiplicateurs (PMTs) :

- 24 $\rightarrow$ 6 $\times$ 4 PMTs par cellules
- 24 PMTs pour le Gamma-Catcher
- 20 PMTs pour le Veto-μ

Électronique de Stereo

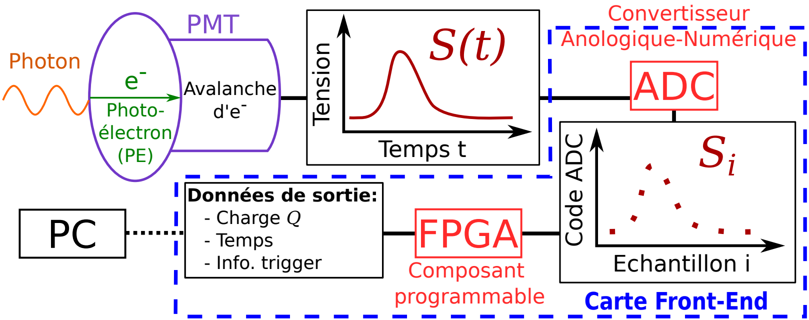


Caractéristiques :

- Échantillonnage à 250 MHz (4 ns)
- Acquisition jusqu'à 1 kHz sans temps mort
- 2 niveaux de trigger :
  1 - par carte FE (sur 8 voies)
  2 - carte trigger : sur l'ensemble des 68 voies

Réf. : Bourrion et al. Trigger and readout electronics for the STEREO experiment. arXiv:1510.08238 (2015)

Détection des photons de scintillation



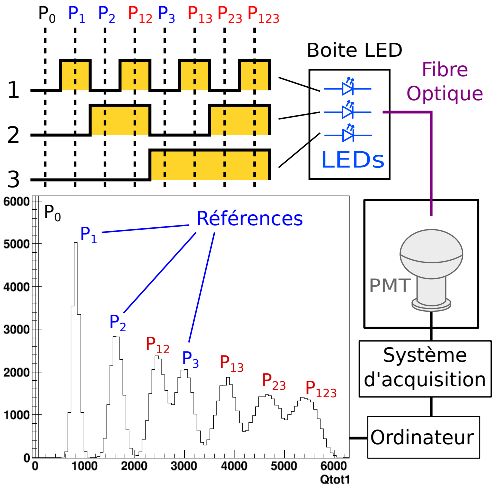
Charge : $Q = \sum_i S_i$ en somme de codes ADC

De la charge à l'énergie : $\sum_{PMT} Q \Rightarrow N_{PE} \Rightarrow N_{photons} \Rightarrow E_{déposée}$

Dynamique : de 1 PE à 1500 PEs $\leftarrow$ Positon e^+ à 10 MeV en face d'un PMT

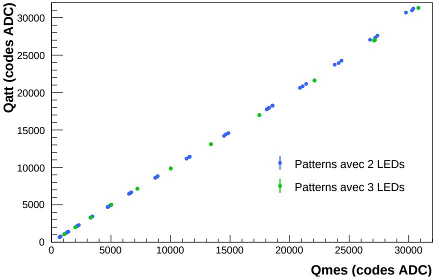
Mesure de la linéarité avec des LEDs

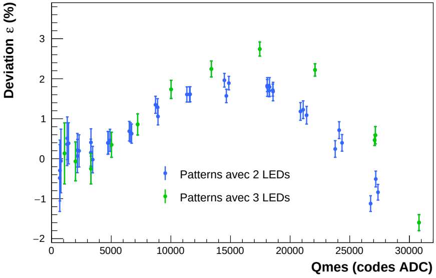
- Charge attendue pour N_{PE} photoélectrons : $Q_{att} = N_{PE}.Q_{PE}$
- Charge mesurée : $Q_{mes} = Q_{att}.(1+ \varepsilon)$ avec ε = déviation de la linéarité attendue
- Utilisation des combinaisons de 3 LEDs (ON/OFF)
- Évaluation des Q_{att} des patterns à plusieurs LEDs à partir des Q_{mes} des patterns de référence



Exemple avec les patterns à 2 LEDs : $Q_{att}\,(P_{ij}) \;=\; Q_{mes}(P_i) + Q_{mes}(P_j)$

Résultats





Problème : Références affectées par une non-linéarité

Solution : Méthode itérative

Méthode itérative

Hypothèse : pas de déviation à faibles charges

Étapes :

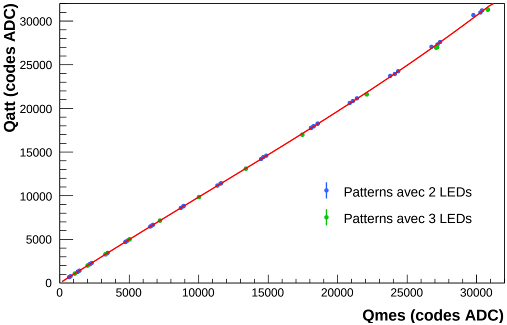
1 - Calculer les charges attendues comme avant

2 - Ajuster les Q_{att} :
$$Q_{att} = \frac{Q_{mes}}{1+\varepsilon}$$

3 - Corriger les références avec l'ajustement

4 - Re-calculer des charges attendues

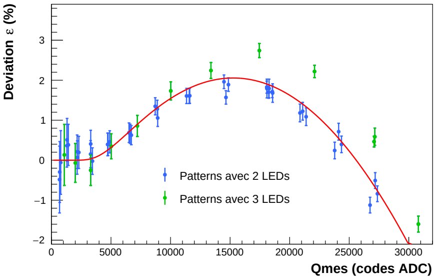
5 - Répéter à partir de l'étape 2 jusqu'à convergence



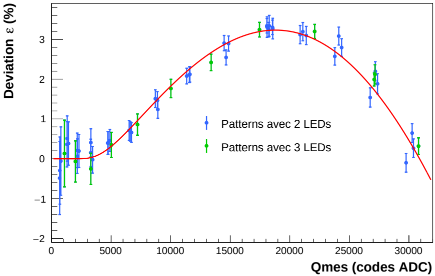
Modèle d'ajustement :
$$\varepsilon = (\alpha.Q_{mes} + \beta.Q_{mes}^2 + \gamma.Q_{mes}^3 + \delta.Q_{mes}^4).e^{-Q_{cut}/Q_{mes}^2}$$
où α, β, γ, δ et Q_{cut} : paramètres libres

Résultats

1ère **Itération : (pas de correction)**



10ème **Itération :**



$\Rightarrow$ Cohérence entre les mesures

$\Rightarrow$ Non-linéarité jusqu'à 3% dans notre dynamique

Possibilité de corriger la linéarité !

avec non-linéarité "résiduelle" $< 1\%$

Évaluation de la sensibilité

Sensibilité : Capacité de faire la différence entre les spectres en énergie $O_{l,i}$ dans le cas d'une oscillation et les spectre $N_{l,i}$ dans le cas sans oscillation

$$\chi^2_{spectre} = \sum_{l}^{nCells} \sum_{i}^{nEbins} \left(\frac{O_{l,i}\left(\Delta m^2_{st}, \sin^2(2\theta_{st})\right) - N_{l,i}}{\sigma_{l,i}} \right)^2$$

Notation : i = i$^{\text{ème}}$ bin en énergie et l = l$^{\text{ème}}$ cellule

Spectres $O_{l,i}$ et $N_{l,i}$ simulés en prenant en compte :

- Les géométries du détecteur et du réacteur
- Le nombre de neutrinos attendus : 400 ν.j^{-1} pendant $\sim$ 300 jours
- Un rapport signal sur bruit : $\frac{S}{B} \simeq 1,5$

Réf : Huber et al Reactor neutrino experiments compared to superbeams. Nucl.Phys. B665, 487–519 (2003)

Prise en compte des incertitudes

Incertitudes : paramètres libres $\vec{\alpha}$ mais contraints lors de la minimisation

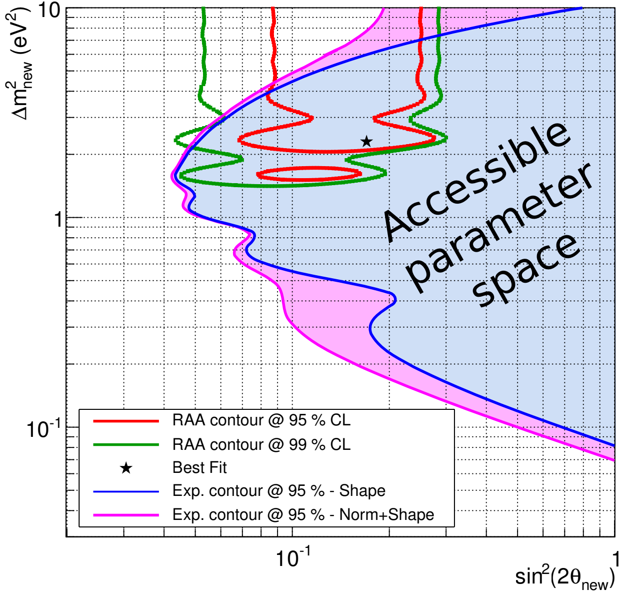
$$\Rightarrow N_{l,i} = \left(1 + \alpha^{norm(cor)} + \alpha_l^{norm(uncor)} + \alpha^{WM}.(E_i - 1) + \alpha_i^{spec}\right).T_{l,i} + \Delta T_{l,i}^{\alpha^{calib}}$$

avec $T_{l,i}$ les spectres sans oscillation et sans incertitude

$$\chi^2 = \chi^2_{spectre} + \left(\frac{\alpha^{WM}}{\sigma^{WM}}\right)^2 + \left(\frac{\alpha^{norm(cor)}}{\sigma^{norm(cor)}}\right)^2 + \sum_l^{nCells}\left(\frac{\alpha_l^{norm(uncor)}}{\sigma^{norm(uncor)}}\right)^2 + \sum_l^{nCells}\left(\frac{\alpha_l^{calib}}{\sigma^{calib}}\right)^2 + \sum_i^{nEbins}\left(\frac{\alpha_i^{spec}}{\sigma_i^{spec}}\right)^2$$

Paramètre α	**Description**	**Écart-type** σ
α^{WM}	incertitude due au magnétisme faible	$\sigma^{WM} = 0,65\%$
$\alpha^{norm(cor)}$	erreur corrélée sur la norme	$\sigma^{norm(cor)} = 3,7\%$
$\alpha_l^{norm(uncor)}$	erreurs non corrélées sur la norme par cellule	$\sigma^{norm(uncor)} = 1,7\%$
α_l^{calib}	erreurs sur l'étalonnage en énergie par cellule	$\sigma^{calib} = 2\%$
α_i^{spec}	erreurs sur le spectre par bin en énergie	$\sigma_i^{spec} = 0,7\% - 4\%$

Contours de sensibilité



Implémentation d'une non-linéarité

Hypothèse d'une non-linéarité $\beta^{nl} = \dfrac{Q_{mes} - Q_{att}}{Q_{att}} < 1\%$

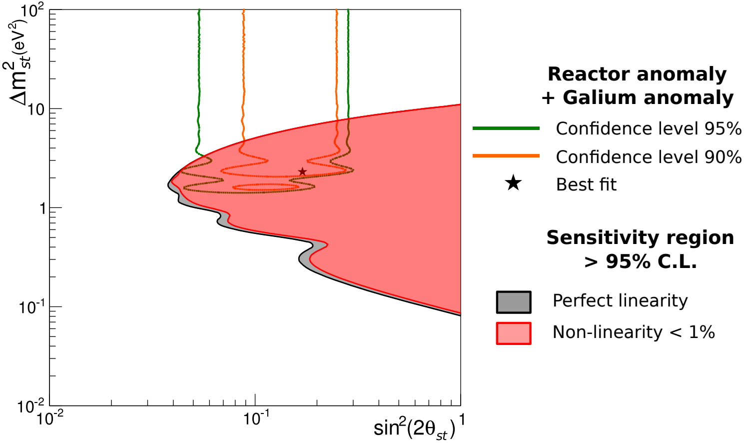
- Modèle de non-linéarité : $\beta^{nl}(E_{att}) = \alpha^a.E_{att}^2 + \alpha^b.E_{att} + \alpha^c$
  Trois termes de nuisance : α^a, α^b et α^c
- Sans non-linéarité : $E_{mes} = \left(1 + \alpha^{calib}\right).E_{att}$
  $\Rightarrow$ Avec non-linéarité : $E_{mes} = \left(1 + \alpha^{calib}\right)\left(1 + \beta^{nl}\right).E_{att} = (1 + \varepsilon).E_{att}$
- Terme principal : variation du nombre d'événements

$$\Delta T_{l,i}^{\varepsilon} = \frac{\varepsilon(E_i^-).E_i^-.(T_{l,i-1} + T_{l,i}) - \varepsilon(E_i^+).E_i^+.(T_{l,i+1} + T_{l,i})}{2(E_i^+ - E_i^-)}$$

- Termes de contraintes : contraintes sur β^{nl}

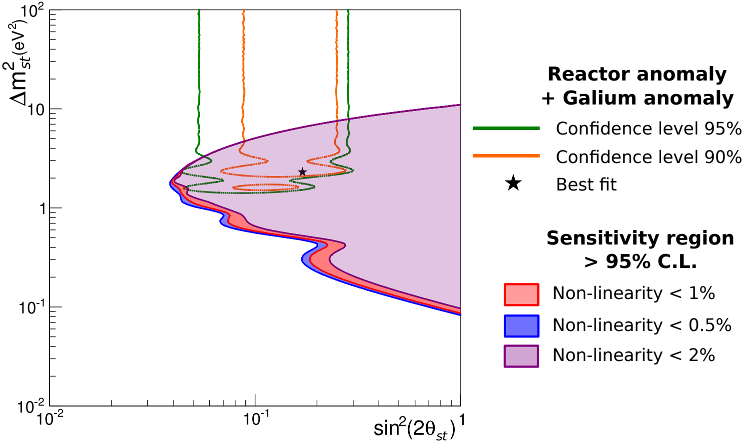
$$\chi^2 = \ldots + \left(\frac{\beta^{nl}(2\ \text{MeV})}{\sigma^{nl}}\right)^2 + \left(\frac{\beta^{nl}(5\ \text{MeV})}{\sigma^{nl}}\right)^2 + \left(\frac{\beta^{nl}(7\ \text{MeV})}{\sigma^{nl}}\right)^2$$

Effet d'une non-linéarité de 1%



- Faible diminution mais seulement à faible Δm^2 : incertitude de 1% sur la linéarité acceptable

Comparaison avec des non-linéarités de 0,5% et 2%



- Faible gain pour 0,5% de NL
  $\Rightarrow$ peu d'intérêt à gagner un facteur 2 sur la precision de la linéarité

- Diminution seulement à faible Δm^2 pour 2% de NL
  $\Rightarrow$ Marge disponible sur l'incertitude

Conclusion

- Mise en place d'une méthode pour mesurer la linéarité en charge de l'électronique

  $\Rightarrow$ **Non-linéarité résiduelle $<$ 1%**

- Étude préliminaire de l'impact sur la sensibilité du détecteur

  $\Rightarrow$ **Peu d'influence sur la sensibilité**

- Status de l'électronique :
  - Design ✓
  - Fabrication ✓
  - Validation ✓

  $\Rightarrow$ **Électronique prête pour l'expérience Stereo**

- Planning :
  - Avril 2016 : Montage de détecteur
  - Juin 2016 : Début de la prise de données
  - **Début 2017 : 1er résultats**