

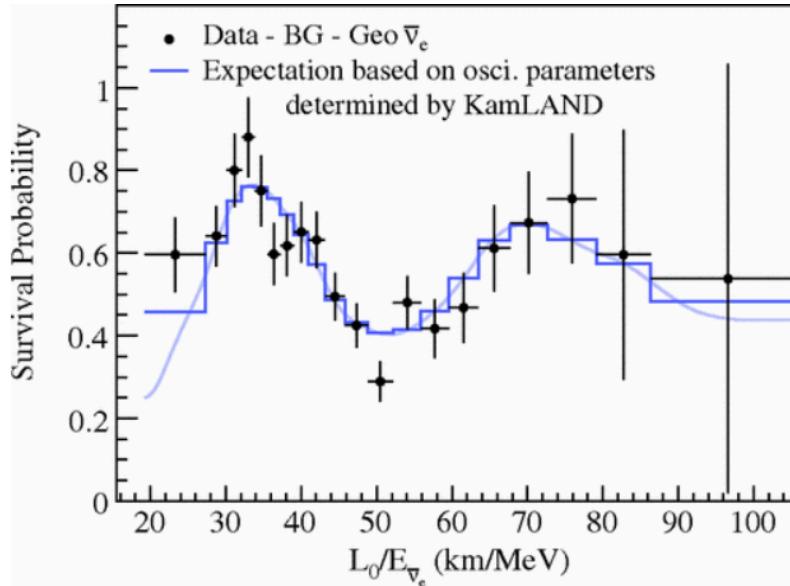
Recherche d'oscillations induites par un neutrino stérile utilisant les données des expériences STEREO et PROSPECT

CSI deuxième année, 31 octobre 2025

Yann Querloz

Superviseur : Pablo Del Amo Sanchez

Neutrinos Stériles et Expérience de Courte Baseline

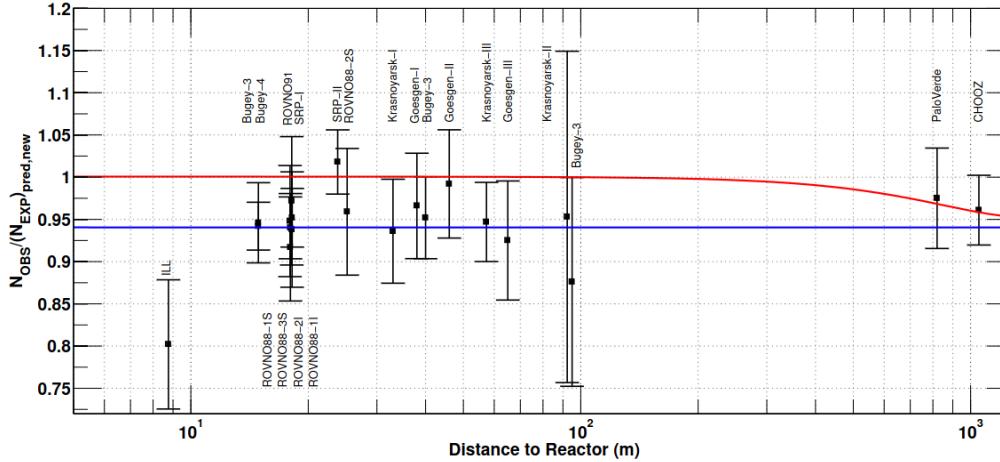


$$\mathcal{P} = 1 - \sin^2(2\theta_{12}) \sin^2\left(\Delta m_{12}^2 \frac{L}{E}\right)$$

- La probabilité de mesurer un neutrino dans une saveur donnée est une fonction du ratio L/E.
- A permis d'expliquer le déficit expérimental observé dans le flux des neutrinos solaires.

KamLAND Collaboration, Precision Measurement of Neutrino Oscillation Parameters with KamLAND, *Phys-RevLett.100.221803*

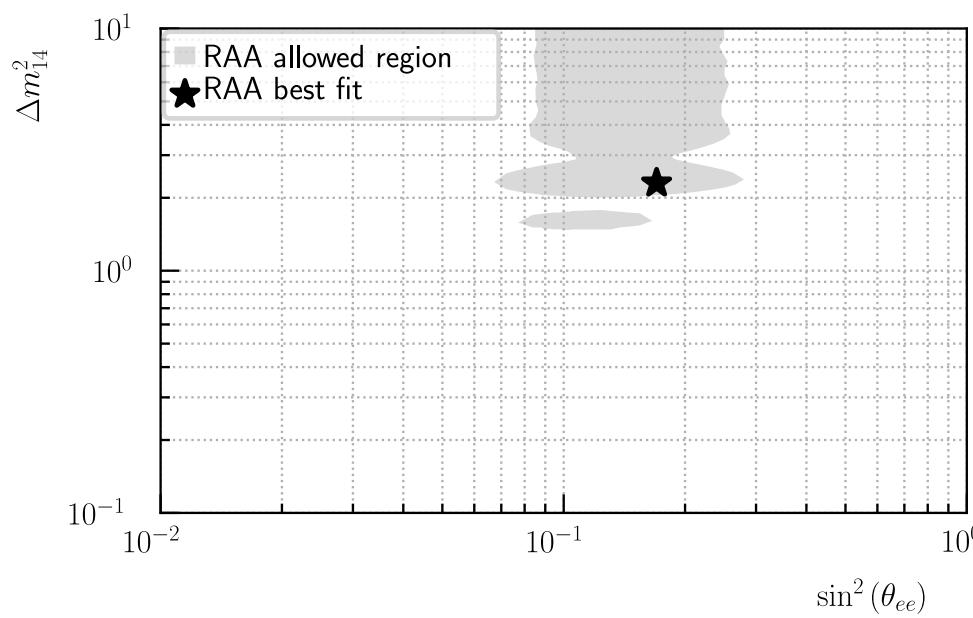
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$



G. Mention and all, **The Reactor Antineutrino Anomaly**, *J. Phys.: Conf. Ser.*
408 012025

Illustration de l'anomalie réacteur.
 (red) flux prédict pour 3 saveurs
 (blue) flux prédict pour 4 saveurs.

- Déficit de 6% à 3σ CL, sur le flux d'antineutrino attendu mesuré par plusieurs expériences
- Interprété comme une amplitude moyenne (Δm_{14}^2) d'oscillation à haute fréquence ($\sin^2(\theta_{ee})$) d'une nouvelle saveur lourde



G. Mention and all, **The Reactor Antineutrino Anomaly**, *J. Phys.: Conf. Ser.*

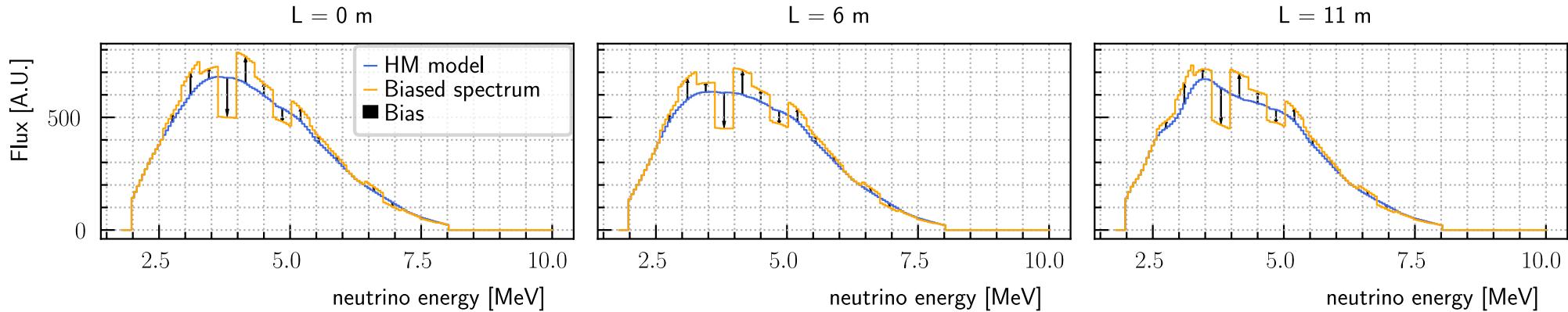
408 012025

- Le paramètre Δm_{14}^2 , seule une limite base peut être fixée faute de résolution.

$$\left\langle \Delta m_{14}^2 \frac{L}{2E} \right\rangle \gg \pi$$

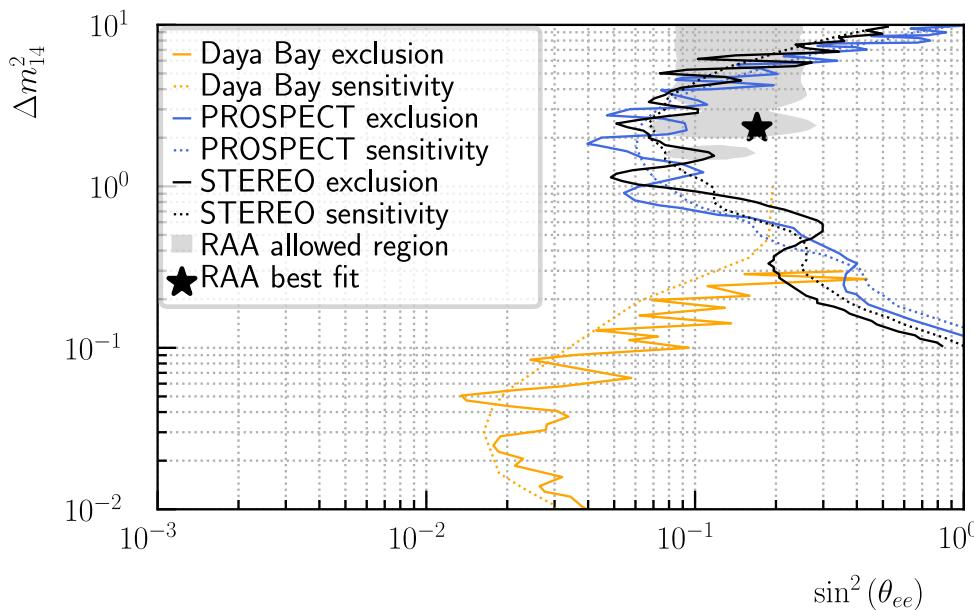
- Le paramètre $\sin^2(\theta_{ee})$ est déduit de l'amplitude du déficit sur le flux total.

Illustration de la modulation avec la distance (0, 6 et 11 mètres) des spectres observés dans le cas d'une oscillation compatible avec la RAA. En (bleu) le spectre attendu standard. En (orange) un spectre avec des biais aléatoires.



- Le spectre est la principale systématique \Rightarrow il faut être agnostique du spectre.
- Biais dans le spectre \Rightarrow identique dans chaque cellule.
- Paramètres d'oscillations non-nuls \Rightarrow modulations dépendantes de la distance.

Contour d'exclusion (ligne continue) et sensibilité (pointillé) à un niveau de confiance de 95% CL publié par la collaboration STEREO (noir), PROSPECT (bleu) et Daya Bay (orange)



STEREO collaboration, **STEREO neutrino spectrum of ^{235}U fission rejects sterile neutrino hypothesis**, *Nature* 613.7943

PROSPECT collaboration, **Final Search for Short-Baseline Neutrino Oscillations with the PROSPECT-I Detector at HFIR**, *arXiv* : 2406.10408

Daya Bay collaboration, **Search for a Light Sterile Neutrino at Daya Bay**, *Phys. Rev. Lett.* 113

Méthodes d'analyses statistiques

La vraisemblance \mathcal{L} dépend des paramètres d'oscillations, des paramètres du spectre (κ) et les paramètres du modèle de réponse (p).

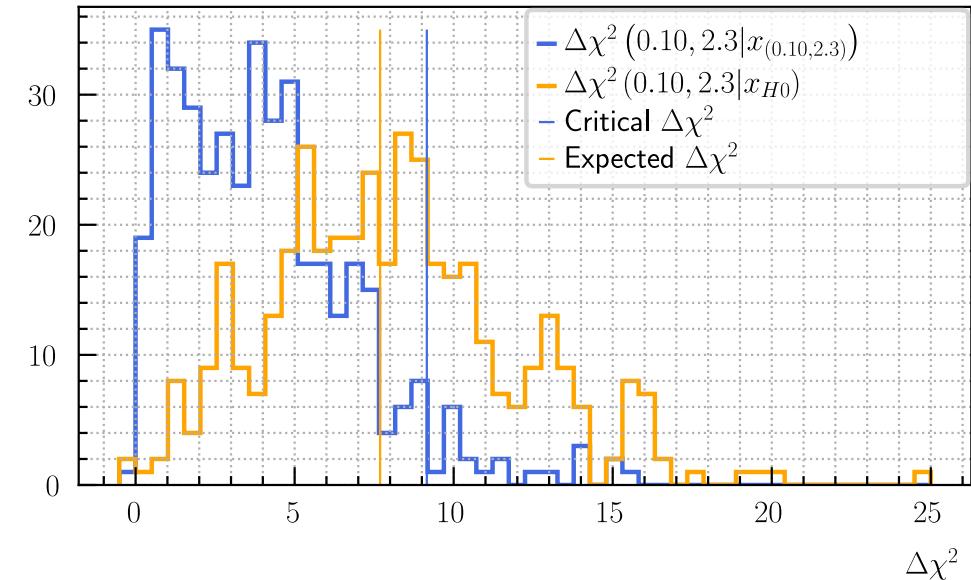
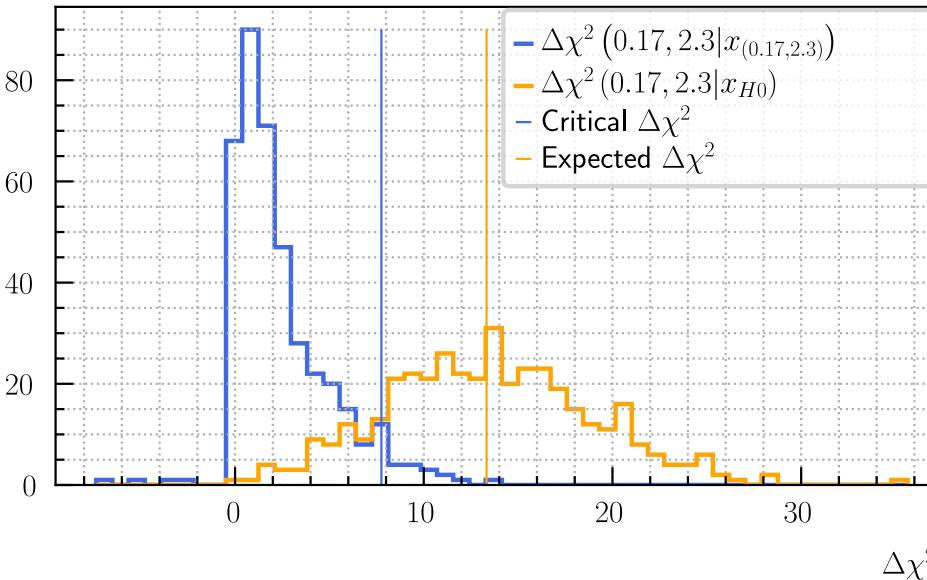
On définit les grandeurs:

- $\chi^2_{\text{free}}(x) = \min_{\sin^2(\theta_{ee}), \Delta m_{14}^2, \kappa, p} (-2 \ln(\mathcal{L}))$ lié à la vraisemblance maximale globale.
- $\chi^2_{\text{fixed}}(\sin^2(\theta_{ee}), \Delta m_{14}^2 | x) = \min_{\kappa, p} (-2 \ln(\mathcal{L}))$ un estimateur à hypothèse fixée.

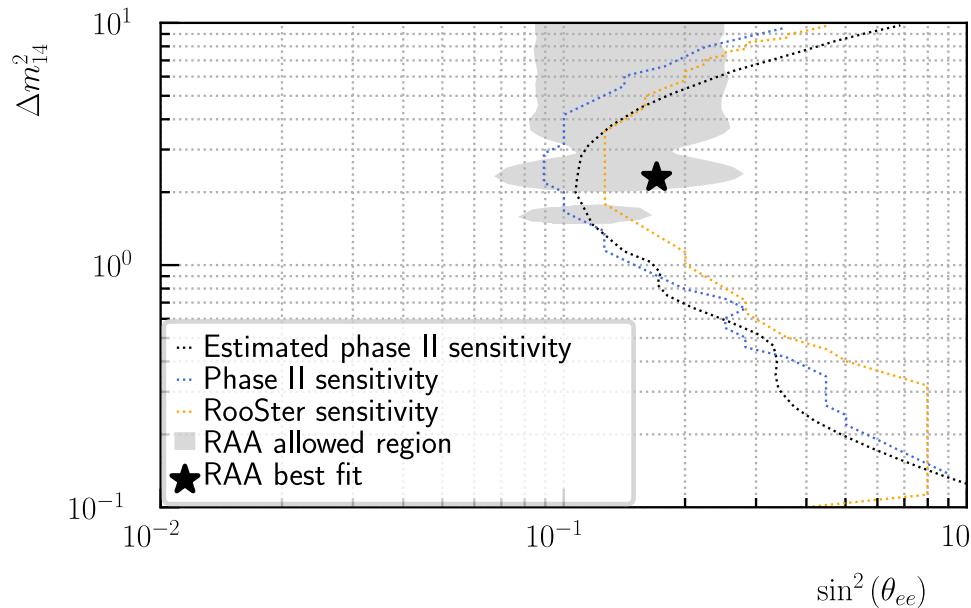
Ainsi que la statistique de test :

$$\Delta\chi^2(\sin^2(\theta_{ee}), \Delta m_{14}^2 | x) = \chi^2_{\text{fixed}}(\sin^2(\theta_{ee}), \Delta m_{14}^2 | x) - \chi^2_{\text{free}}(x)$$

Distributions de $\Delta\chi^2$ obtenues à partir de toys; À gauche, l'hypothèse RAA. À droite, l'hypothèse RAA*. En (bleu) la distribution $\Delta\chi^2$ de référence et en (orange) la distribution $\Delta\chi^2$ attendue pour des données hypothèse nulle.



En (noir) la sensibilité publiée utilisant les données des phases II & III de STEREO. En (orange) la sensibilité obtenue pour la phase II avec RooSter. En (bleu) la sensibilité estimée pour la phase II obtenue avec mon framework.



- L'excès à basses fréquences peut être dû au changement de modèle de réponse.
- Importante différence aux fréquences proches de la RAA.

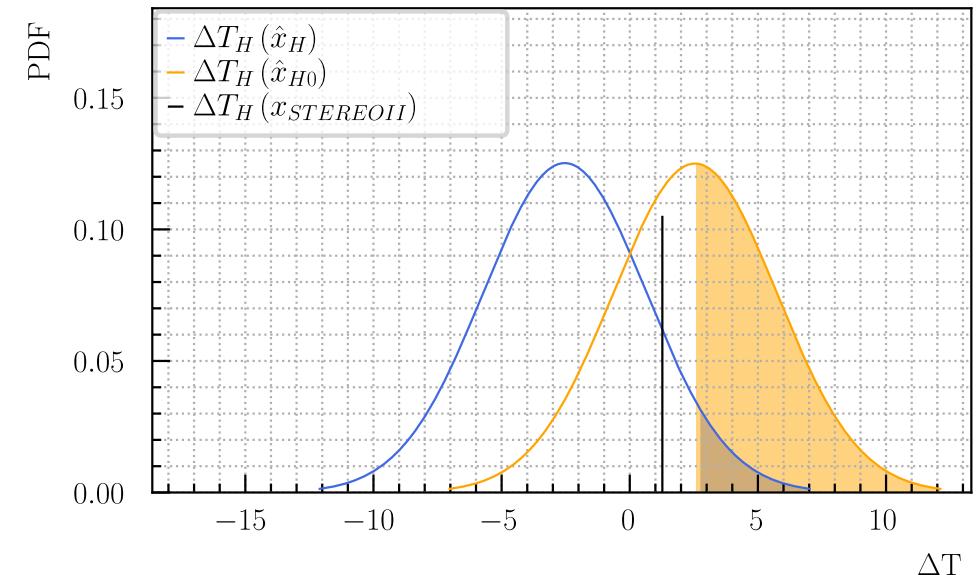
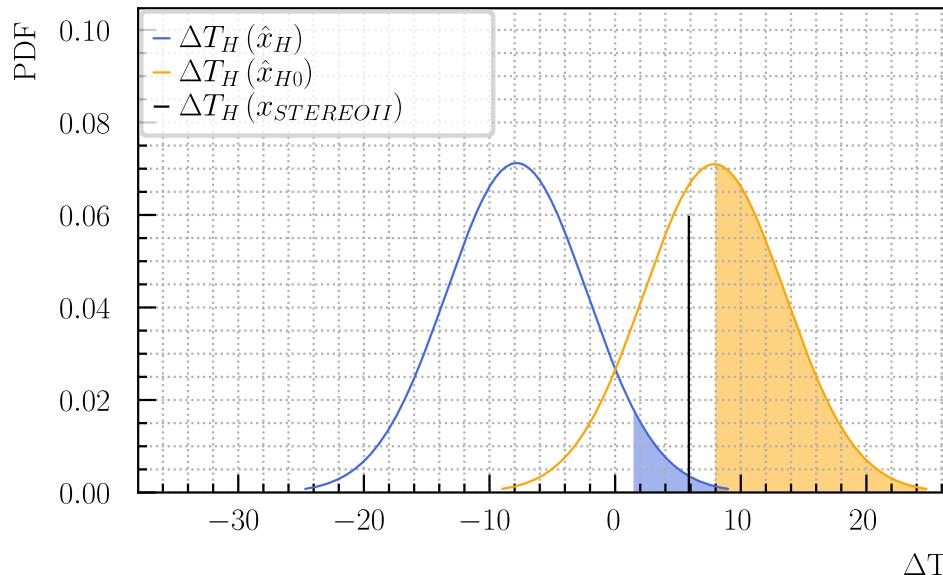
La méthode Gaussian CLs repose sur la statistique de test:

$$\Delta T(\sin^2(\theta_{ee}), \Delta m_{14}^2 \mid x) = \chi^2_{\text{fixed}(\sin^2(\theta_{ee}), \Delta m_{14}^2 \mid x)} - \chi^2_{\text{fixed}(0,0 \mid x)}$$

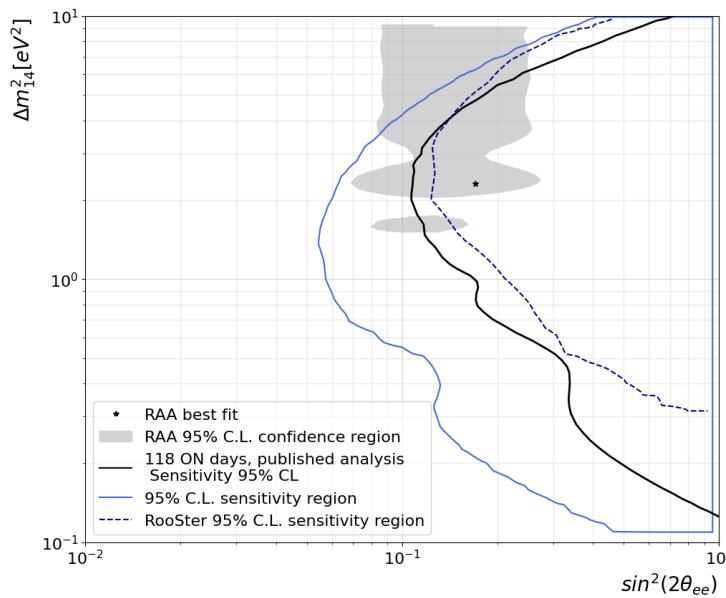
On ne construit plus de distributions empiriques, mais on déduit des distributions analytiques des tests statistiques réalisés sur des prédictions Asimov.

- Pas de génération et fit de pseudo-expérience.
- Procédure bien plus rapide.

Distribution de référence pour l'hypothèse RAA (**bleu**) et l'hypothèse H_0 (**orange**). Valeurs du test $\Delta T_{H_{\text{RAA}}} (x_{\text{STEREO II}})$ en (noir) avec xSTEREO II les données de STEREO pour la phase II.



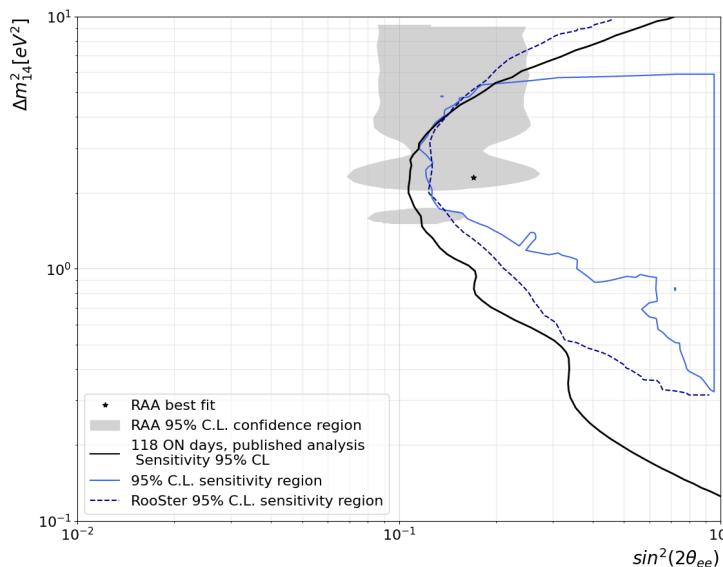
En (noir) la sensibilité attendue pour la phase II. En (bleu pointillé) la sensibilité obtenue pour la phase II avec RooSter. En (bleu) la sensibilité estimée pour la phase II en fixant le spectre réacteur.



Comme attendu:

- Sensibilité bien plus importante.
- Impact plus important à basses fréquences.
- Ajouter plus de paramètres de nuisances n'impacte pas la sensibilité aux fréquences de la RAA.

En (noir) la sensibilité attendue pour la phase II. En (bleu pointillé) la sensibilité obtenue pour la phase II avec RooSter. En (bleu) la sensibilité estimée pour la phase II en diminuant les contraintes sur le modèle de réponse.



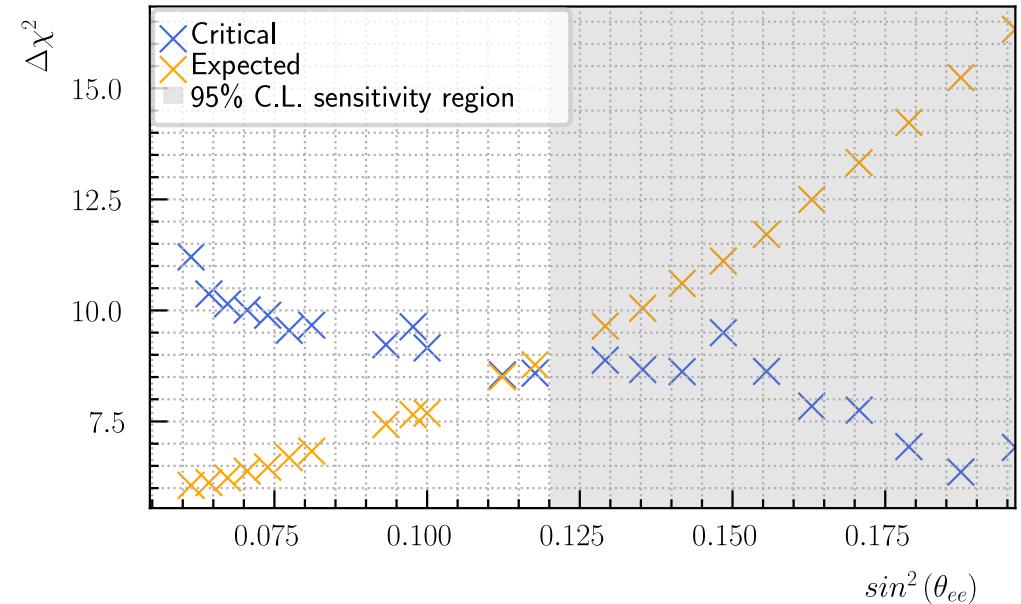
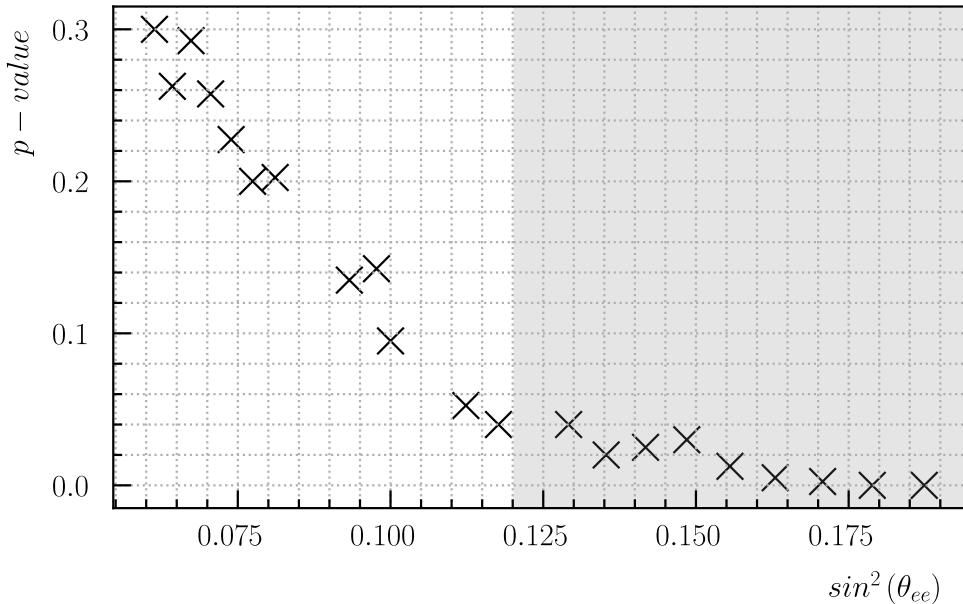
Comme attendu:

- Sensibilité fortement dégradée à basse fréquence.
- Pas d'impact significatif aux fréquences de la RAA.
- Ajouter encore plus de liberté rend toute optimisation impossible.

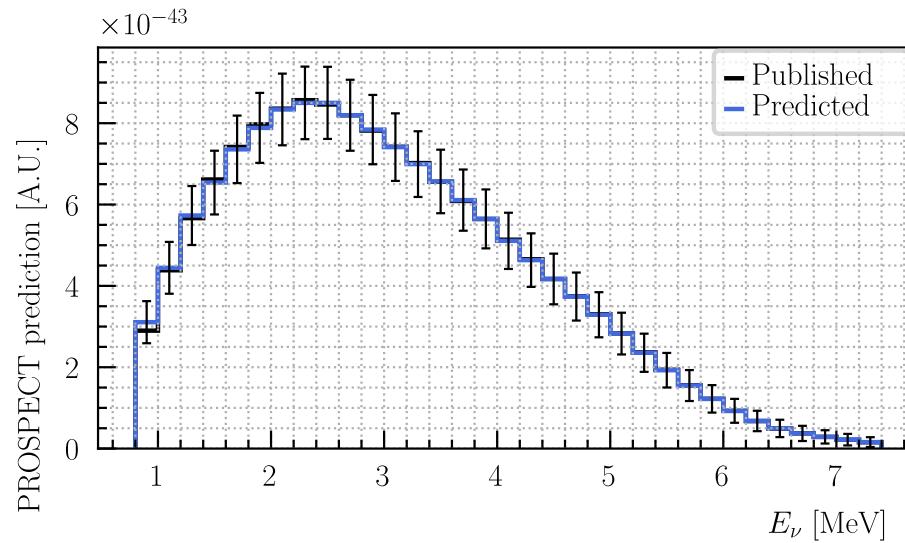
Bande de fréquence de la RAA

À gauche, les P-values pour une bande d'amplitude à fréquence fixée (2.3eV^2).

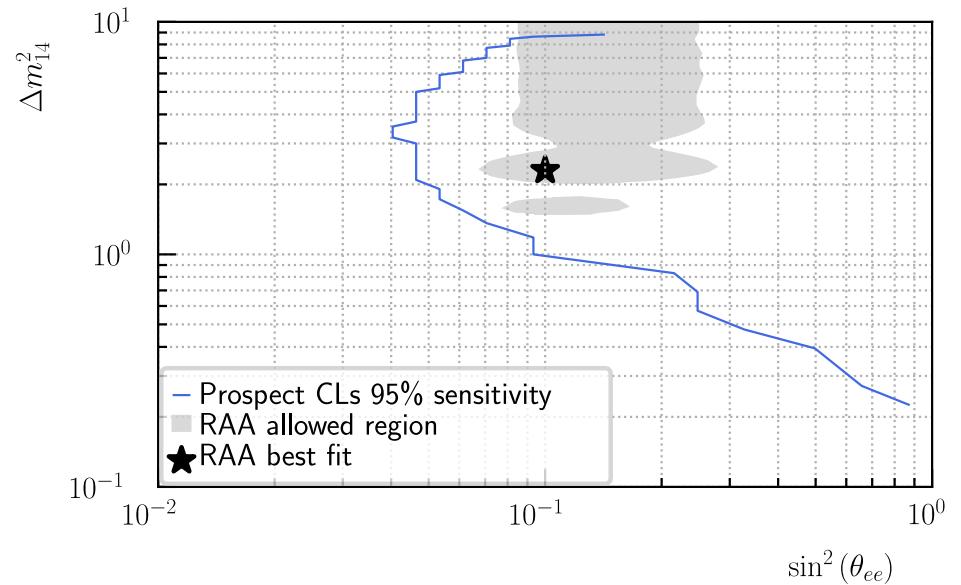
À droite, les valeurs des $\Delta\chi^2$ critiques (bleu) et les $\Delta\chi^2$ médians (orange).



La prédition publiée (noir) et la pré-diction réalisée avec le modèle de réponse analytique (bleu).



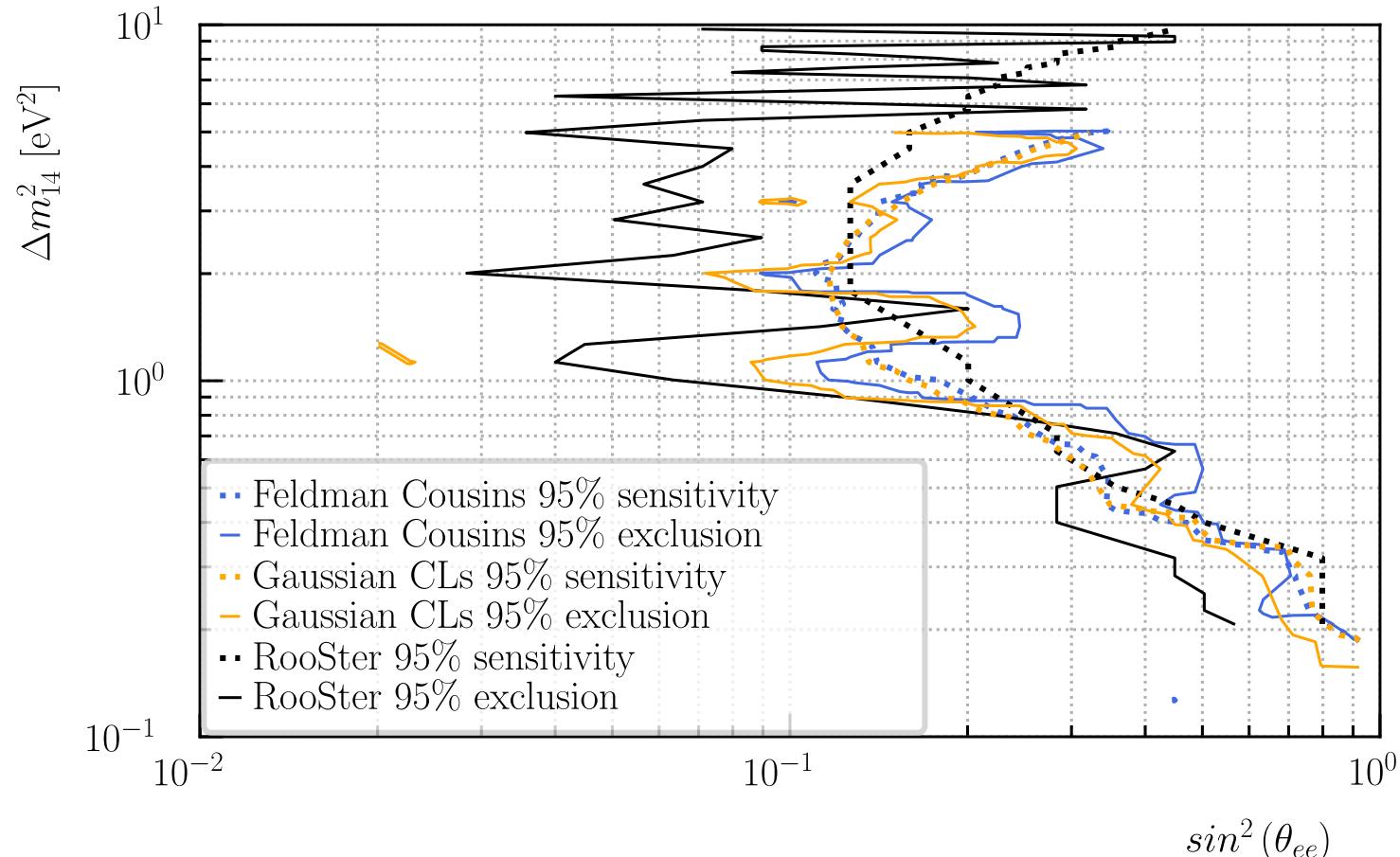
Courbe de sensibilité estimée pour l'expérience PROSPECT obtenue avec le modèle de réponse analytique.



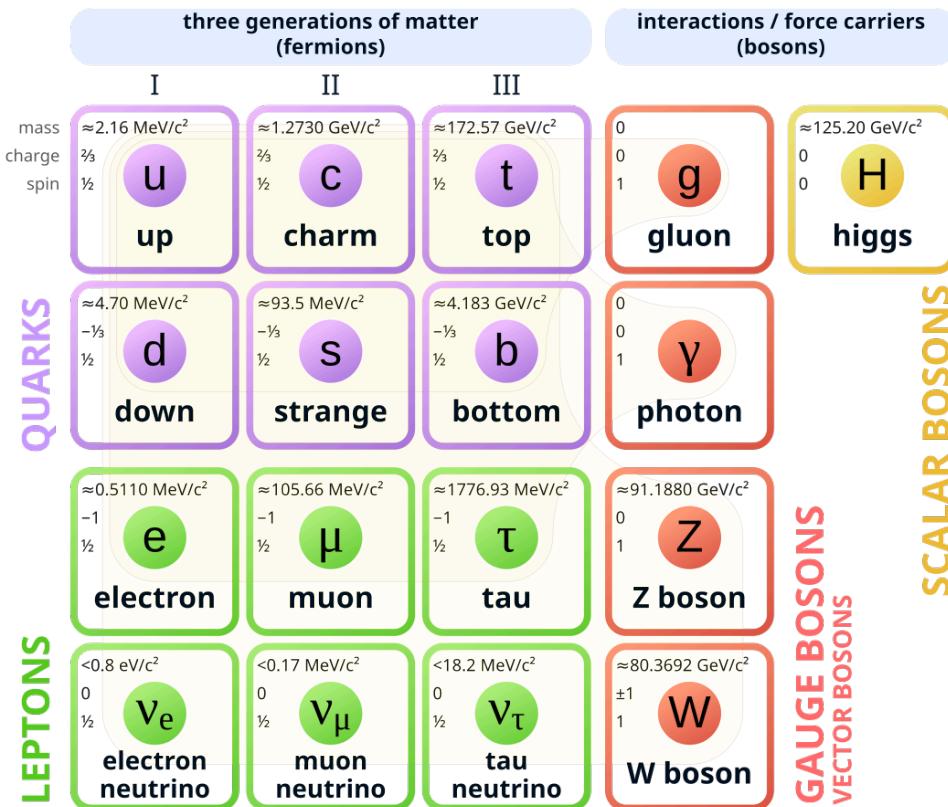
- Formations disciplinaires et enseignement :
- Étique de la recherche 15H (obligatoire).
- IDPASC summer school 24H.
- Encadrement de TD 7H (obligatoire pour valider les heures d'enseignement).
- TD de mécanique du point en première années.
- TD de statistiques en deuxième années.
- Formations transversales :
 - Journée de rentrée des doctorants 5H (obligatoire).
 - Formation CNRS santé et sécurité au travail 14H.
 - MT180 17H.
- Formations à l'insertion professionnelle :
 - Mettre en œuvre sa démarche de recherche d'emplois 10H.

Merci !

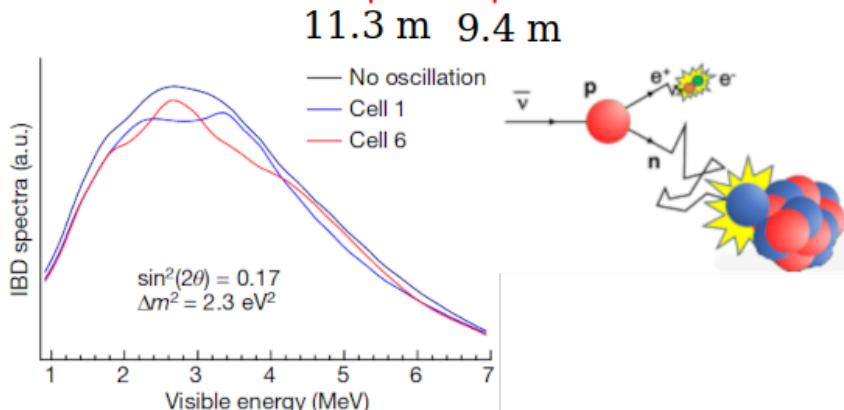
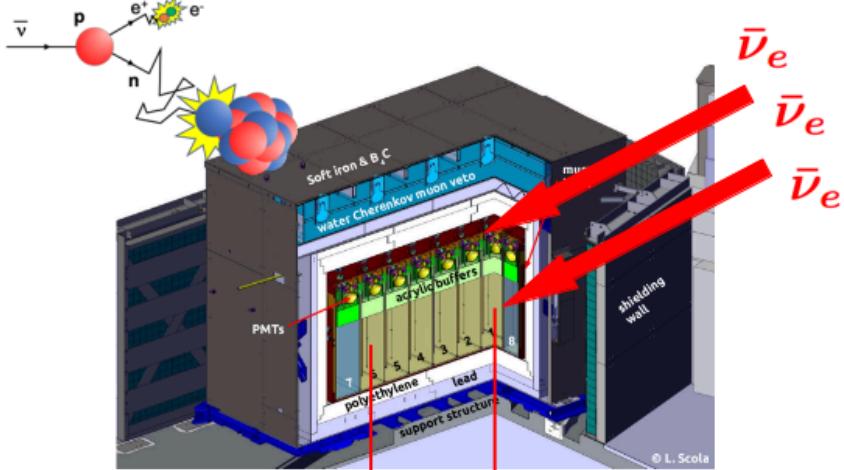
Backup...



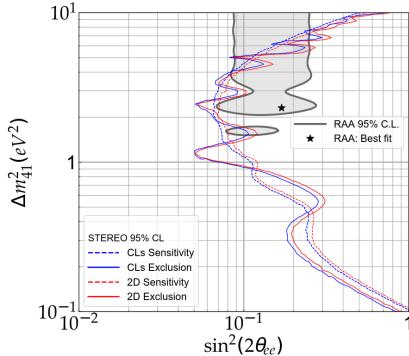
Standard Model of Elementary Particles



- Leptons sans charge électrique
- Interaction faible uniquement
- Produit par courant chargé avec un des trois leptons chargés
- Nombre de “saveurs” associées à la particule produite
- Propriété fondamentale, les oscillations des neutrinos



- Interaction des neutrinos via désintégration beta inverse
- Scintillateur liquide dopé Gadolinium
- Mesure des photons de scintillation dans des photo-multiplicateurs

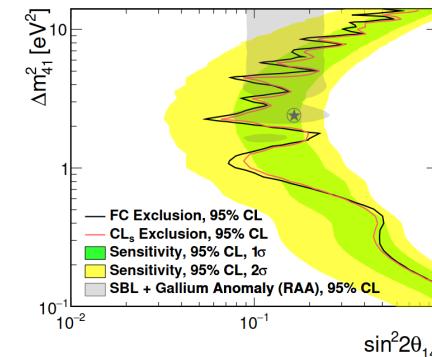


STEREO:

- Short baseline 9 to 11 m, 6 distinct cells
- S/B ≈ 1 , more statistics
- *Objective* : Perform an oscillation measurement independently of the reactor spectrum

Prospect:

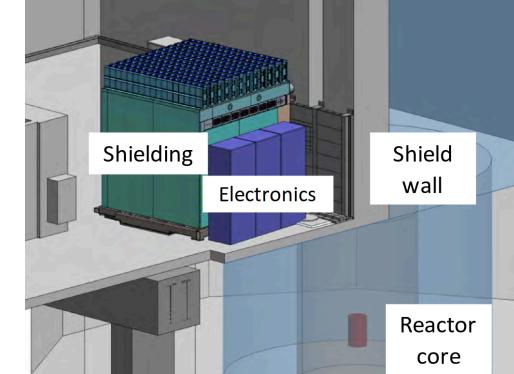
- Short baseline, high segmentation
- Best S/B ratio, less IBD candidates
- Almost identical reactor spectrum



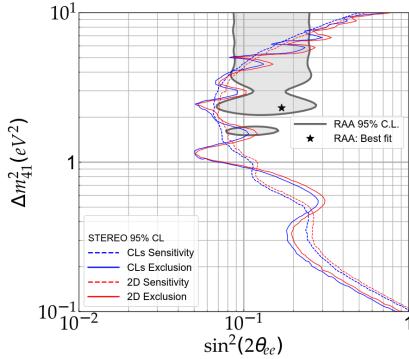
Prospect collaboration, **Improved Short-Baseline Neutrino Oscillation Search and Energy Spectrum Measurement with the PROSPECT Experiment at HFIR**, *arXiv:2006.11210*

Prospect:

- Faible distance, grande segmentation
- Meilleur rapport S/B, moins de statistiques
- Quasiment le même spectre réacteur



Prospect collaboration, **The PROSPECT Reactor Antineutrino Experiment**, *j.nima.2018.12.079*

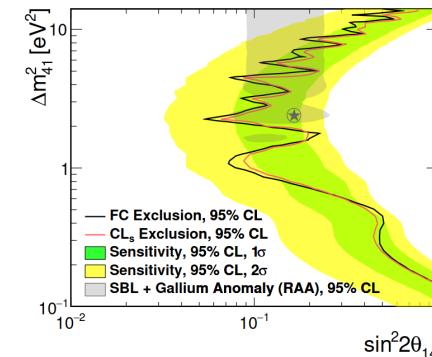


STEREO:

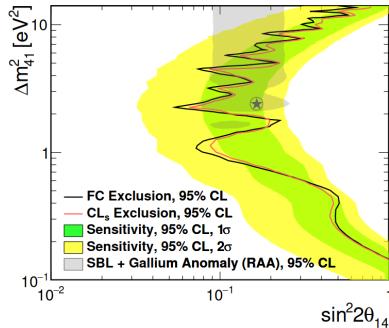
- Faible distance 9 à 11 m, 6 cellules actives
- S/B ≈ 1 , plus de statistiques
- *Objectif*: Réaliser une mesure d'oscillation indépendamment du spectre réacteur.

Prospect:

- Faible distance, grande segmentation
- Meilleur rapport S/B, moins de statistiques
- Quasiment le même spectre réacteur

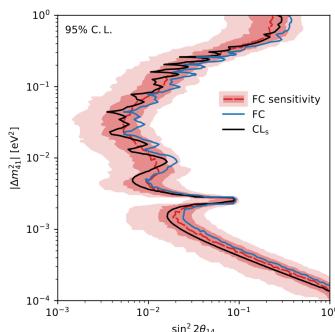


Prospect collaboration, **Improved Short-Baseline Neutrino Oscillation Search and Energy Spectrum Measurement with the PROSPECT Experiment at HFIR**, *arXiv:2006.11210*



- Design similaire à STEREO
- Coeur d'U235 quasi pure
- Meilleur rapport signal sur bruit
- Parties du détecteur dégradées

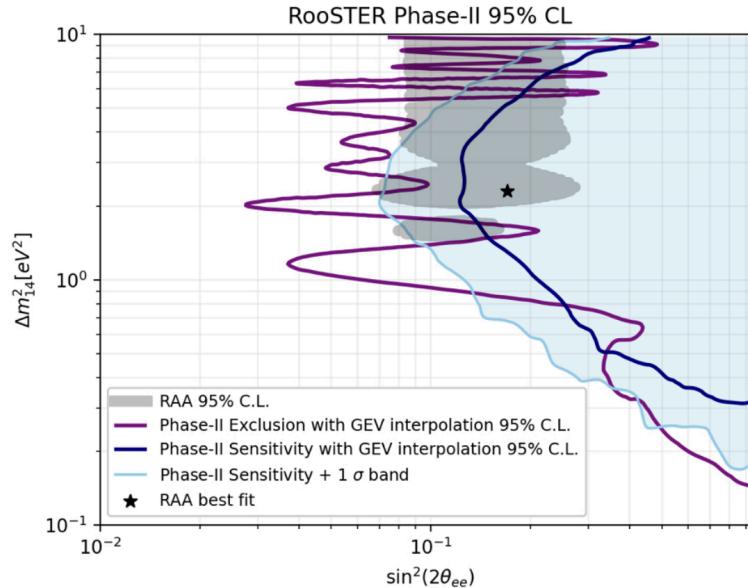
Prospect collaboration, **Improved Short-Baseline Neutrino Oscillation Search and Energy Spectrum Measurement with the PROSPECT Experiment at HFIR**, *arXiv:2006.11210*



- Mesure de $\sin^2(2\theta_{13})$ comme objectif principale
- Combustible Pu + U fuel, réacteur civile → nuisance additionnelle
- Faible bruit de fond (quelques %)
- Distance à la source $\approx 1\text{km}$ ⇒ Sensible aux faible valeurs de Δm^2 .

Daya Bay collaboration, **Search for a sub-eV sterile neutrino using Daya Bay's full dataset**, *arXiv:2404.01687*

- Analyse des données phase 2
- Basé sur un ajustement “shape only”
- Pas étendu au données phase 3 du à un manque de moyens humains



Loïc Labit, **Very short baseline neutrino oscillations study with the STEREO detector at ILL; calibration of the STEREO detector.**, *Insp-HEP*: tel-03596718

Pros:

- More flexible response model, all systematics properly accounted for via free nuisance parameters in fit.
- Exclusion contour compatible with published one.

Cons:

- Computationnally intensive fit, high dimentionnality of parameter space due to number of nuisance parameters.
- Took 24h per fit for phase 2 only.
- Phase 3 + Prospect + Daya Bay → impractically long fit.
- Rewrite with Jax+numpy to speed-up (≈ 3 min/fit).

↳ Validate new code with STEREO phase 2.

Problème temps de calcul ancien framework

- Temps de calcul de 24h par ajustement pour la phase 2.
 - Pour $\approx 4M$ d'ajustement
 - 1. Ajout de la phase 3, Prospect (5 périodes), Daya-Bay...
- ⇒ Temps de calcul beaucoup trop important

Nouveau framework

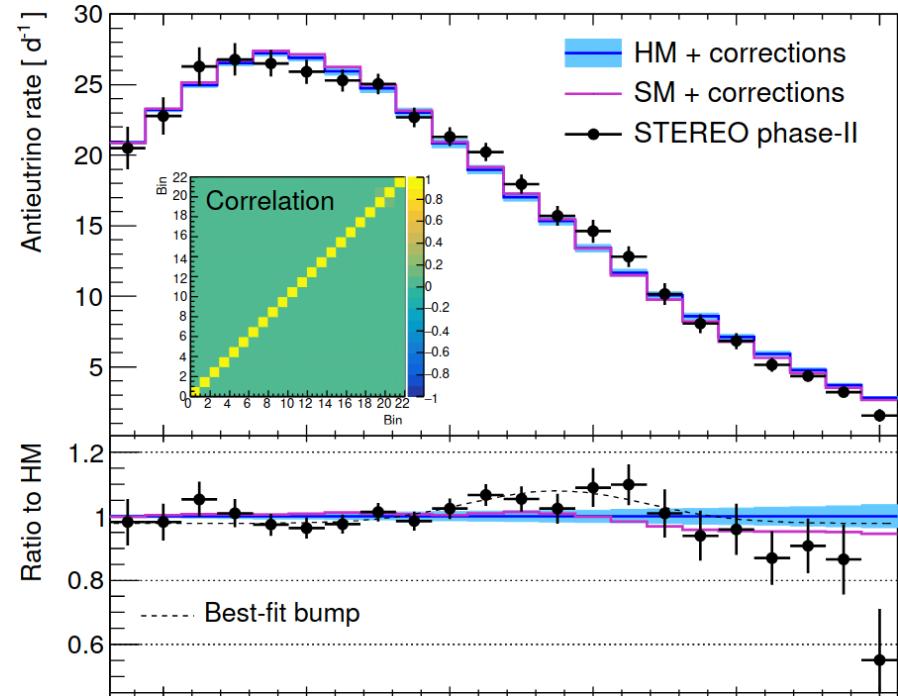
- Diminution du nombre de paramètres du modèle de réponse analytique.
 - Passage de RooFit à des librairies permettant un contrôle plus fin des étapes de calcul. (Jax et numpy)
 - Code compilé à la volée sur CPU voir GPU
 - Comparaison de performance de différents algorithmes et méthodes d'optimisation
- ⇒ **Objectif:** validation du nouveau framework avec l'ancien
- ⇒ Diminution du temps d'ajustement à ≈ 10 min

$$\varphi_{ci} = \sum_j \hat{R}_{cij}(\vec{p}') \mathcal{P}_{cj}(\sin^2(2\theta_{ee}), \Delta m_{14}^2) \varepsilon_{cj} \Phi_j(\vec{K})$$

$$\chi^2 = \sum_{i,c=1..6} \frac{(N_c \varphi_{ci} - D_{ci})^2}{\sigma_i^2} + \sum_{c=1..6} \vec{\pi}_{c\vec{p}}^T \hat{V}_{c\vec{p}}^{-1} \vec{\pi}_{c\vec{p}}$$

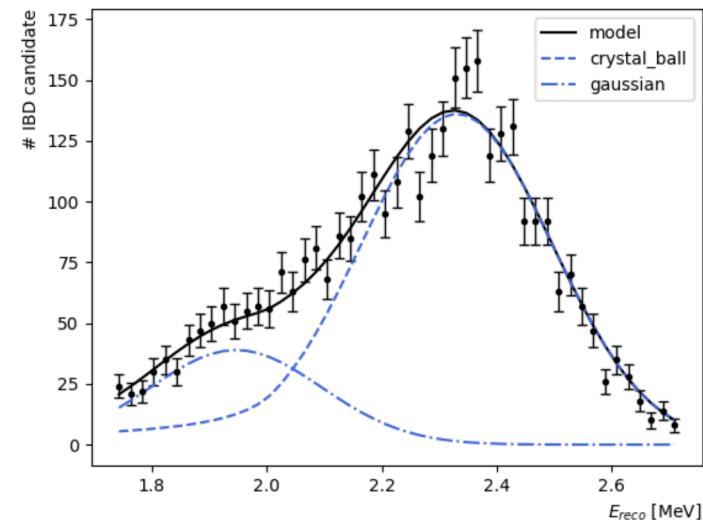
- On normalise, par cellule (c), la prediction φ_{ci} aux données D_{ci}
- Perd la dépendance au flux total, mais moins de sensibilité à certaines fréquences
- Forme du spectre de réacteur Φ libre pendant les ajustements

- Huber Mueller, standard in reactor neutrino physics. From measurements on isotope layers
- \Rightarrow It has been shown that the spectrum is the main systematic



STEREO collaboration, **First antineutrino energy spectrum from U235 fissions with the STEREO detector at ILL.**, *Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 48 075107

- Modélise la conversion entre l'énergie du neutrino et l'énergie reconstruite
- Un modèle ajusté par cellule en fonction de l'énergie de neutrinos
- Modèle $\stackrel{\text{def}}{=}$ PDF à 2 composantes fonction de $(E_{\text{reco},i})$;
 - Une Gaussienne pour les événements contenues
 - Une Gaussienne + loi de puissance pour les événements avec pertes
- Paramétrisé par un jeu de paramètres \vec{p} laissés libres lors des ajustements: $\vec{p}' = \vec{p}(1 + \vec{\pi}_p)$



$$\vec{p} = \{\mu_0, \mu_1, \mu_2, \delta, a, b, \alpha, n, f\}$$

$$\mu_{\mathcal{C}\text{ore}} = \mu_0 + \mu_1 \times E_{\text{true;j}} + \mu_2 \times E_{\text{true;j}}^2$$

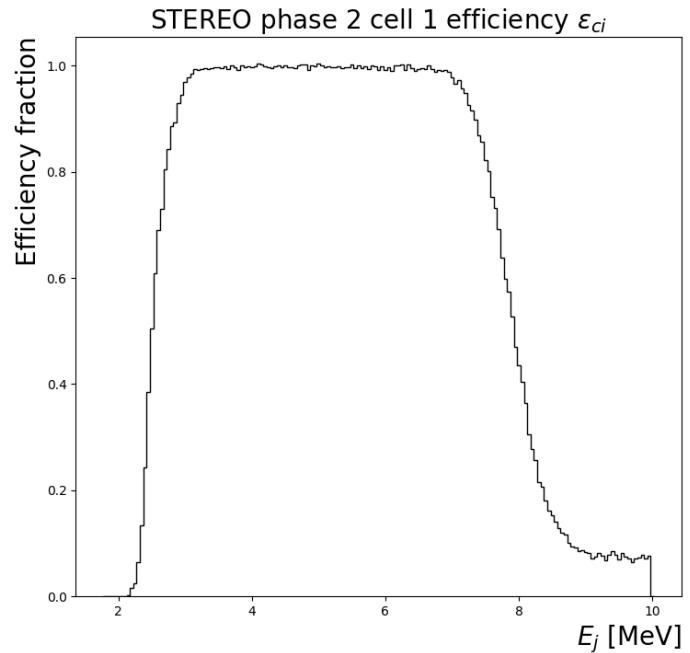
$$\mu_{\mathcal{L}\text{eak}} = \mu_0 + \mu_1 \times (E_{\text{true;j}} - \delta) + \mu_2 \times (E_{\text{true;j}} - \delta)^2$$

$$\frac{\sigma_{\mathcal{C}\text{ore}}}{\mu_{\mathcal{C}\text{ore}}} = \sqrt{a^2 + \frac{b^2}{\mu_{\mathcal{C}\text{ore}}}}; \quad \frac{\sigma_{\mathcal{L}\text{eak}}}{\mu_{\mathcal{L}\text{eak}}} = \sqrt{a^2 + \frac{b^2}{\mu_{\mathcal{L}\text{eak}}}}$$

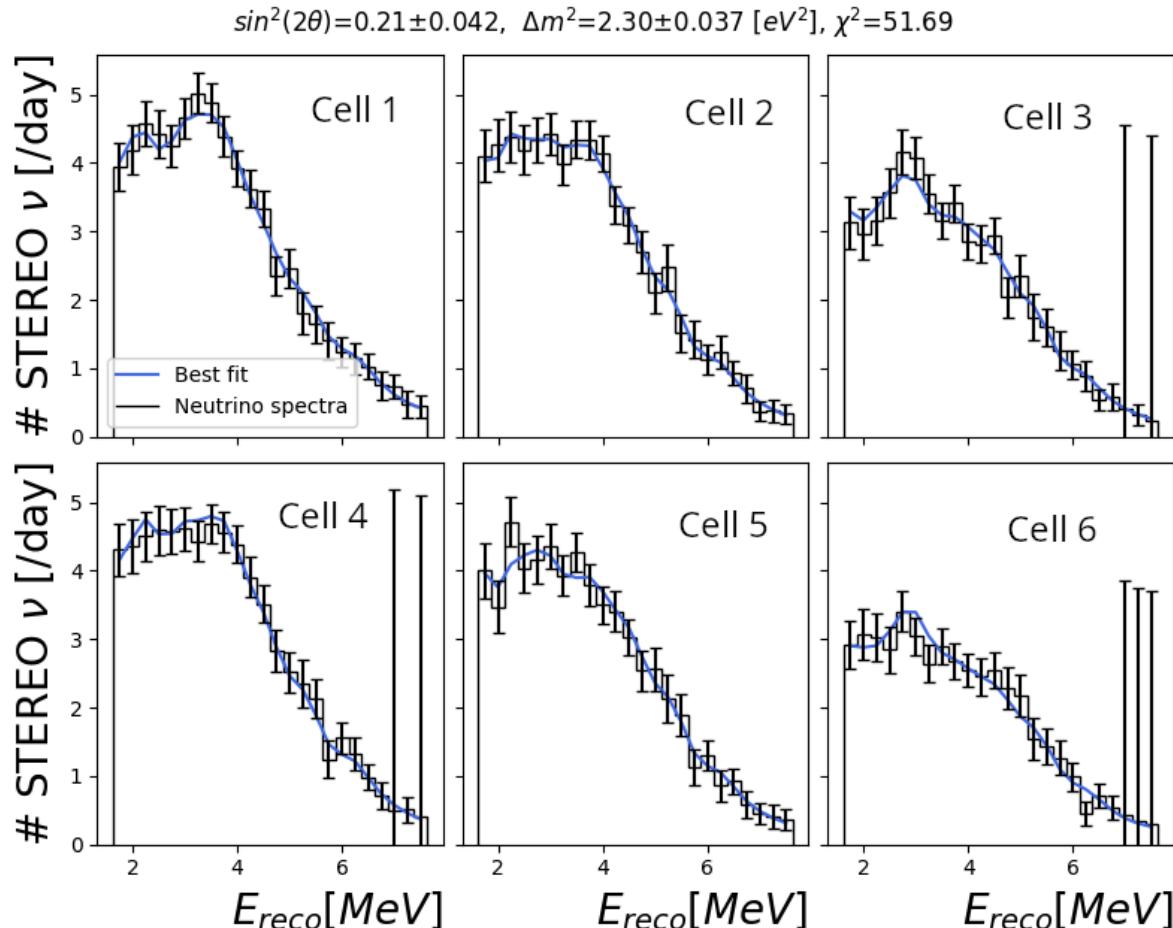
$$\hat{R}_{\text{cij}}(E_{\text{reco;i}}, \vec{p} \mid E_{\text{true;j}}) = f \times \frac{\mathcal{L}\text{eak}(E_{\text{reco;i}}, \mu_{\mathcal{L}\text{eak}}, \sigma_{\mathcal{L}\text{eak}} \mid E_{\text{true;j}})}{\int \mathcal{L}\text{eak}(E_{\text{reco;i}}, \mu_{\mathcal{L}\text{eak}}, \sigma_{\mathcal{L}\text{eak}} \mid E_{\text{true;j}}) dE_{\text{reco;i}}} + \\ (1 - f) \times \frac{\mathcal{C}\text{ore}(E_{\text{reco;i}}, \mu_{\mathcal{C}\text{ore}}, \sigma_{\mathcal{C}\text{ore}} \mid E_{\text{true;j}})}{\int \mathcal{C}\text{ore}(E_{\text{reco;i}}, \mu_{\mathcal{C}\text{ore}}, \sigma_{\mathcal{C}\text{ore}} \mid E_{\text{true;j}}) dE_{\text{reco;i}}}$$

- Extracted from neutrino MC dataset
- Defined for each experiment baselines

$$\varphi_{ci} = \sum_j R_{cij}(\pi_{cp}) \mathcal{P}_{cj}(\Omega) \varepsilon_{cj} \Phi_j(\vec{\kappa})$$



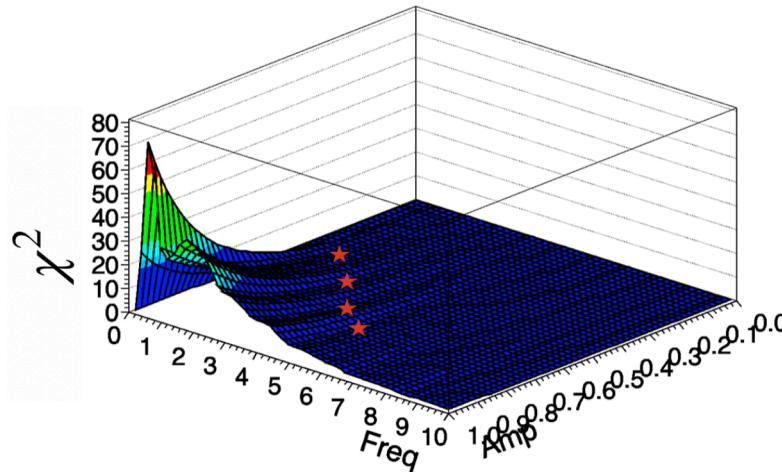
Exemple d'ajustement



- Spectre en neutrino “mesuré” (noir)
- En bleu le spectre ajusté avec tous les paramètres libres
- Observation de schémas d’oscillations différentes dans chaque cellule
- On retrouve des valeurs ajustées proches de l’hypothèse de génération

$$\mathcal{P}_{\text{cj}}(\sin^2(2\theta_{14}), \Delta m_{14}^2) = \left\langle 1 - \sin^2(2\theta_{14}) \sin^2 \left(1.27 \times \Delta m_{14}^2 \frac{L_c}{E_{\text{true;j}}} \right) \right\rangle$$

- Survival probability averaged on each E_{true} bin.
- Constant baseline for each cell (9.427, 9.773, 10.13, 10.48, 10.84, 11.18) meters.

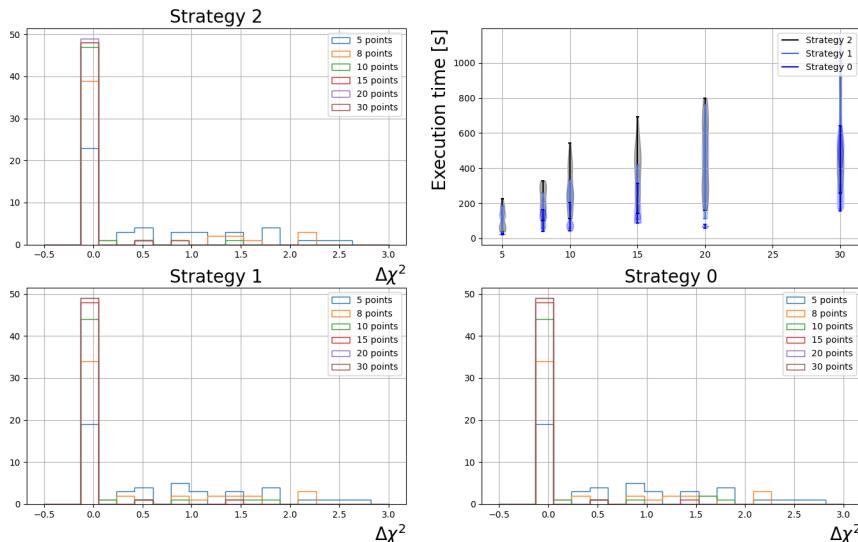


Le comportement sinusoïdal des oscillations selon la fréquence, avec le choix du binning du spectre observé, induit une succession de minima locaux à explorer.

- Minuit2, algorithme de descente de gradient
- Difficile pour les descentes de gradient de passer de “vallée” en vallée
- ⇒ Recherche de stratégies de minimisations additionnelles

Loïc Labit, **Very short baseline neutrino oscillations study with the STEREO detector at ILL.**, Insp: 2049443

- Échantillonage dans le plan ou dans l'axes en fréquences.
- Plusieurs étapes de minimisations.
- Paramètres de nuisances fixés ou libres.
- Paramètres d'oscillations fixés ou libres.



- On fait varier le nombre de points en fréquences et la stratégie de minuit.
- χ^2 ‘optimal’ fixé comme étant celui pour 100 points en fréquence avec la stratégie 2.
- Impact de la stratégie limité sur la fiabilité du fit.

