

Étude de la source radioactive du projet CeSOX

Mathieu DURERO
mathieu.durero@cea.fr

CEA-Saclay, IRFU, SPP

Journées des doctorants IRFU, 01/07/2015



Plan

- 1 Introduction
- 2 Neutrinos
- 3 CeSOX en bref
- 4 Caractériser la source
- 5 Conclusion

Présentation

Mathieu Durero

Cursus :

- Ingénieur de l'Institut d'Optique Théorique et Appliquée
- Master Engineering Physics du KTH (Stockholm)

Comment je suis arrivé là ?

En cherchant un sujet sur la physique du neutrino, en Île-de-France, en 2013, avec un enjeu sympathique.

Et avec un téléphone.

Le sujet : Recherche de neutrinos stériles à l'aide d'un générateur d'antineutrinos électroniques.

Glossaire

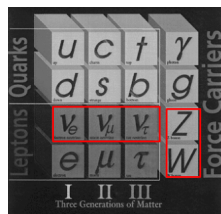
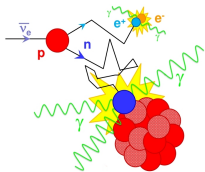
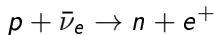
Neutrino : lepton neutre interagissant faiblement (ν).

Générateur d' $\bar{\nu}_e$: source radioactive β^- (^{144}Ce et ^{144}Pr)

Neutrino stérile : particule hypothétique, non sensible aux trois interactions, qui oscille avec les neutrinos.

Oscillation : Un neutrino de saveur donnée à un instant t peut être mesuré neutrino d'une saveur différente à $t+1$.

IBD : Réaction utilisée pour la détection des $\bar{\nu}_e$:



Recherche : travail de fourni.

Le sujet en détail

But : Tester l'hypothèse du neutrino stérile léger (\approx eV).

Expérience : Mesurer précisément le flux émis d'une source connue.

Moyens : Un grand détecteur à liquide scintillant (Borexino).

Une source sur mesure.

Beaucoup de préparation : **caractérisation de la source**, logistique, ajustement du détecteur...

Quotidien Spectrométrie bêta et mesures d'activité.

Portrait du neutrino

- Postulé en 1930 par Pauli suite à l'observation des désintégrations bêta. ${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z-1}X + e^- + \bar{\nu}_e$
- Mis en évidence en 1956 par Reines et Cowan ($\bar{\nu}_e$ à partir d'un réacteur nucléaire).
- Trois saveurs associées à e, μ, τ .
- De masse (presque) nulle.
- Des sections efficaces d'interaction faibles.
- To-do list : masses absolues, hiérarchie de masse, violation de CP, mécanisme générant des masses non-nulles, observation du CNB.

Oscillations entre saveurs

Problème

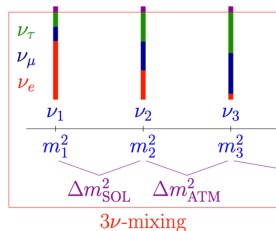
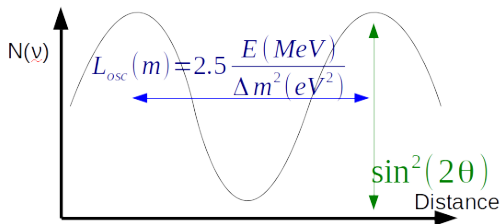
Le flux solaire observé représente une fraction du flux prédit.

Hypothèse

Oscillations des neutrinos entre les trois saveurs.

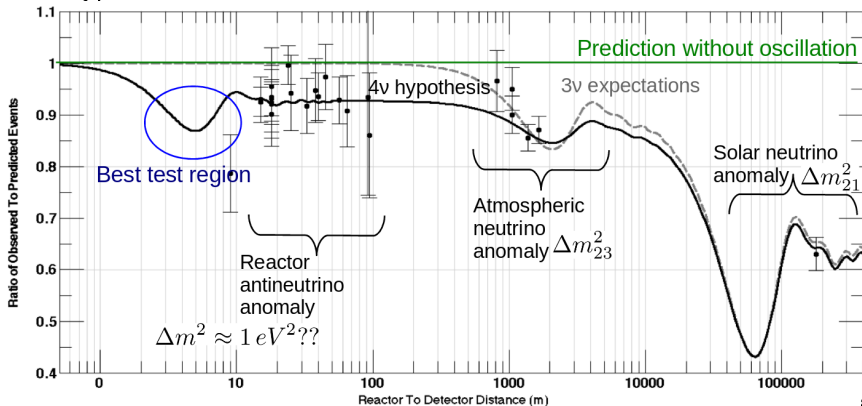
Confirmation

En 1998 Super-Kamiokande observe les oscillations entre ν_μ et ν_τ sur le flux de neutrinos atmosphériques.



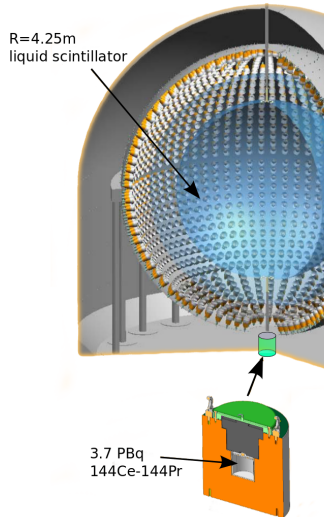
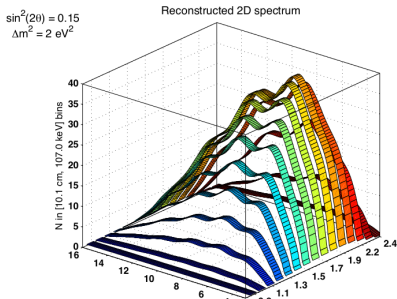
Anomalie des antineutrinos de réacteur

- Les anomalies Solaires et atmosphériques ont conduit à la découverte des oscillations.
- Une fois encore la prédiction d'un flux de neutrinos n'est pas en accord avec l'expérience.
- Hypothèse d'une nouvelle oscillation ?



Chercher des oscillations à courte distance avec un détecteur à bas bruit de fond

- Détection par IBD
- Une source à 8.25 mètre du centre de Borexino.
- Signature des oscillations en distance et en énergie.
- Analyse aussi prévue en taux d'événements.



La source

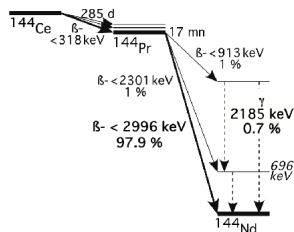
Attraits du couple $^{144}\text{Ce}/^{144}\text{Pr}$

- Une source de $\bar{\nu}$ au delà du seuil IBD ($Q_{\beta} = 3 \text{ MeV} > 1.8$).
- Une demi-vie longue (285 jours)
- Un matériau relativement simple à obtenir

La chaîne de désintégration émet des γ à 2.2 MeV et 0.7% d'intensité.

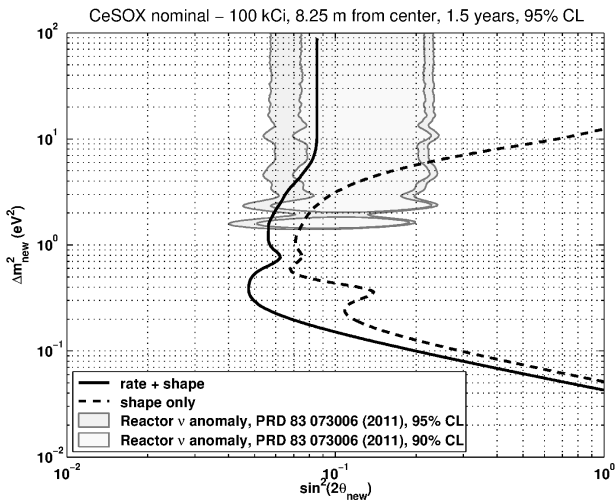
Les besoins de CeSOX

- Activité nécessaire : $> 3,7 \text{ PBq}$
- Limite de dose à proximité $500 \mu\text{Sv}/\text{an}$.
- Une intensité γ réduite par 10^{12}
- Pouvoir entrer dans le tunnel de Borexino.



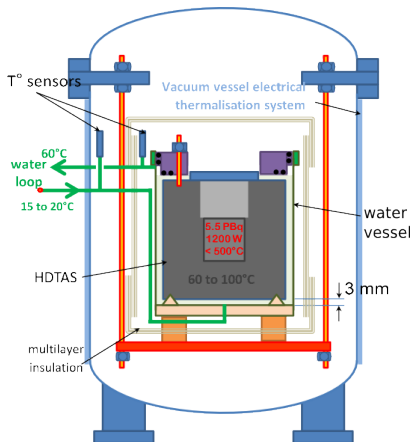
Ce qu'on espère de CeSOX

Sensibilité pour 1 an et demi de fonctionnement



Mesure d'activité par calorimétrie

pour une incertitude inférieure à 1%



Principe

- Circuit d'eau fermé.
- Sous atmosphère de vapeur.
- Chaleur transféré au film d'eau autour du blindage.
- Débit massique connu et régulé.
- Mesurer l'écart de température entrée-sortie.

Sources d'erreurs

- Étalonnage des capteurs (température et courant).
- Conversion $\text{Bq} \rightarrow \text{W}$.

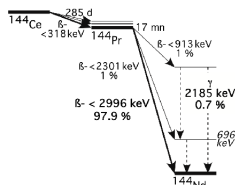
Comprendre les spectres bêta

Spectre de Fermi pour une branche :

$$\frac{dN}{dW} = K p \underbrace{W(W - W_0)^2}_{\text{Phase space factor}} \times \underbrace{F(Z, W)}_{\text{Fermi function: influence of the Coulomb field of a point-like nucleus}} \times \underbrace{C(Z, W)}_{\text{Shape factor (depends on } t \text{ nature of the transition) + corrective terms}}$$

Reduced beta particle energy: $W = E/m_e$

Endpoint energy: $W_0 = Q_\beta/m_e + 1$



Branching ratio	Q_β (keV)	Transition type	
76.5 %	318.7	1^{st} non-unique forbidden	^{144}Ce
3.9 %	238.6	1^{st} non-unique forbidden	
19.6 %	185.2	1^{st} non-unique forbidden	
97.9%	2997.5	1^{st} non-unique forbidden	^{144}Pr
1.04%	2301.0	1^{st} unique forbidden	
1.05%	818.8	Allowed	

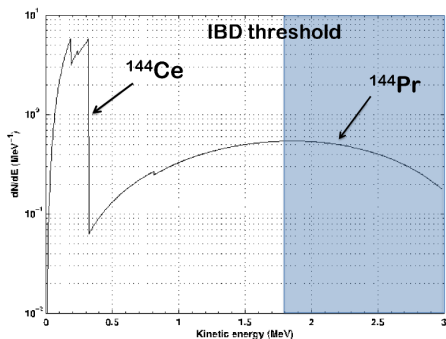
Les transitions non-unique ne sont que superficiellement connues.

Spectrométrie bêta

Plusieurs mesures sont prévues sur des échantillons (CeNO_3).

Pourquoi est-ce essentiel ?

- La mesure d'activité dépend de l'énergie moyenne d'une désintégration.
- L'erreur sur le nombre d'événements attendu dépend :
 - de l'incertitude sur Q_β .
 - de la forme du spectre.
 - des intensités des branches.
- Détecter des impuretés émettrices d'électrons comme le $^{90}_{38}\text{Sr}$.

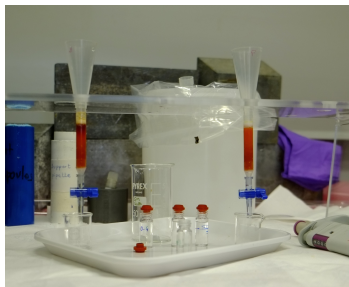


Spectrométrie bêta

Contraintes

- Mélange de deux spectres → séparation chimique.
- Vie du ^{144}Pr : $\approx 17\text{min}$, pour préparer une source et mesurer.
- Précision $< 0.5\%$ pour la sensibilité en taux d'interactions.
- Intérêt pour $E_\beta < 100\text{ keV}$ à cause du seuil IBD.

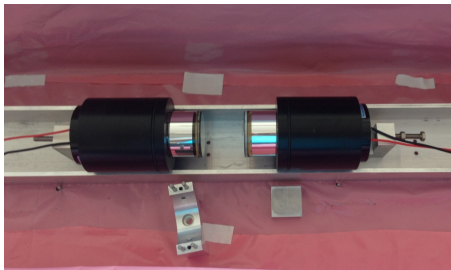
Plusieurs mesures croisées (Collaborations LNHB et TUM).



- Plastique scintillant avec veto γ .
- Cristal de silicium (bas seuil en énergie)
- Plastique et liquide scintillant à haute efficacité.

SaBS

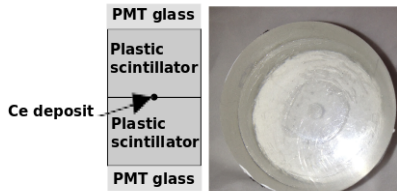
Saclay Beta Spectrometer



- En construction au bât. 602.
- 2 photomultiplicateurs.
- Un cylindre de plastique.
- Dépôt radioactif au centre de la zone sensible.

Géométrie envisagée :

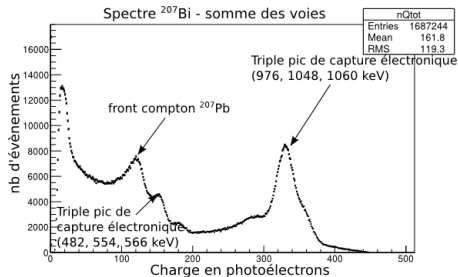
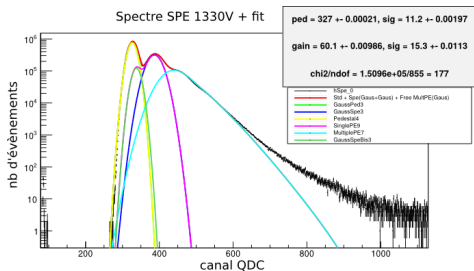
- Source solide scellé dans le plastique
- Cavité comblée de liquide scintillant et source diluée.



Études et étalonnage

Travaux en cours

- Étalonner finement les photomultiplicateurs.
 - Mesure du gain sur photoélectron unique.
- Valider et étalonner la chaîne d'acquisition.
 - Amplification et intégrateur de charges
- Déterminer la géométrie finale optimale.



Spectrométrie γ et de masse : les impuretés

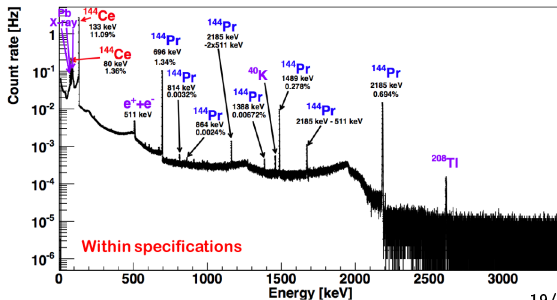
→ Sonder la présence d'émetteurs γ et neutron susceptibles de créer des bruits de fond.

Spectrométrie de masse

- Collaboration DEN-LASE.
- Mesure des rapports isotopiques du cérium.
- Quantifier les impuretés à vie longue (pour le stockage).

Spectrométrie gamma

- Compteur Germanium au bât. 538.
- Bons résultats des premiers échantillons ($< 10^{-3} \text{Bq/Bq}$).



Conclusion

- CeSOX recherche neutrino stérile léger.
- L'expérience est en phase de construction.
- Elle repose sur la conception et la connaissance de sa source.
- L'analyse d'échantillons validera la fabrication tout au long du processus.
- Le flux de particules émis doit être précisément connu.
- La mise au point des instruments nécessaires à ces études est en cours.
- Le déploiement pourrait avoir lieu fin 2016.