

STEREO Experiment

Search for Sterile Neutrinos at ILL

Luis Manzanillas
Pablo del Amo Sanchez
Neutrino Group LAPP

Projet de Stage
LAPP-Annecy-le-vieux - FRANCE

31 Mai de 2013

Résumé

1 Introduction

2 Le détecteur STEREO

3 Sensibilité du détecteur

- Plots d'exclusion
- Incertitude sur la longueur
- Résolution en énergie
- Le bruit de fond
- Conclusions sur la sensibilité du détecteur

4 Etude du blindage

- Gammas
- Cross-check d'atténuation des photons dans Geant4
- Trigger Rate
- Source de Neutrons
- Conclusions sur le blindage

Introduction

L'expérience STEREO a pour objectif confirmer l'existence d'un état de neutrino stérile recherchant un nouveau patron d'oscillation à courte distance.

Dans ce contexte, on explore la sensibilité du détecteur et la réponse du blindage au bruit de fond.

Introduction: Oscillation du neutrino

Neutrinos oscillent pendant leur propagation. Les états de saveur sont une combinaison linéaire des états propres de masse.

Pour le cas de deux neutrinos on a:

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_{k=1,2} U_{\alpha k} |\nu_k\rangle \quad (1)$$

La probabilité d'oscillation d'un état de saveur e à un état μ est donné par

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \sin^2(2\theta) \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 L}{4E_\nu} \right) \quad (2)$$

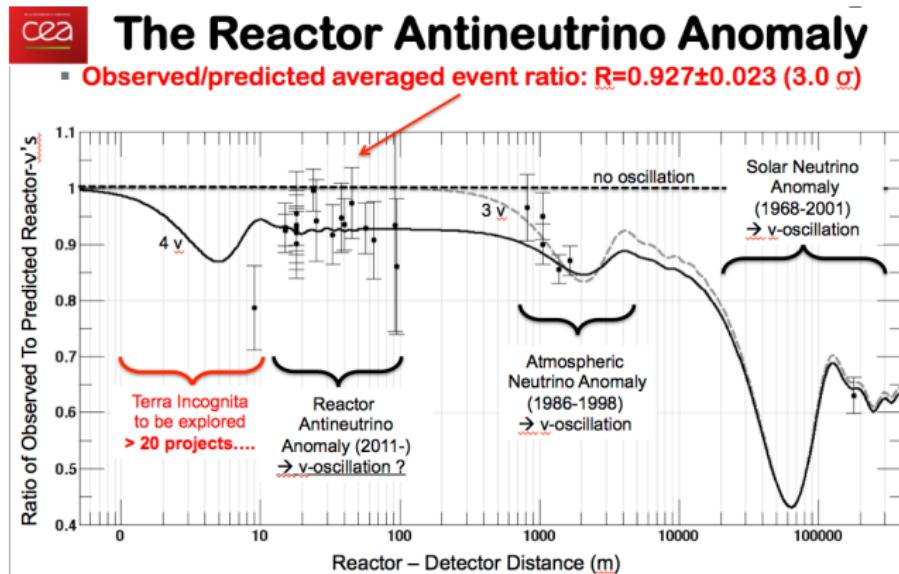
Et si on mesure L en Km , et E en GeV on a:

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \sin^2(2\theta) \sin^2 \left(1,27 \frac{\Delta m^2 L}{E_\nu} \right) \quad (3)$$

Introduction

Pourquoi cet intérêt de rechercher un nouvel état de neutrino?

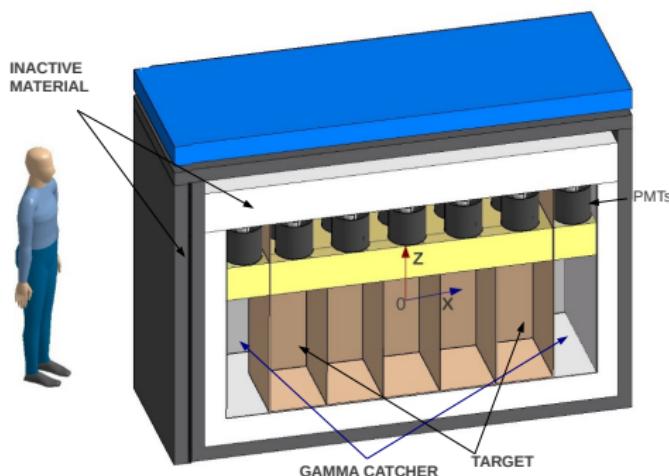
Introduction: L'anomalie du réacteur



Une interprétation de ce déficit est l'existence d'un nouvel état de neutrino. Le meilleur fit donne $\Delta m_{new}^2 = 2,3 \pm 0,1 \text{ eV}^2$ et $\sin^2(2\theta_{new}) = 0,17 \pm 0,04$

Le Détecteur STEREO

STEREO



caractéristiques

Cinq cells avec liquide scintillateur.

La taille de chaque cell est de 90 cm de haut par 1,1 m de largeur et 40 cm de large.

200000 événements attendus pendant la période d'acquisition des données, cad 40000 par cell.

Le point central du détecteur situé à environ 8 mètres du centre du réacteur.

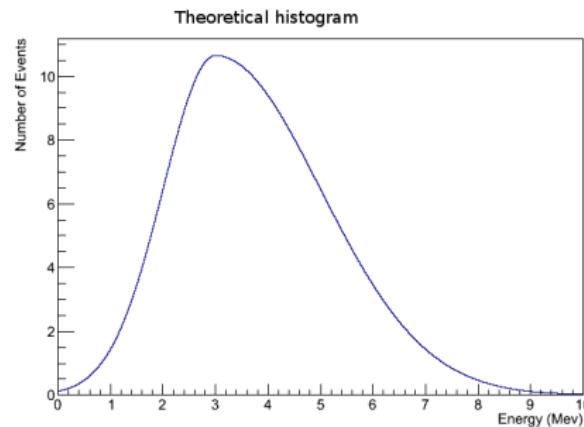
Sensibilité du détecteur

Est STEREO sensible à la zone d'intérêt?

$$(\Delta m_{new}^2 = 2,3eV^2 \text{ et } \sin^2(2\theta_{new}) = 0,17)$$

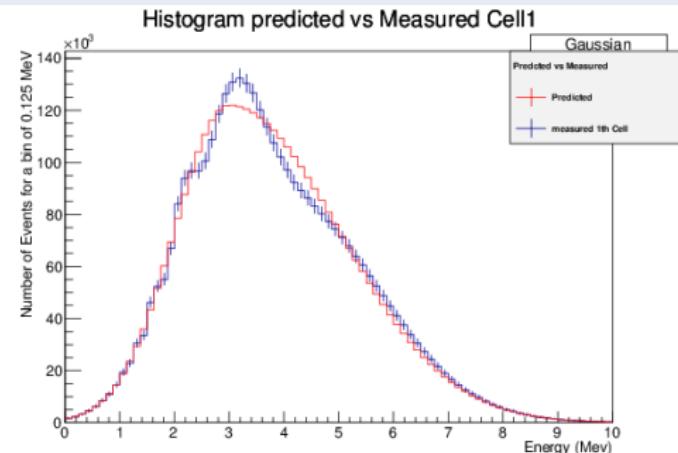
Spectres théoriques (1 cellule)

Spectre attendu sans oscillation



Spectre théorique attendu sans oscillation. STEREO recherche la déformation de cet spectre

Spectre attendu avec oscillation



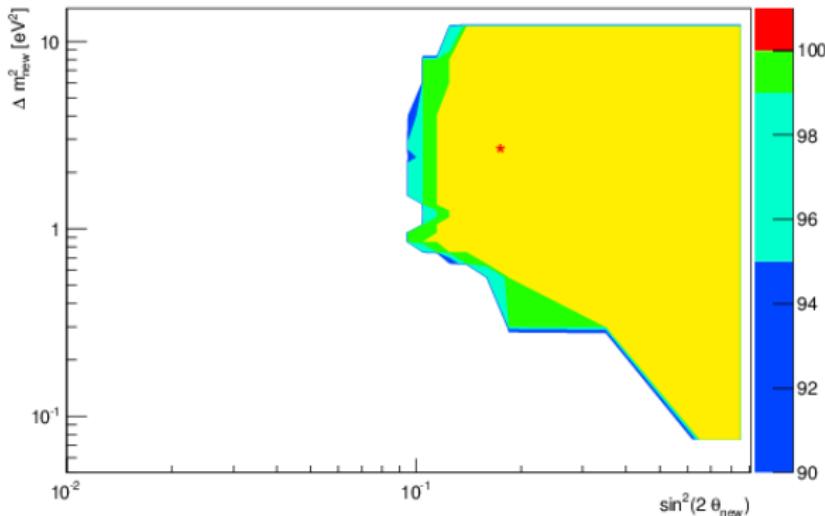
Histogramme prenant en compte les effets de l'oscillation et spectre théorique normalisé au le nombre d'événements avec oscillation

Construction de χ^2

- On a calculée le χ^2 de la différence entre le spectre sans oscillation normalisé au nombre d'événements observé dans chaque cell et le spectre avec des effets d'oscillation.
- On a consideré l'intervalle d'énergie entre 2.8-7 MeV, avec une bin de largeur de 0,125 MeV (33 bins). C'est à dire on aura 33-1 degrés de liberté (-1 par la normalisation).
- Pour les 5 cells on aura un total de 132 dof
- Pour 132 dof on a un niveau de confiance de $2\sigma = 95\%$ pour $\chi^2 = 190,5$ et de $5\sigma = 99,9999\%$ pour $\chi^2 = 248$.
- Pour éliminer les effets des fluctuations statistiques, nous avons augmenté le nombre d'événements simulés par 100, tout en gardant la relation dans l'erreur relative avec le nombre totale d'événements attendus par cell(40000).

Plot d'exclusion pour un expérience idéale

Histograma Chi2 160 dof



Exclusion à 5σ (jaune) de que le spectre observé soit le spectre avant oscillation

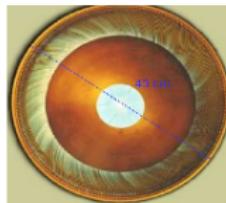
Incertitude sur la longueur

Considerations

On aura deux sources
d'incertitude en la longueur:

- position d'origin (40 cm)
- position de détection (40 cm)

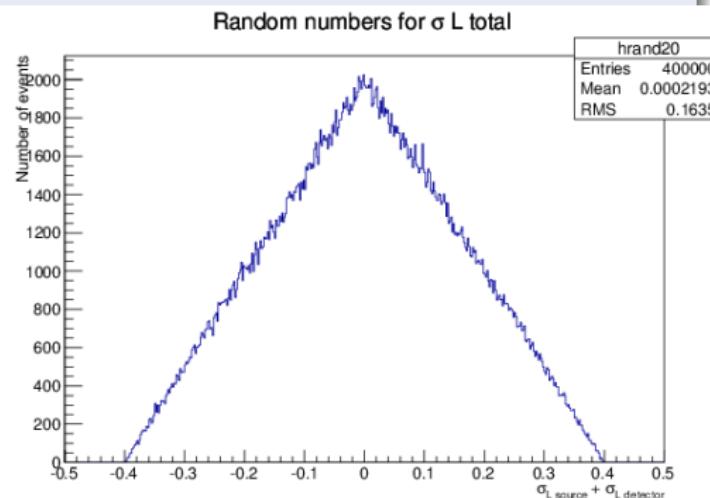
Nuclear core



Cell Width

40 cm

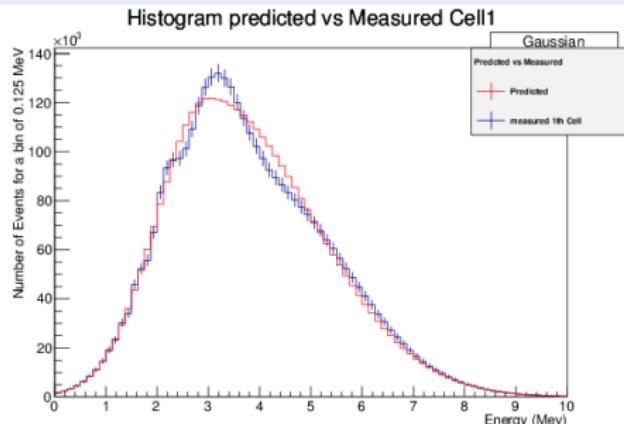
Incertitude sur la longueur



Histogramme avec δL

Incertitude sur la longueur

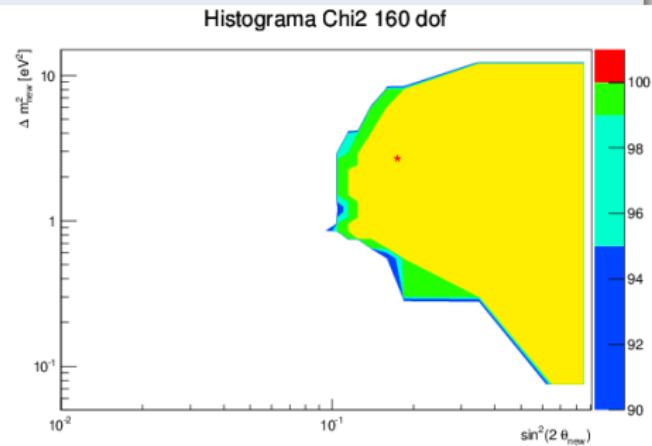
Spectre attendu sans oscillation et avec oscillation



$$P_{ee} = 1 - \sin^2(2\theta_{new}) \sin^2 \left(1,27 \frac{\Delta m_{new}^2 L}{E_{\bar{\nu}_e}} \right)$$

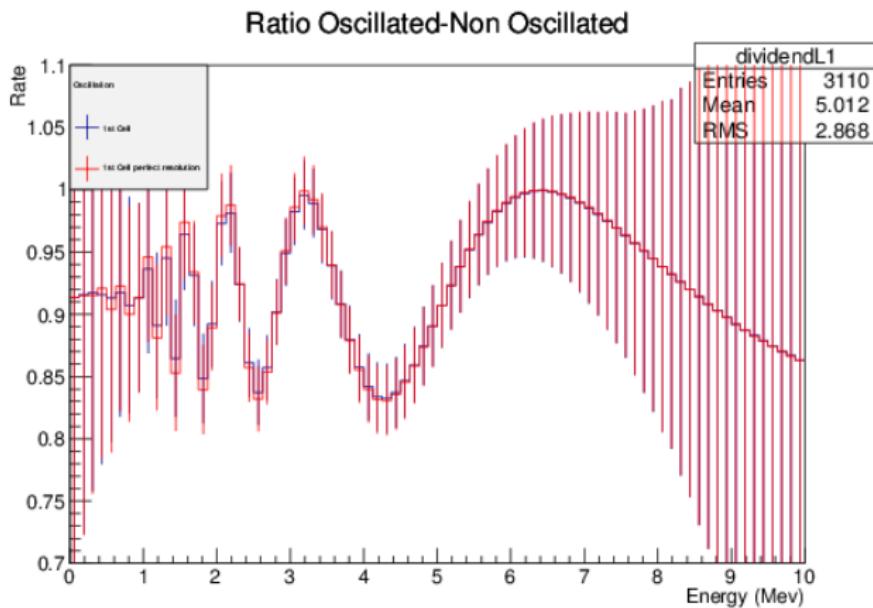
$$P_{ee} = 1 - \sin^2(2\theta_n) \sin^2 \left(1,27 \frac{\Delta m_n^2 (L + \delta L)}{E_{\bar{\nu}_e}} \right)$$

Exclusion avec δL



Exclusion avec 5σ (jaune) de que que le spectre soit différent à un sans oscillation

Rapport entre les spectres oscillés et sans oscillation



Effets de l'incertitude en L sur le rapport entre les spectres oscillés et sans oscillation

Résolution en énergie

Considerations

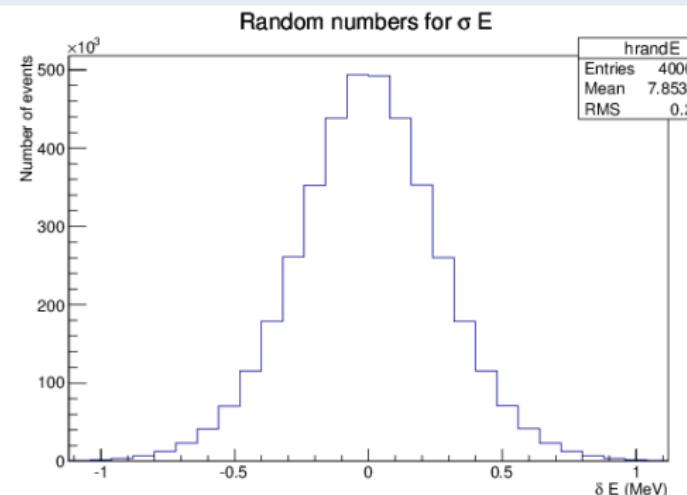
Nous avons considéré une résolution en énergie comme suit:

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{0,14}{\sqrt{E}} \quad (4)$$

$$P_{ee} = 1 - \sin^2(2\theta_{new}) \sin^2 \left(1,27 \frac{\Delta m_{new}^2 L}{E_{\bar{\nu}_e}} \right)$$

$$P_{ee} = 1 - \sin^2(2\theta_n) \sin^2 \left(1,27 \frac{\Delta m_n^2 (L + \delta L)}{E_{\bar{\nu}_e} + \delta E} \right)$$

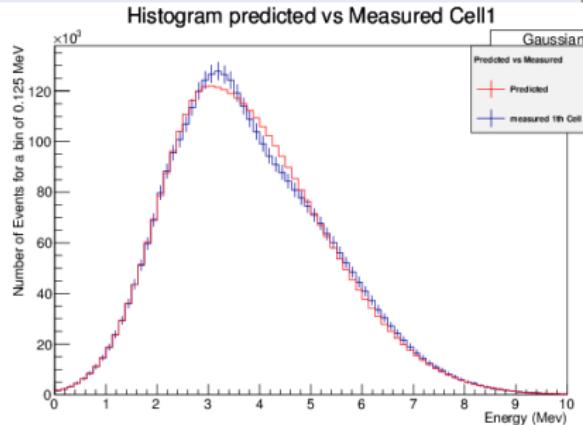
Résolution en l'énergie mesurée



Histogramme avec δE

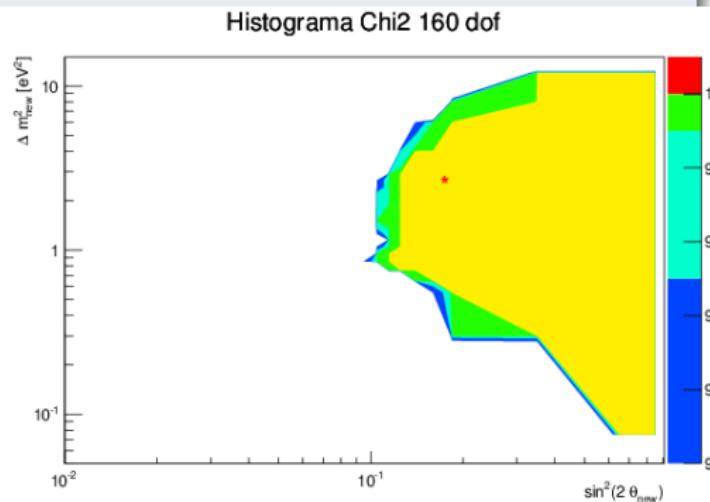
Résolution en énergie

Spectre attendu sans oscillation et avec oscillation



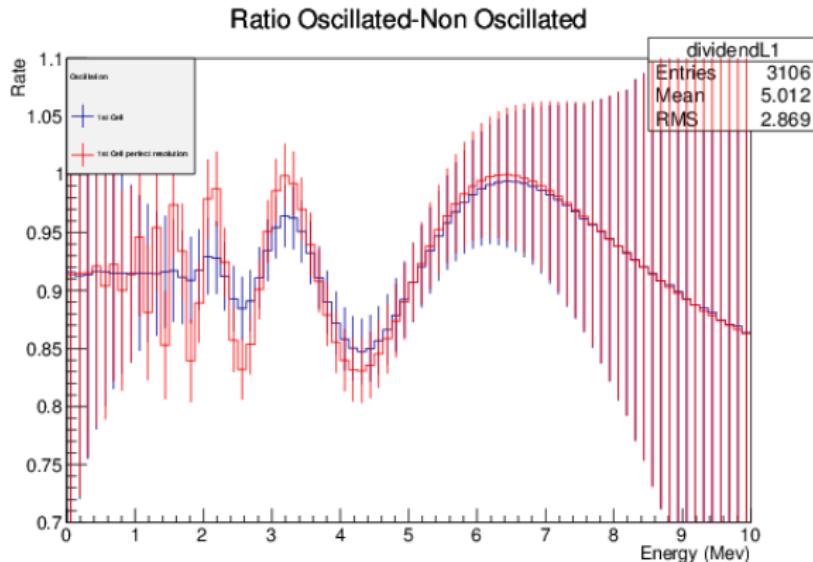
Spectre attendu sans oscillation et avec oscillation et des effets de résolution en la position et l'énergie

Exclusion avec δL et δE



Exclusion avec 5σ (jaune) de que que le spectre soit différent à un sans oscillation

Rapport entre les spectres oscillés et sans oscillation cell1



Effets de l'incertitude en L et E sur le rapport entre les spectres oscillés et sans oscillation cell1

Le bruit de fond

On a supposé que le nombre total d'événements a une contribution constante de bruit de fond dans l'intervalle considéré (2-7 MeV) donnée par

$$N_B = \frac{B}{S} N_s \quad (5)$$

avec $\frac{S}{B} = 1,5$. Donc, on aura un effet traduit par une hausse de l'erreur dans le nombre d'événements enregistrés par chaque bin.

$$\sigma_{Ns} = \sqrt{\sigma_{Ntot}^2 + \sigma_{NB}^2} \quad (6)$$

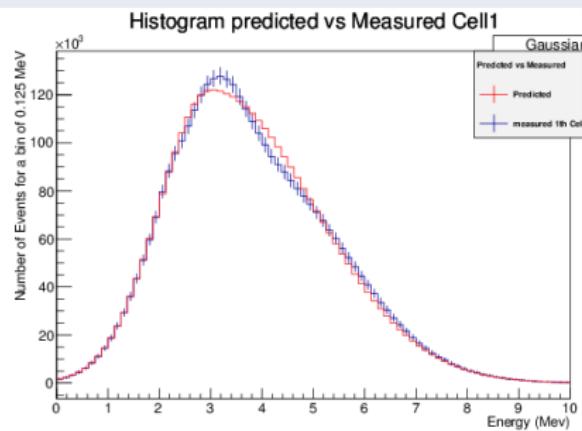
ce qui donne:

$$\sigma_{Ns} = \sqrt{Ns + 2N_B(cte)} \quad (7)$$

avec $N_B = 333,3$ pour un bin de 0.125 MeV

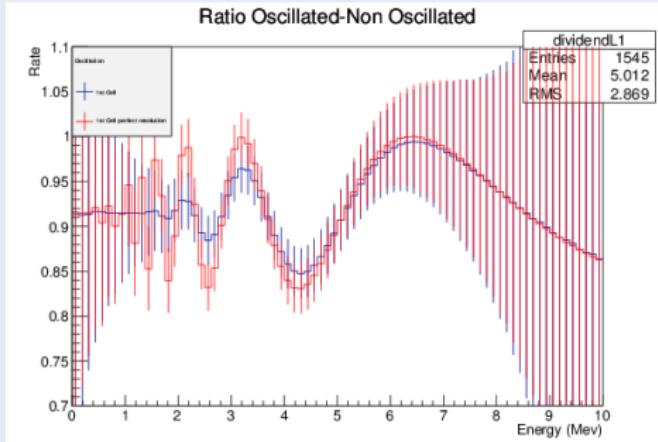
Le bruit de fond

Spectre attendu sans oscillation et avec oscillation



Histogramme prenant en compte les effets de l'oscillation et des effets de résolution en la position, l'énergie et le bruit de fond

Rapport entre les spectres oscillés et sans oscillation

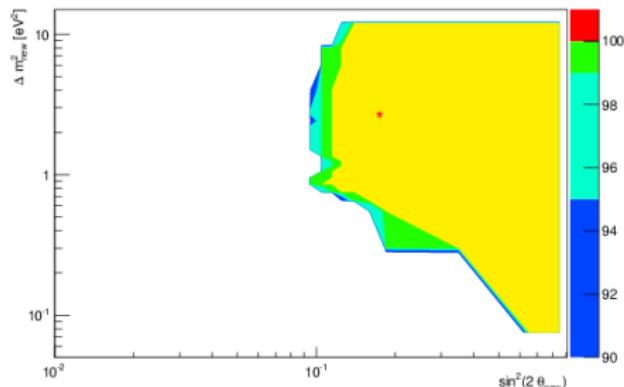


Effets de l'incertitude en L et E et le bruit de fond sur le rapport entre les spectres oscillés et sans oscillation

Plots d'exclusion

Plots d'exclusion pour un expérience idéale

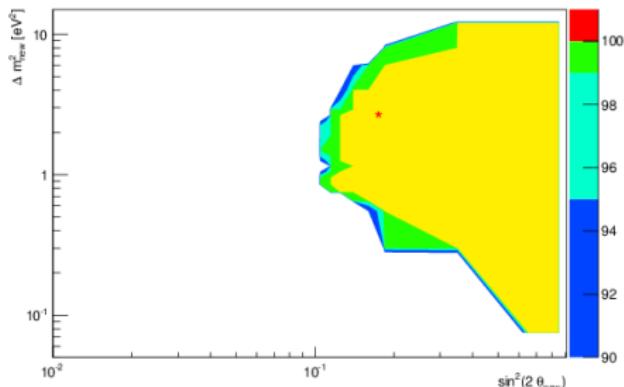
Histogramma Chi2 160 dof



Exclusion avec un niveau de confiance de 5σ (jaune)

Exclusion avec incertitude en L , E et le bruit de fond

Histogramma Chi2 160 dof



Exclusion avec un niveau de confiance de 5σ (jaune).

Conclusions sur la sensibilité du détecteur

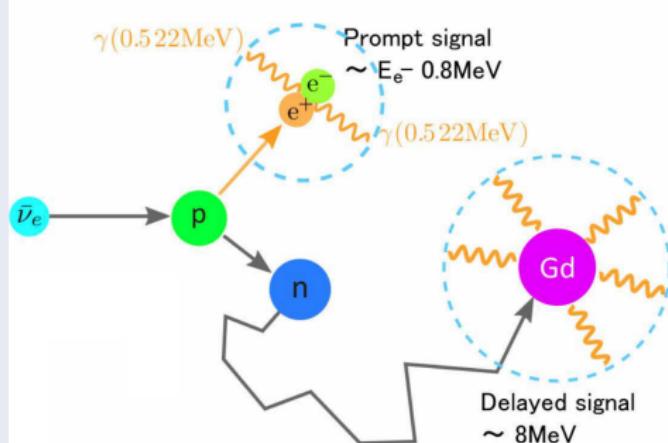
- STEREO est sensible à la zone d'intérêt
- Grâce à la petite taille du réacteur de l'ILL est possible d'explorer oscillations à très courte distance
- Les effets sur la résolution en énergie ont un impact plus importants pour l'exclusion que les effets sur incertitud en L

Etude du blindage

Etude du bruit de fond

Sélection des candidats neutrinos

Réaction attendu



Un neutrino interagit avec un proton, ce qui donne un neutron plus un positron

Coupures d'énergie

- Prompt: Si E déposé dans le Target $\in [2-8]$ MeV
- Delayed: Si E déposé dans le Target + E déposé dans le GC $\in [5-10]$ MeV

ILL Backgrounds

Environnement radioactif élevée, qui produit des neutrons et des gammas partout

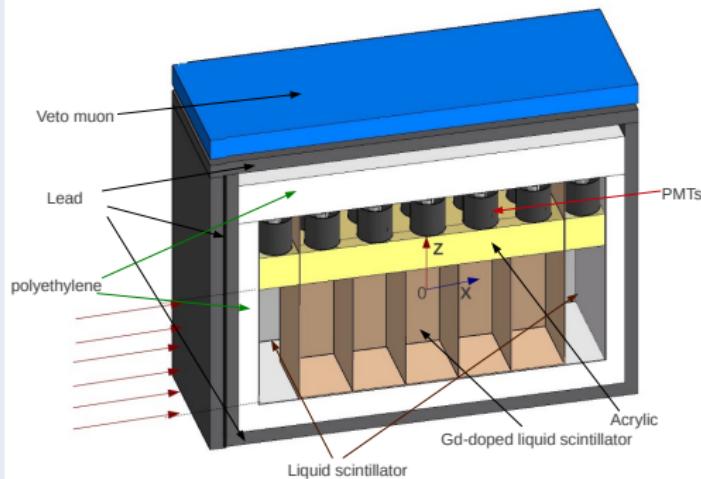
Etude du blindage

Quel type d'information nous souhaitons?

- Quelles sont les contributions des différents bruits de fond (gammas, neutrons)?
- Quelle est la réponse du blindage pour différents énergies?
- Où est déposée l'énergie des particules et dans quels matériaux (Target, GC, Buffer, Inactif)?

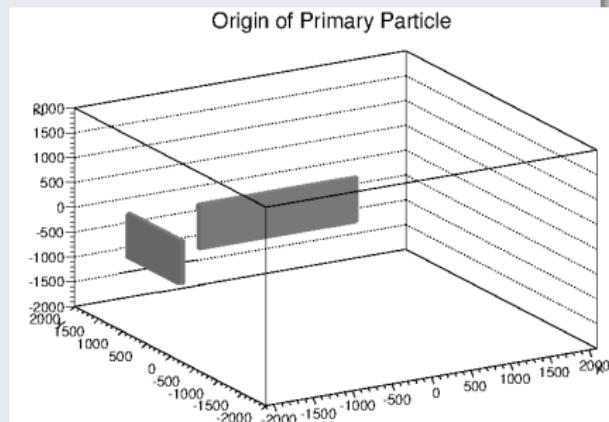
Détecteur STEREO

Géométrie du détecteur STEREO



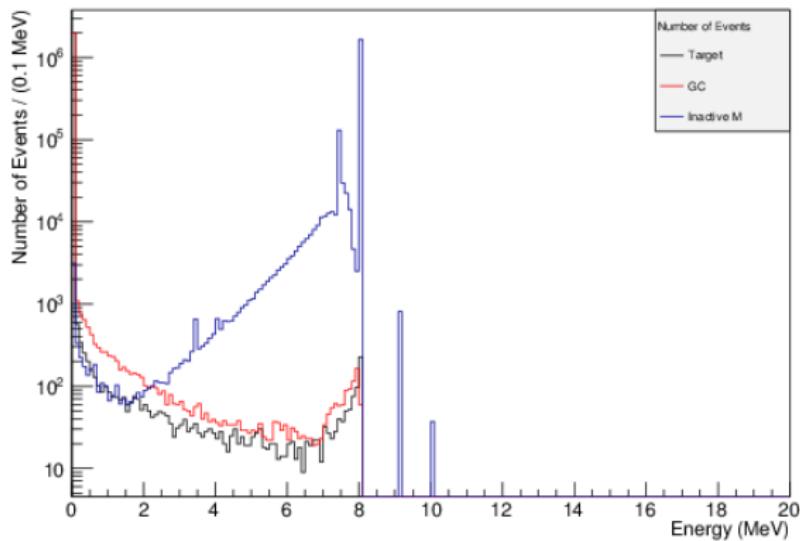
On a donné une direction perpendiculaire au détecteur

Position des Sources Gammes



On a défini une source à côté et autre en face du détecteur STEREO

Spectre d'énergie déposé pour une source lateral



Gammas de 8 MeV: La plupart de l'énergie est déposée dans le matériau inactif

Attenuation

Le nombre de particules non perturbées $N(x)$ traversant un matériau donné diminue de façon exponentielle par rapport à le nombre initial de particules $N(0)$ incidente sur le matériau:

$$N(x) = N(0)e^{-(\frac{\mu}{\rho})\rho x} \quad (8)$$

où le *coeffient d'atténuation de masse* μ/ρ est une fonction de l'énergie. On compar μ/ρ observé en utilisant la simulation STEREO Geant4 avec les valeurs données par NIST (<http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef.html>).

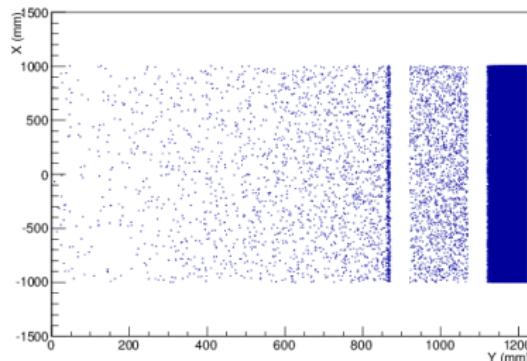
On peut soit :

- fit equation 1 à la distribution de la position de la première interaction de photons (premier électron ou positron produit)
- compter le nombre de photons $N(x)$ que interagissent après avoir parcouru une distance x , et utiliser

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{1}{\rho x} \ln \frac{N(0)}{N(x)}$$

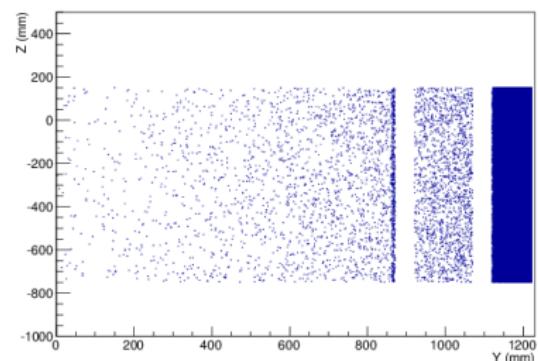
Position de la première interaction des particules incidentes (Ex: photons monochromatiques de 4 MeV)

Plane XY



La plupart des particules interagissent d'abord avec le plomb. Le blindage remplit sa fonction

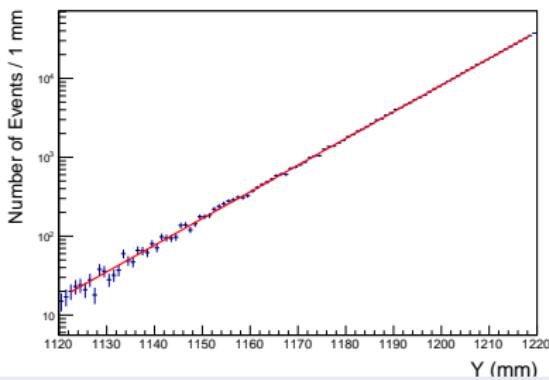
Plane ZY



On peut voir les différentes parties du détecteur. Blanks sont "mechanical margins"

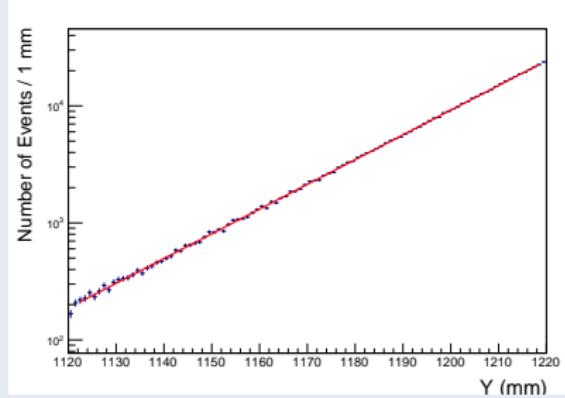
Atténuation

Position du 1er interaction des photons (1 MeV) dans le plomb



fit avec une courbe exponentielle

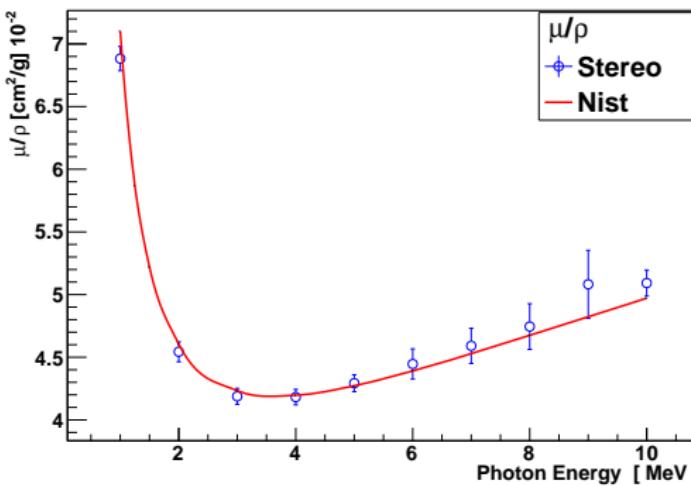
Position du 1er interaction des photons (5 MeV) dans le plomb



fit avec une courbe exponentielle

Comparaison de μ/ρ calculé avec Geant4 STEREO et le rapporté par le NIST

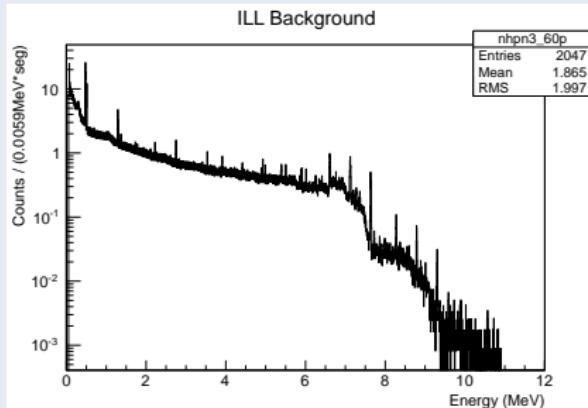
Photon Attenuation in Lead [82]



Résultats sont en bon accord avec les valeurs NIST. Les barres d'erreur bleu sont donnés par le fit, tandis que les erreurs du NIST sont d'"a few percent"

Gamma Background

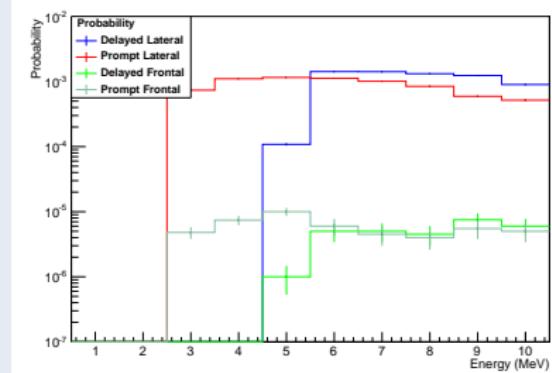
Measured Spectrum at ILL



Résultats expérimentaux de la campagne dans l'ILL

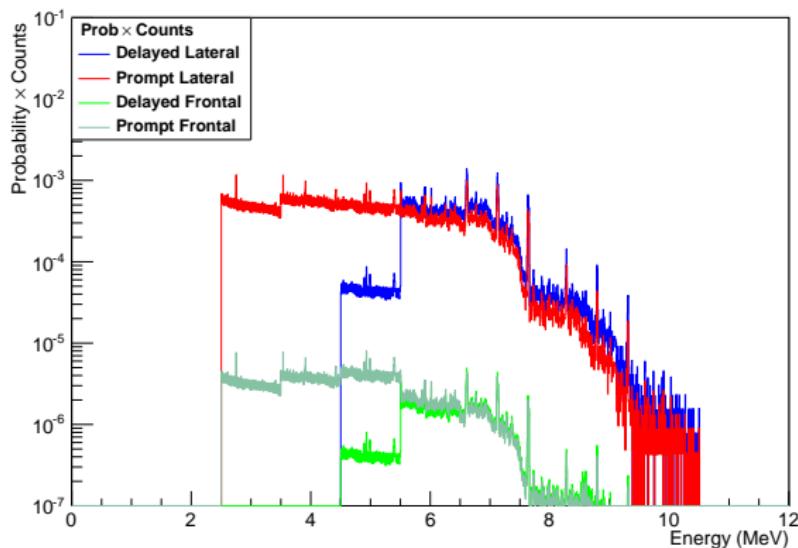
En utilisant le même ϕ_γ sur les quatre côtés verticaux de détecteur, non ϕ_γ sur ou sous le détecteur.

Probabilité de générer un événement



Résultats de la simulation avec Geant4

Gamma Background ILL \times Probabilité



contribution principale: 3-7 MeV γ

Nb: Facteur de normalisation $S_{shielding}/S_{Ge}$ non inclus

Trigger Rate

$$R_{\text{trigger}} = S_{\text{stereo}} \int \phi(E) P(E) dE \quad (10)$$

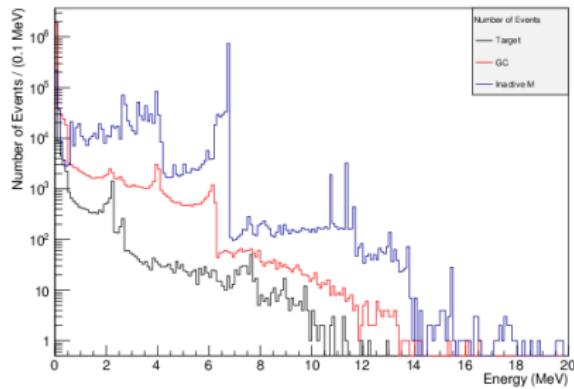
Accidentals event rate: fenêtre de $50\mu s$

| Delayed Frontal/s | Delayed Lateral/s | Total Delayed/s | Prompt Frontal/s | Prompt Lateral/s | Total Prompt/s | Accidentals/s |
|----------------------|----------------------|--------------------|---------------------|---------------------|-------------------|---------------|
| 1 | 341 | 342 | 2 | 767 | 769 | 13.2 |

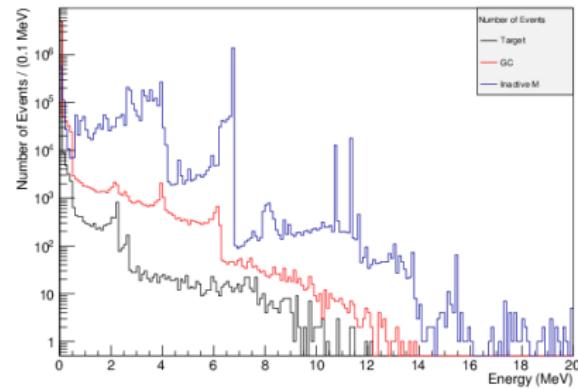
A comparer au but $\text{Delayed/s} \leq 1$ et $\text{Prompt/s} \leq 350$

Energie déposée dans le cas de une source de neutrons

Neutrons incidents d'un côté du détecteur avec une énergie de 4 MeV

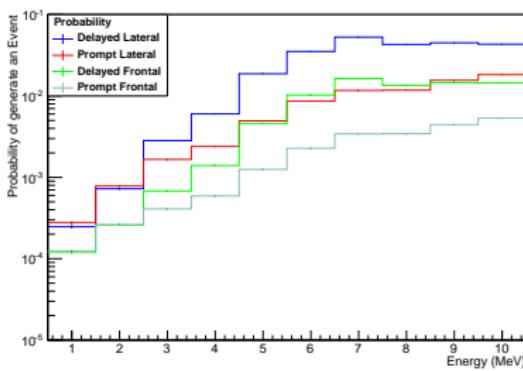


Neutrons incidents en face du détecteur avec une énergie de 4 MeV



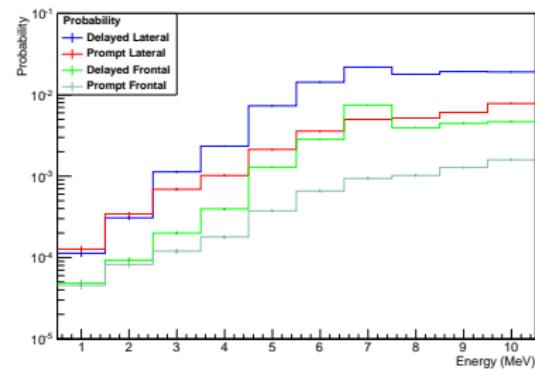
Neutron Background

Probabilité de générer un événement en prenant en compte une surface seulement le target



Résultats de la simulation avec Geant4

Probabilité de générer un événement en prenant en compte toute la surface



Résultats de la simulation avec Geant4

Conclusions sur le blindage

- Gammas: la plupart de triggers sont produits par γ 's provenant des côtés du détecteur.
- Gammas: la principale contribution au trigger sont les γ 's entre 2-7 MeV provenant des côtés du détecteur.
- Gammas: est nécessaire identifier la direction de gammas afin de renforcer le blindage où soit nécessaire

Merci de votre attention

Source Frontal pour tout la géométrie du détecteur

| E(MeV) | Total | Prompt | P/T (10^{-5}) | Delayed | D/T (10^{-4}) |
|--------|---------|--------|-------------------|---------|-------------------|
| 1 | 4981471 | 227 | $4,5 \pm 0,3$ | 241 | $0,4 \pm 0,03$ |
| 2 | 4990114 | 410 | $8,2 \pm 0,4$ | 464 | $0,9 \pm 0,04$ |
| 3 | 4992976 | 598 | $11,9 \pm 0,5$ | 998 | $1,9 \pm 0,06$ |
| 4 | 4993322 | 895 | $17,9 \pm 0,6$ | 1977 | $3,9 \pm 0,08$ |
| 5 | 4991718 | 1874 | $37,5 \pm 0,9$ | 6451 | $12,9 \pm 0,2$ |
| 6 | 1995814 | 1311 | $65,7 \pm 1,8$ | 5684 | $28,4 \pm 0,3$ |
| 7 | 1994492 | 1876 | $94,1 \pm 2,1$ | 9542 | $47,8 \pm 0,5$ |
| 8 | 1993593 | 2040 | $102,3 \pm 2,2$ | 7857 | $39,4 \pm 0,4$ |
| 9 | 1992720 | 2553 | $128,1 \pm 2,5$ | 8916 | $44,7 \pm 0,5$ |
| 10 | 1992918 | 3171 | $159,1 \pm 2,3$ | 9333 | $46,8 \pm 0,5$ |

Prompt: 2-8 MeV

Delayed: 5-10 MeV

Source Lateral pour tout la géométrie du détecteur

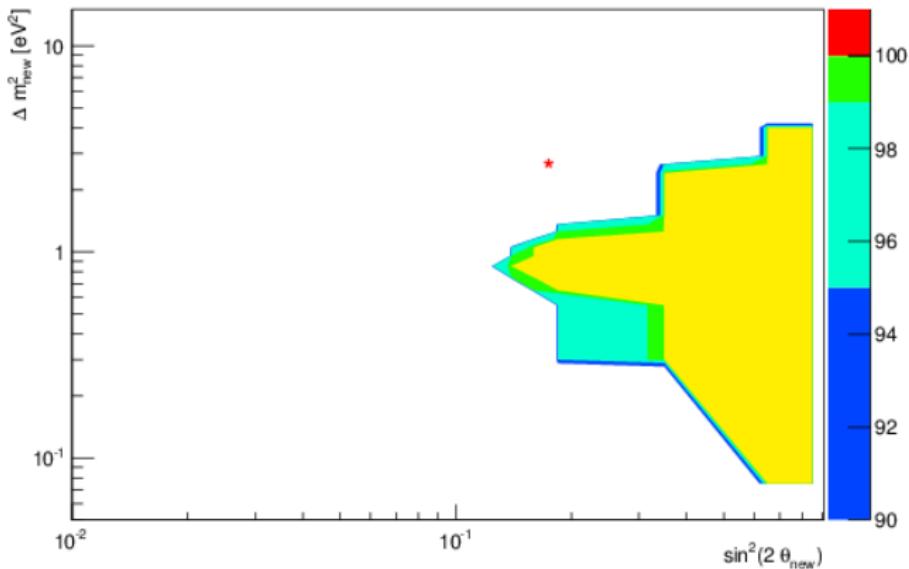
| E(MeV) | Total | Prompt | P/T (10^{-4}) | Delayed | D/T (10^{-4}) |
|---------------|--------------|---------------|-----------------------------------|----------------|-----------------------------------|
| 1 | 4991482 | 633 | $1,2 \pm 0,5$ | 565 | $1,1 \pm 0,04$ |
| 2 | 4997595 | 1721 | $3,4 \pm 0,8$ | 1543 | $3,1 \pm 0,07$ |
| 3 | 4998676 | 3450 | $6,9 \pm 1,2$ | 5662 | $11,3 \pm 0,2$ |
| 4 | 4998772 | 5117 | $10,2 \pm 1,4$ | 11679 | $23,4 \pm 0,2$ |
| 5 | 4998311 | 10642 | $21,3 \pm 1,4$ | 36596 | $73,2 \pm 0,4$ |
| 6 | 1998871 | 7156 | $35,8 \pm 2,1$ | 28567 | $142,9 \pm 0,8$ |
| 7 | 1998150 | 9950 | $49,8 \pm 4,2$ | 43734 | $218,9 \pm 1$ |
| 8 | 1997545 | 10369 | $51,9 \pm 4,9$ | 35737 | $178,9 \pm 0,9$ |
| 9 | 1996699 | 12144 | $60,8 \pm 5,1$ | 38661 | $193,6 \pm 1$ |
| 10 | 1996445 | 15648 | $78,4 \pm 6,2$ | 38146 | $191,1 \pm 1$ |

Prompt: 2-8 MeV

Delayed: 5-10 MeV

Exclusion avec incertitude en L , cas d'un grand réacteur

Histograma Chi2 160 dof



Exclusion avec un niveau de confiance de 5σ (jaune).