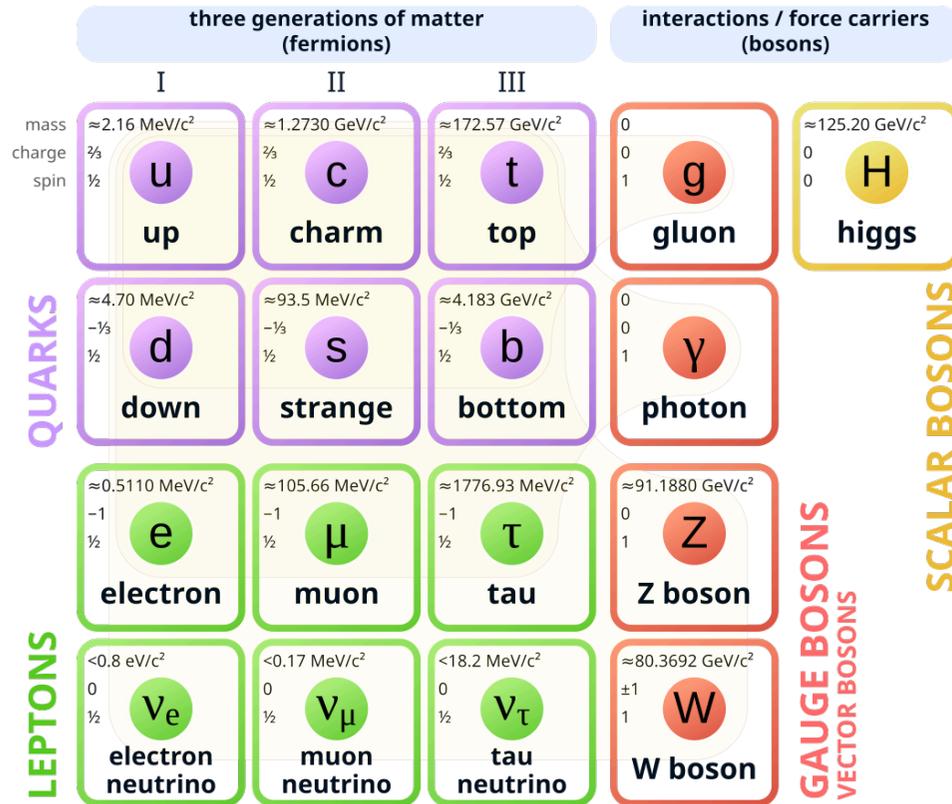

Recherche d'oscillations induites par un neutrino stérile utilisant les données des expériences STEREO, PROSPECT et Daya Bay.

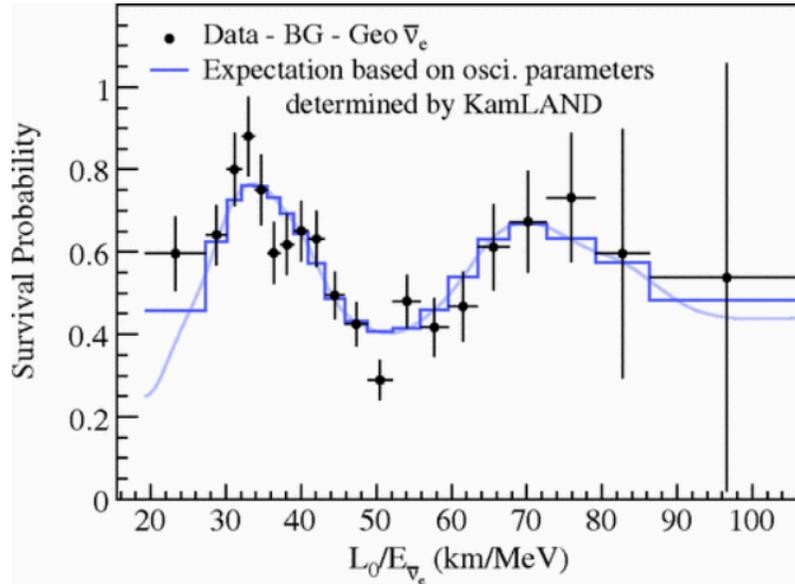
CSI première année, vendredi 27 septembre 2024.

Yann Querlioz

Standard Model of Elementary Particles



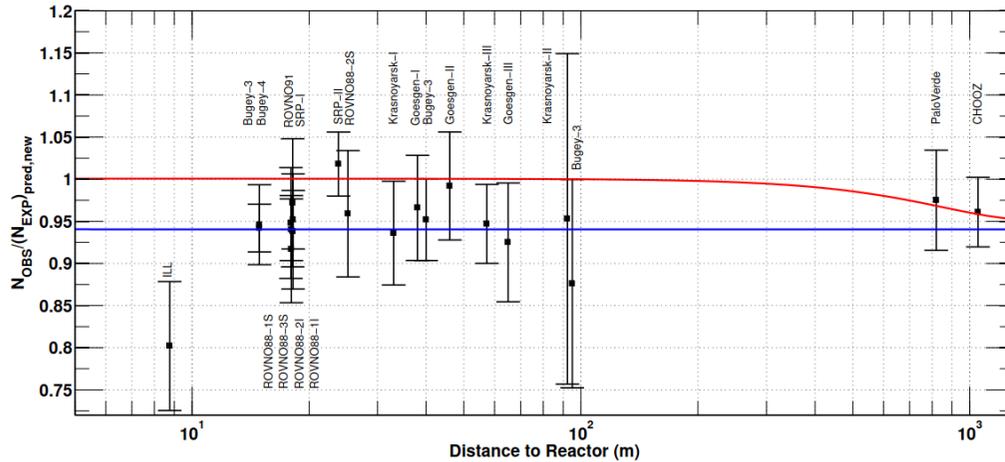
- Leptons sans charge électrique
- Interaction faible uniquement
- Produit par courant chargé avec un des trois leptons chargés
- Nombre de “saveurs” associées à la particule produite
- Propriété fondamentale, les oscillations des neutrinos



$$\mathcal{P}_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e} = 1 - \sin^2(2\theta_{12}) \sin^2\left(\Delta m_{12}^2 \frac{L}{E_\nu}\right)$$

- KamLAND, 2008: mesure d'anti-neutrino de réacteurs à des distances $\approx 60\text{km}$
- La probabilité de mesurer une saveur de neutrino donnée, est fonction du rapport L/E
- A permis d'expliquer le déficit expérimental mesuré dans le flux des neutrinos solaires

KamLAND Collaboration, **Precision Measurement of Neutrino Oscillation Parameters with KamLAND**, *PhysRevLett.100.221803*



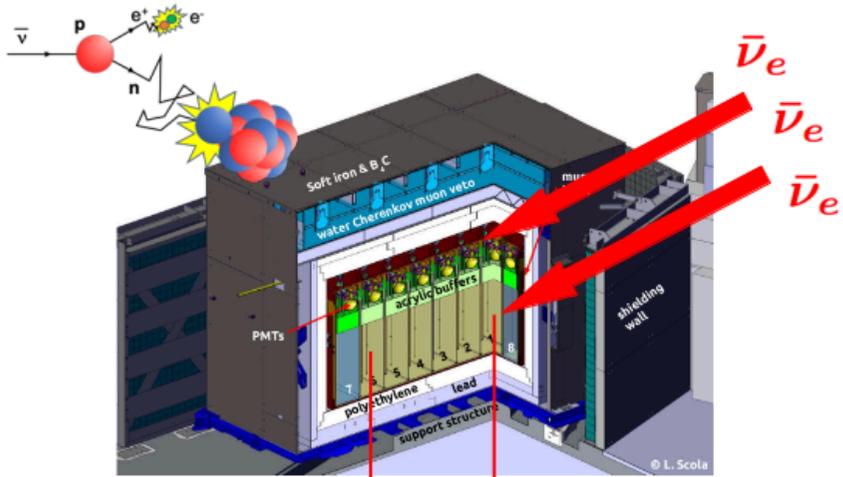
G. Mention and all, **The Reactor Antineutrino Anomaly**, *J. Phys.: Conf. Ser.* 408 012025

Illustration de l'anomalie réacteur.

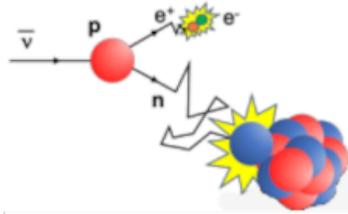
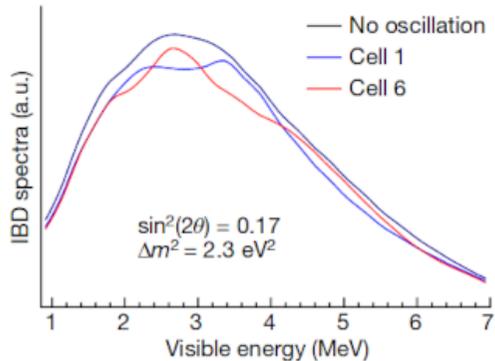
(red) flux prédit pour 3 saveurs

(blue) flux prédit pour 4 saveurs.

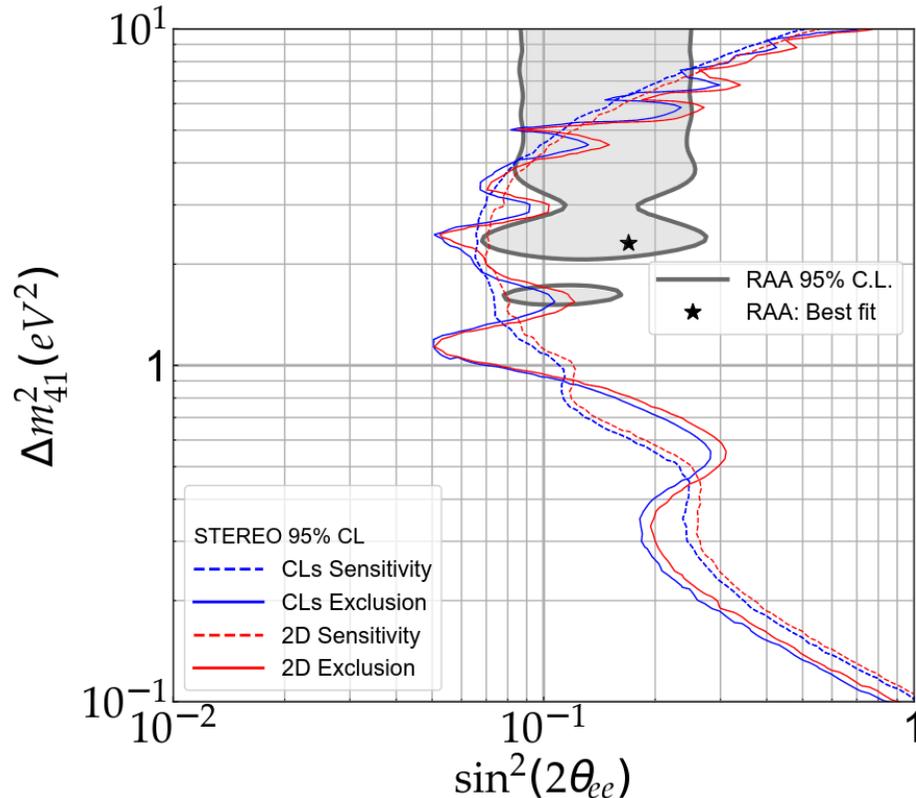
- Déficit de 6% à 3σ CL, sur le flux d'antineutrino attendu mesuré par plusieurs expériences
- Interprété comme une amplitude moyenne ($\sin^2(2\theta_{ee})$) d'oscillation à haute fréquence (Δm_{ee}^2) d'une nouvelle saveur lourde



11.3 m 9.4 m



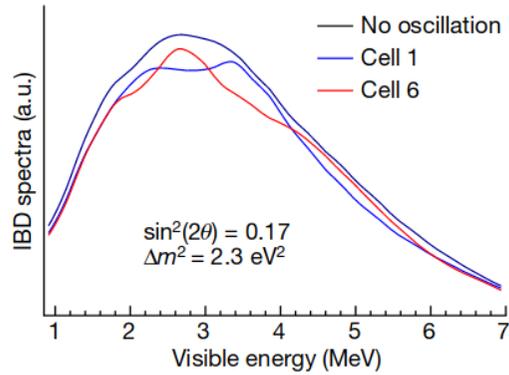
- Interaction des neutrinos via désintégration beta inverse
- Scintillateur liquide dopé Gadolinium
- Mesure des photons de scintillation dans des photo-multiplicateurs



- Données phase 2 + phase 3.
- 107 558 candidats IBD.
- Exclusion de l'hypothèse des neutrinos stériles à plus de 4σ pour les valeurs de la RAA.

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

Nature 613 (2023) 7943, 257-261



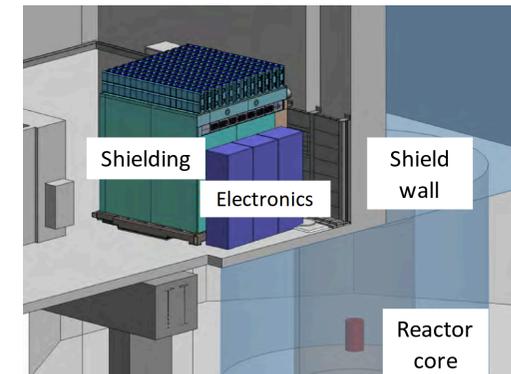
STEREO:

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

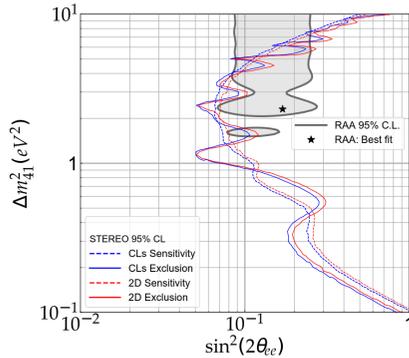
STEREO collaboration, **The STEREO experiment**, *JINST 13 (2018) 07, P07009*

Prospect:

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



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

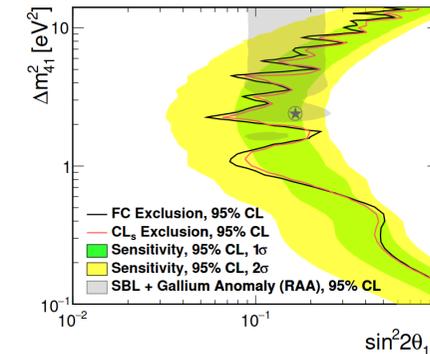


STEREO:

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

Prospect:

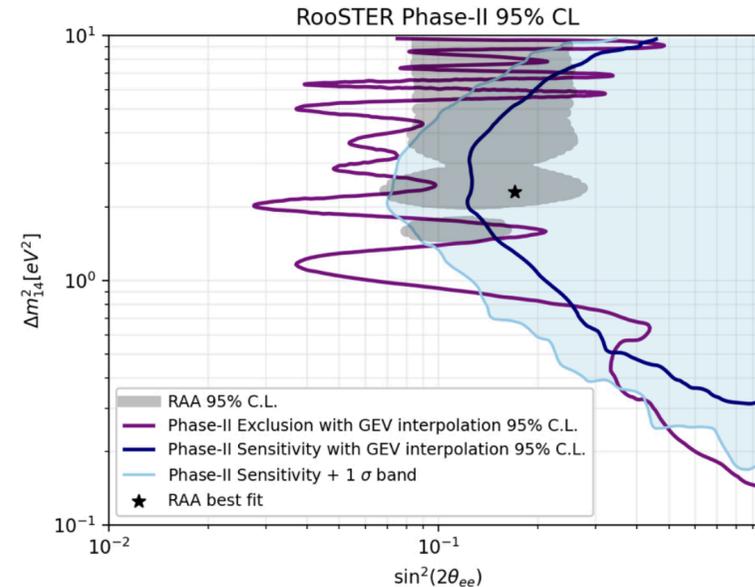
- Faible distance, grande ségmentation
- Meilleur rapport S/B, moins de statistiques
- Quasiment le même spectre réacteur



Prospect collaboration, **Improved Short-Baseline Neutrino Oscillation Search and Energy Spectrum**

Measurement with the PROSPECT Experiment at HFIR, *arXiv:2006.11210*

- 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*

Problème temps de calcul ancien framework

- Temps de calcul de 24h par ajustement pour la phase 2.
- Pour $\approx 4M$ d'ajustement
- + 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 bibliothèques 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

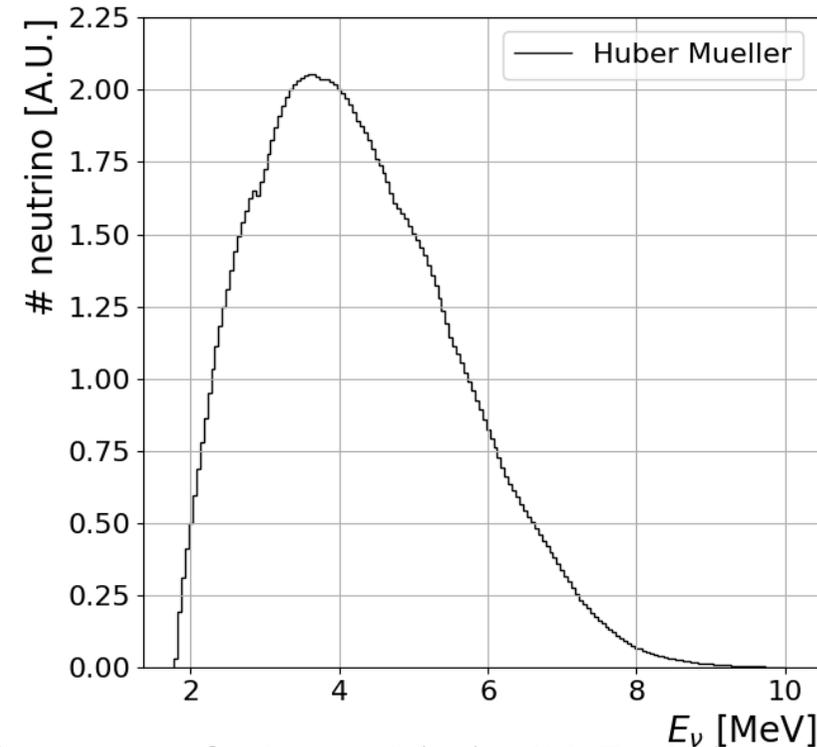
⇒ Diminution du temps d'ajustement à ≈ 10 min

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

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

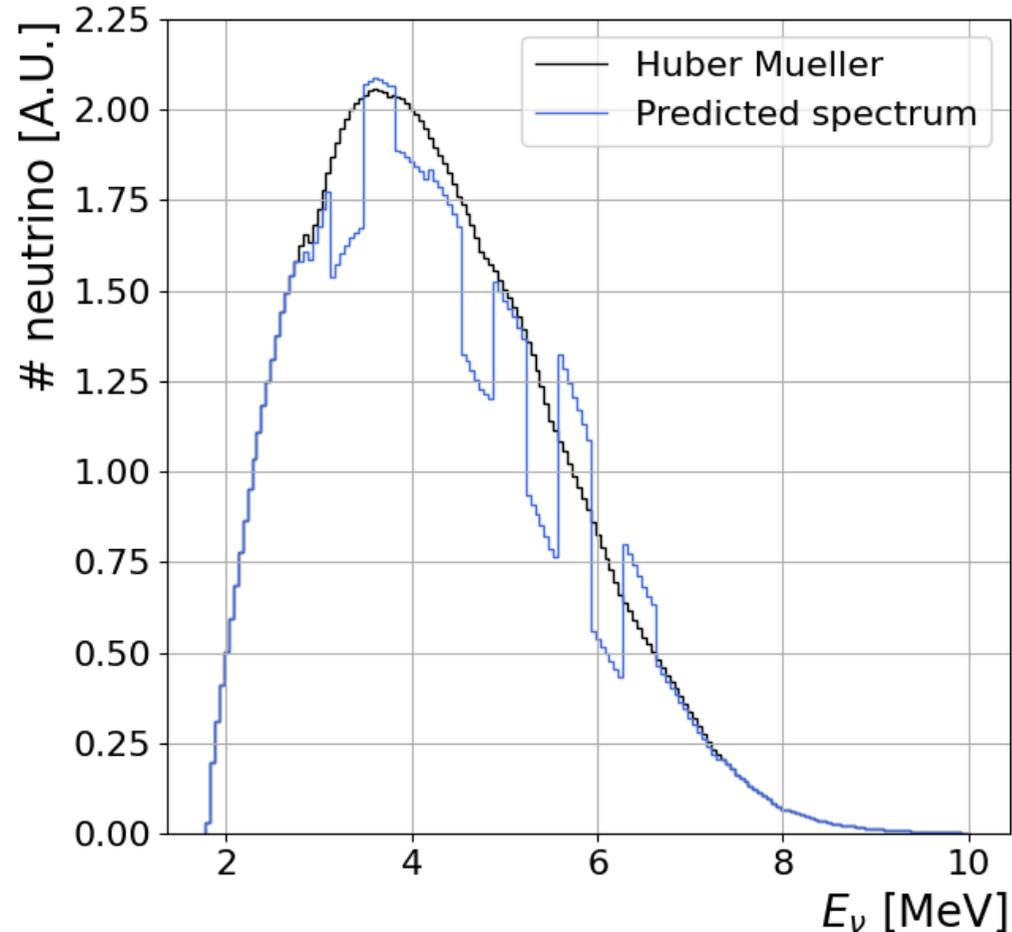
- On normalise, par cellule (c), la prediction φ_{ci} aux données D_{ci}
- Perd la dépendance au flux total, mais moins de sensibilité à certaines fréquences
- Forme du spectre de réacteur Φ libre pendant les ajustements

- Spectre des anti-neutrinos de réacteur de référence (noir)
- Huber Mueller, standard en physique des neutrinos. Issue de mesures sur feuilles d'isotopes
- \Rightarrow Source importante de systématiques



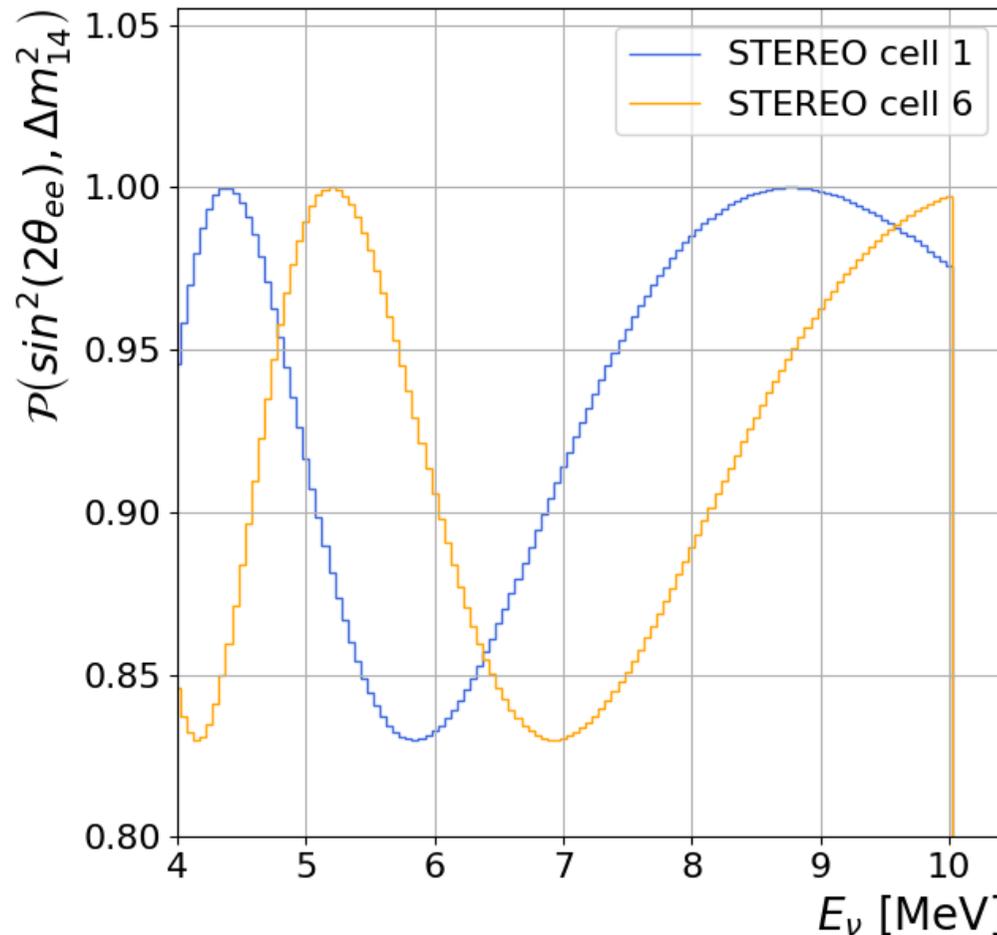
STEREO collaboration, **First antineutrino energy spectrum from U235 fissions with the STEREO detector at ILL.**, *Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 48 075107

- Spectre en neutrinos mesuré du toy RAA (bleu)
- Ajout de paramètres de nuisances \vec{K}
- Spectre libre de varier par tranche de 350 keV
- Communs à toutes les cellules \Rightarrow ne peuvent pas imiter des oscillations

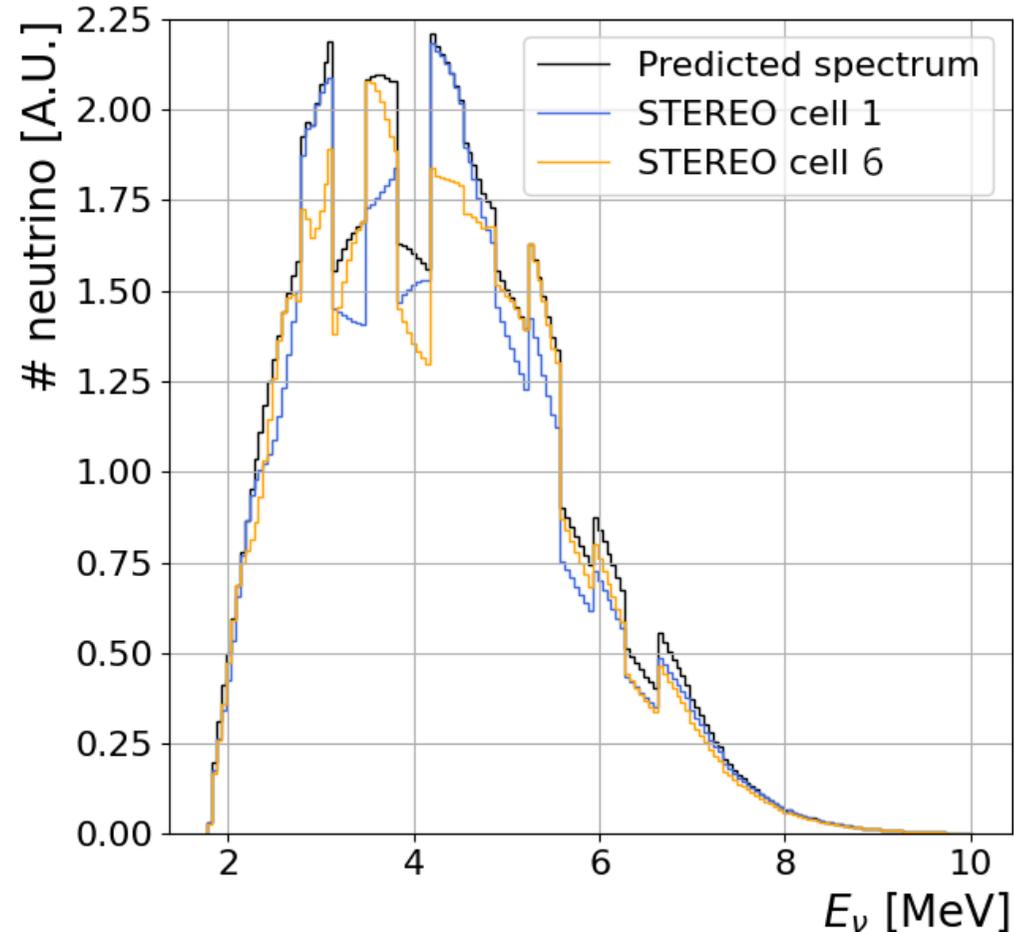


$$\Omega \stackrel{\text{def}}{=} (\sin^2(2\theta_{ee}), \Delta m_{14}^2)$$

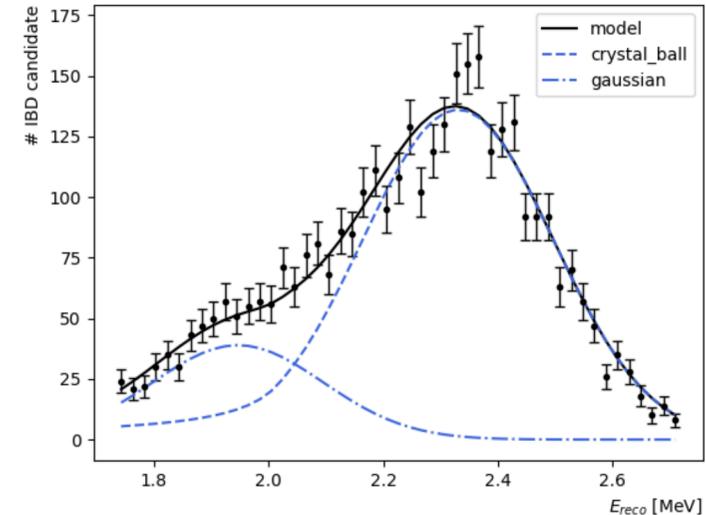
- $\sin^2(2\theta_{ee})$ l'amplitude des oscillations
- Δm_{14}^2 la fréquence d'oscillation
- Probabilité d'oscillation, pour la cellule 1 (bleu), pour la cellule 6 (orange)
- Les paramètres physiques d'intérêt

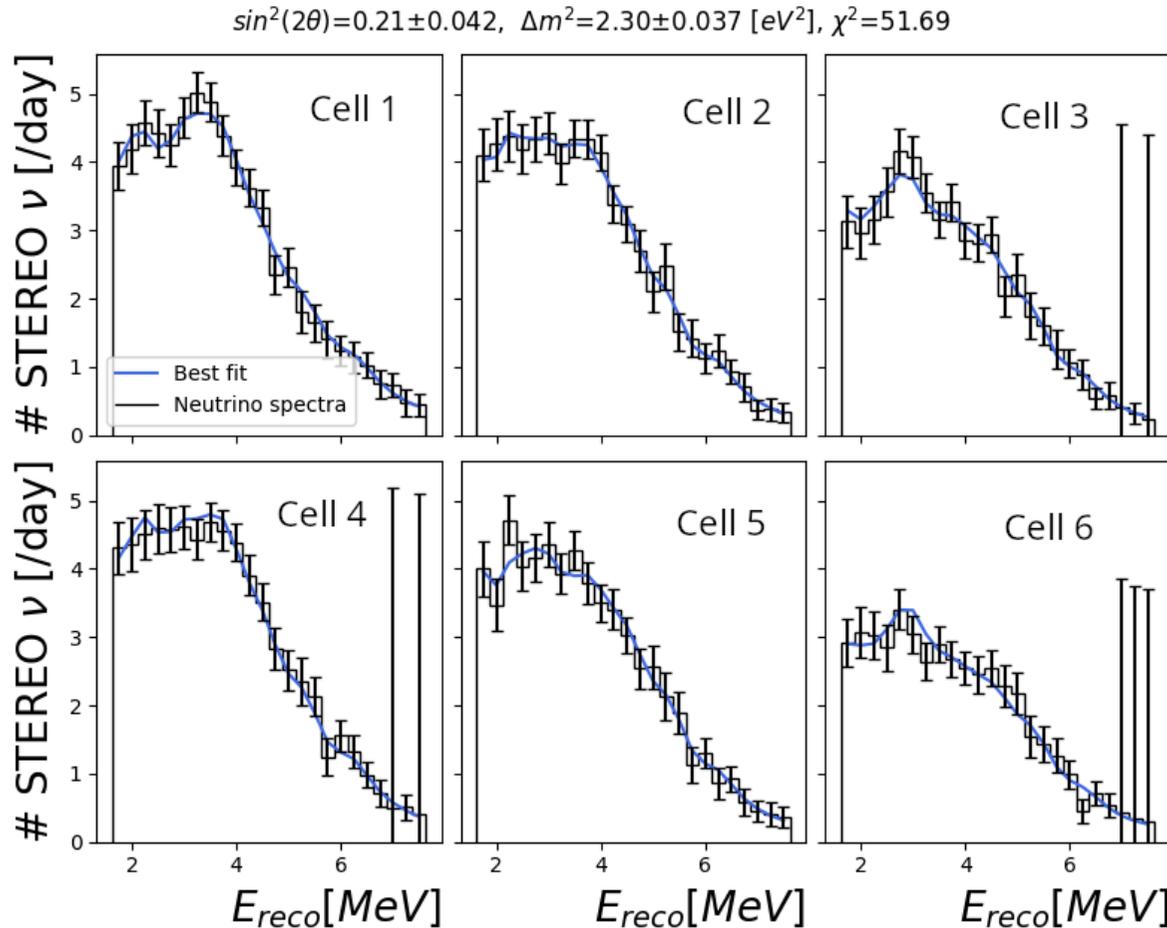


- Spectre en neutrino prédit (noir)
- Spectre en neutrino mesuré après oscillations pour la cellule 1 (bleu) et la cellule 6 (orange)
- Unique à chaque cellule

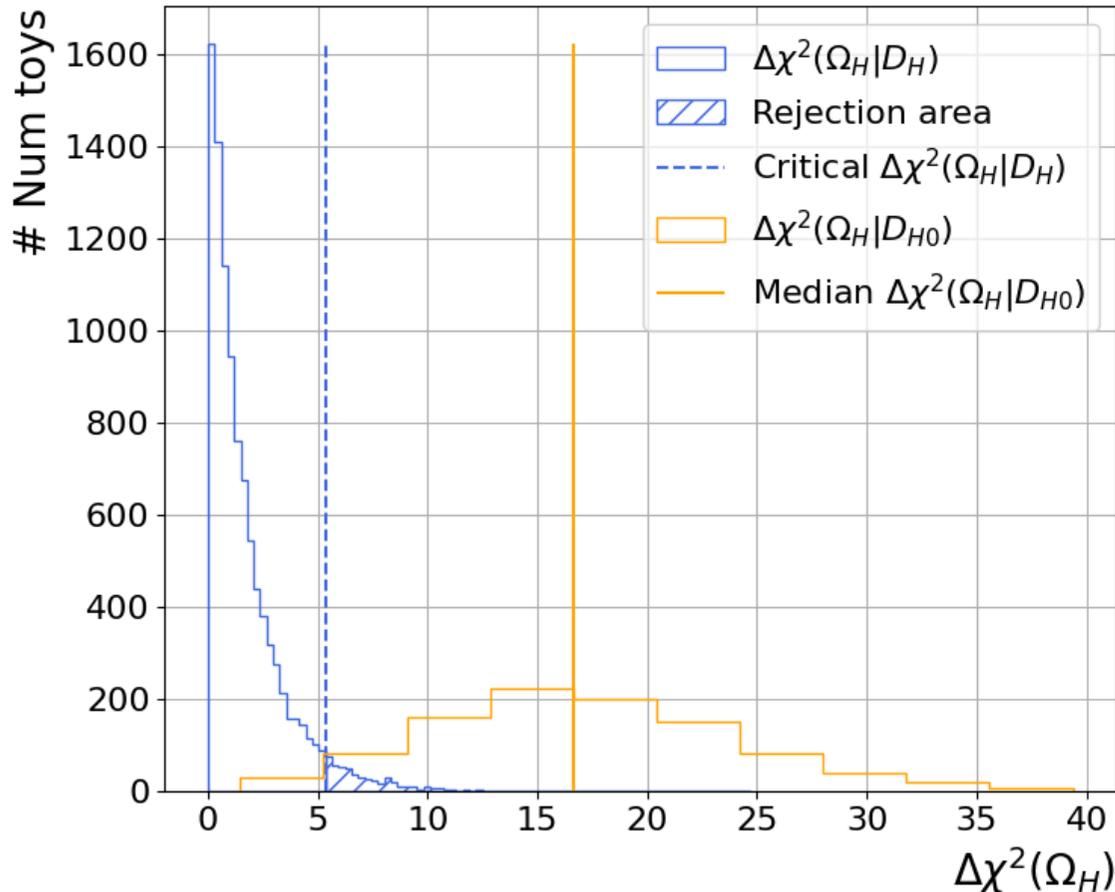


- Modélise la conversion entre l'énergie du neutrino et l'énergie reconstruite
- Un modèle ajusté par cellule en fonction de l'énergie de neutrinos
- Modèle $\stackrel{\text{def}}{=} \text{PDF}$ à 2 composantes fonction de $(E_{\text{reco};i})$;
 - ▶ Une Gaussienne pour les évènements contenues
 - ▶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





- 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

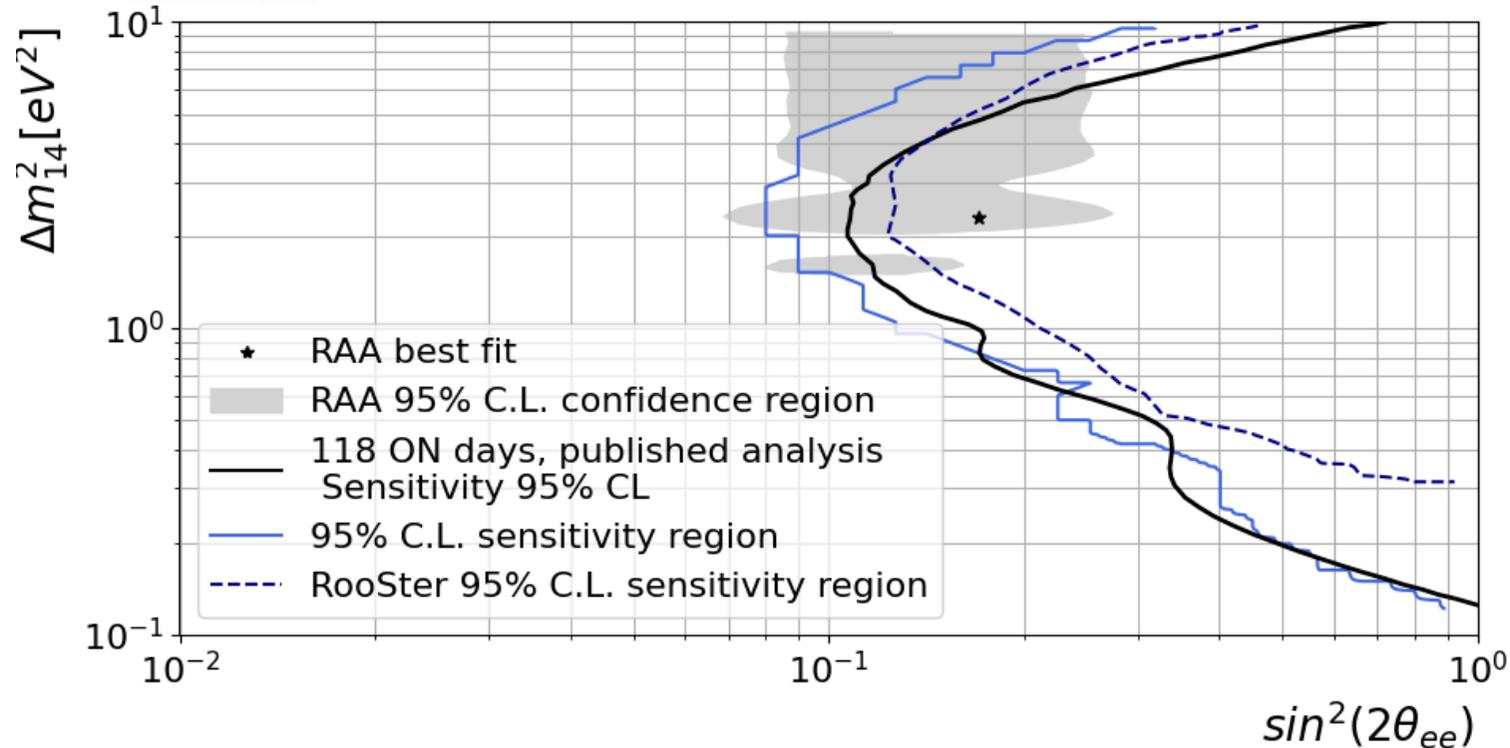


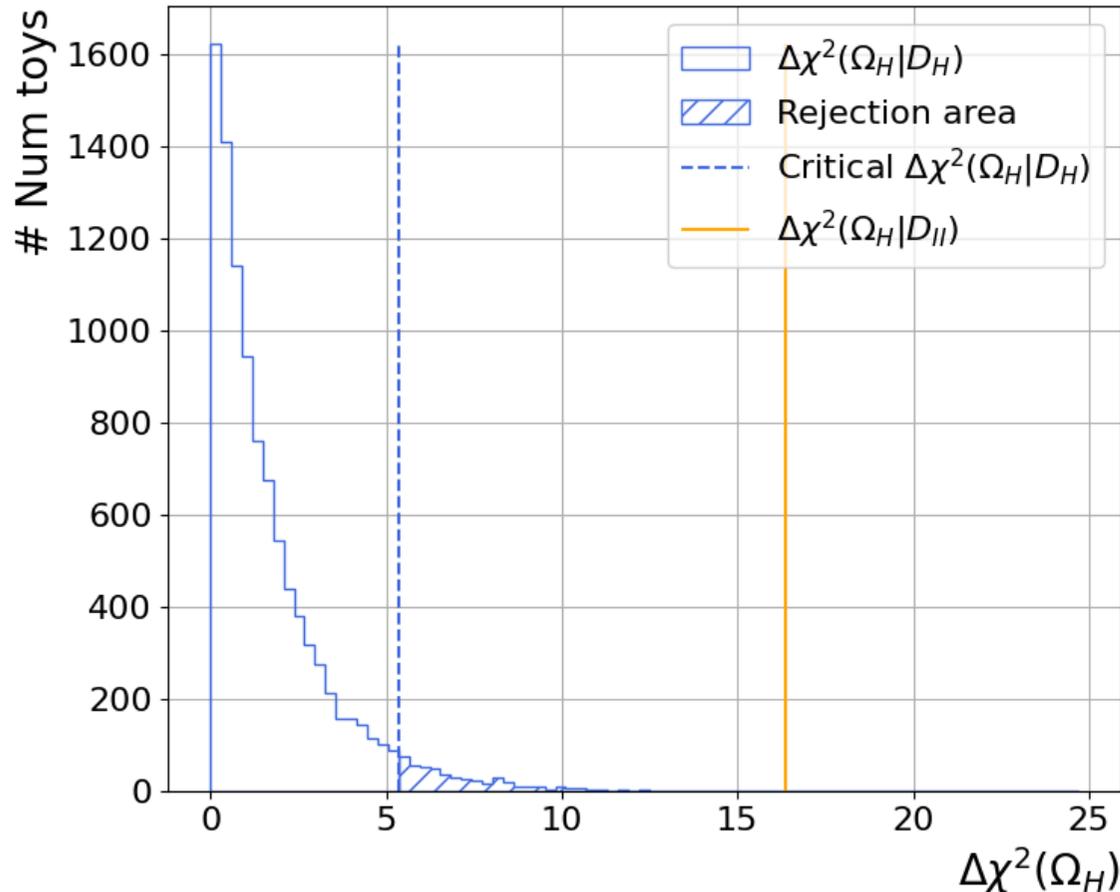
$$\Omega_H = (0.17 \text{ } 2.3\text{eV}^2)$$

- Distribution de χ^2 de l'hypothèse RAA (Ω_H) pour des “toys” RAA (D_H): $\Delta\chi^2(\Omega_H|D_H)$
- Comparé à la distribution de χ^2 de l'hypothèse RAA pour des “toys” hypothèse nulle (D_{H0}): $\Delta\chi^2(\Omega_H|D_{H0})$



Sensibilité trop suspecte, à comprendre
Proche de la valeur attendue à 50% C.L..





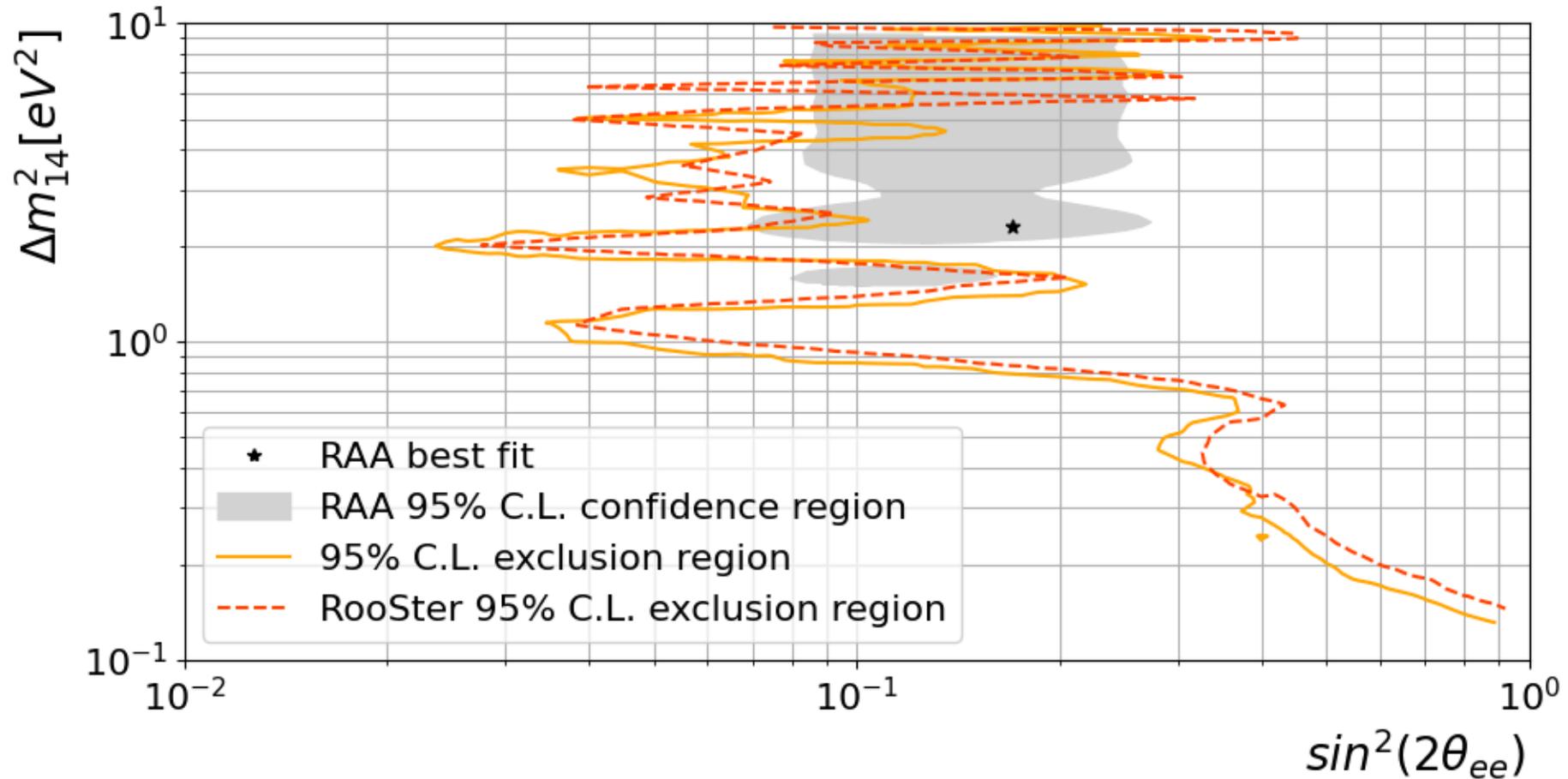
$$\Omega_H = (0.17 \text{ } 2.3\text{eV}^2)$$

Comparaison de la distribution de vraisemblance

$$\Delta\chi^2(\Omega_H|D_H)$$

avec la vraisemblance des données $\Delta\chi^2(\Omega_H|D_{II})$ plutôt que la médiane des toys D_{H0}

⇒ On exclut la RAA à plus de 4σ



Conclusion:

- Reproduction d'un contour d'exclusion similaire à celui de l'analyse précédente
- Problème avec le contour de sensibilité. À étudier...

Perspectives:

- Développement d'un modèle analytique de réponse pour Prospect
- Ajout des données de Prospect comme des cellules supplémentaires de STEREO
- Plus long terme :
 - Inclusion, dans l'analyse, des résultats de Daya-Bay
 - Étude de sensibilité à la phase δ_{CP} dans DUNE

Formations réalisé:

- Formations obligatoires : journée d'intégration, éthique de la recherche
- Enseignement TP au bourget, 16h équivalent TD
- Formation Santé sécurité au travail, 14h
- Ecole de GIF en septembre 2023

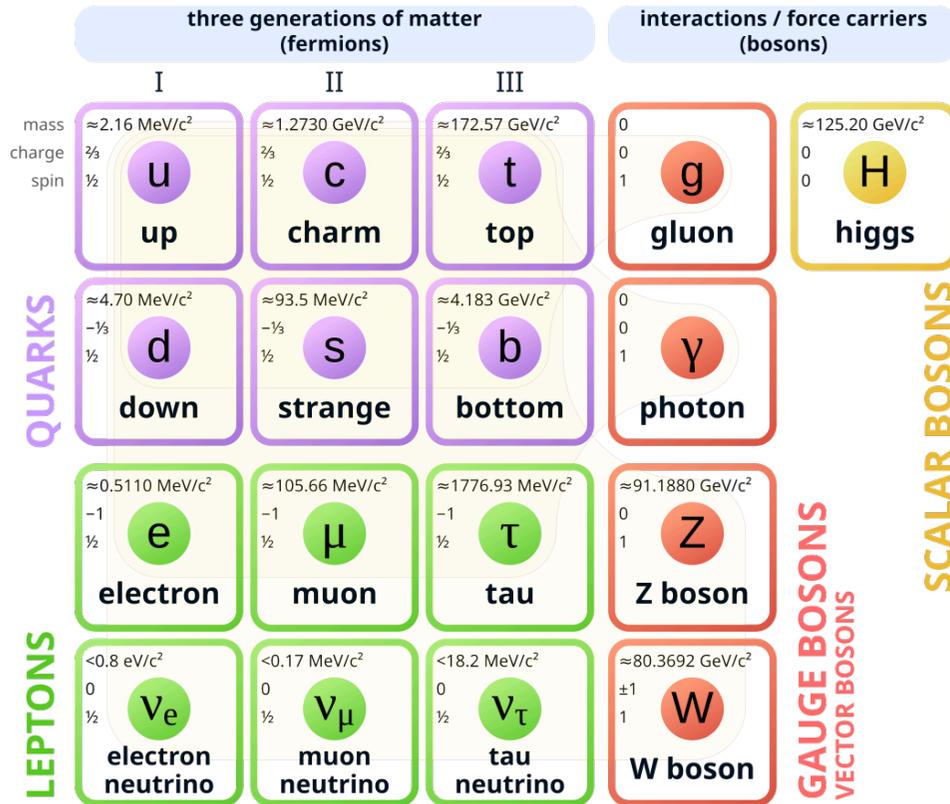
Formations prévues:

- Enseignements de TD à l'IUT (10h30)
- Sécurité et cryptographie (40h)
- MOOC Doctorat et poursuite de carrière (24h)

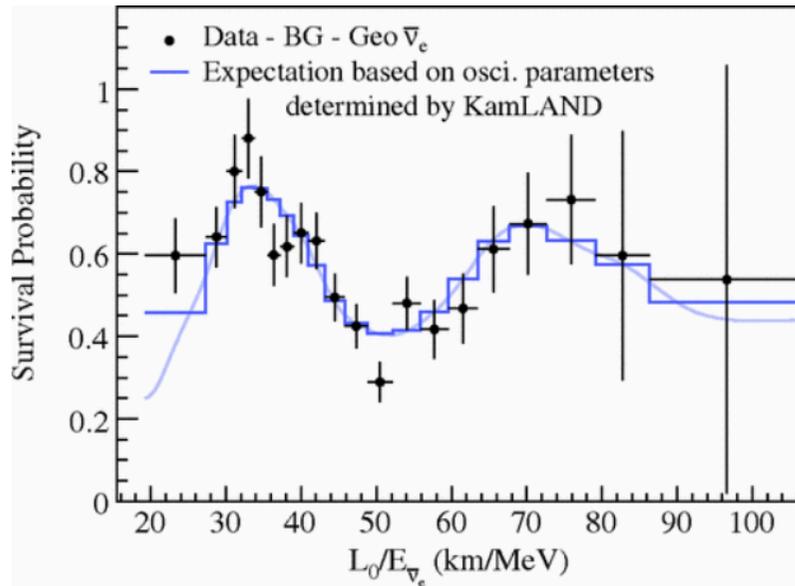
Merci !

Backup...

Standard Model of Elementary Particles



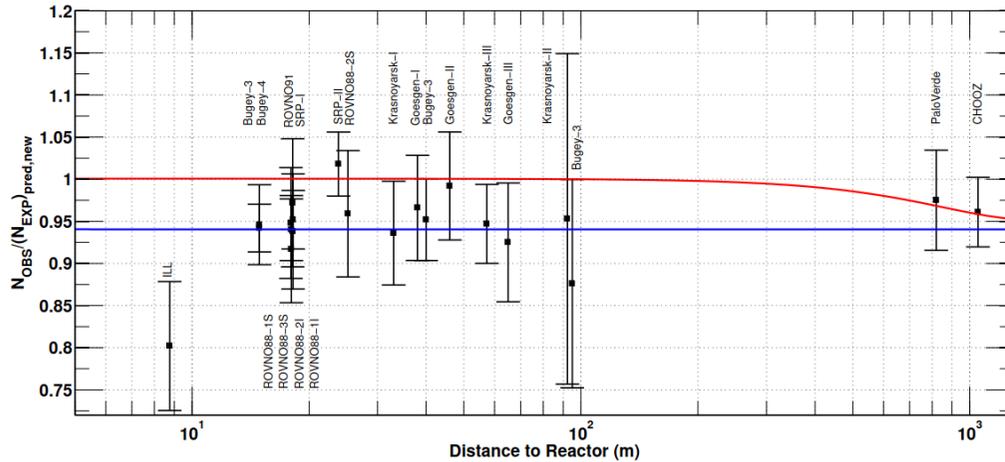
- Leptons sans charges électriques
- Très faible probabilité d'interaction
- Produit par courant chargé avec un des trois leptons chargés
- Nombre de "saveur" associées à la particule produite
- Propriété fondamentale, les oscillations des neutrinos



$$\mathcal{P}_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e} = 1 - \sin^2(2\theta_{12}) \sin^2 \left(1.27 \times 10^3 \Delta m_{12}^2 \frac{L}{E_\nu} \right)$$

- Variations sinusoïdales fonction de L/E de la probabilité de mesurer un saveur de neutrino donnée
- Mis en évidence expérimentalement dans les années 2000
- A permis d'expliquer le déficit expérimental mesuré dans le flux des neutrinos solaires

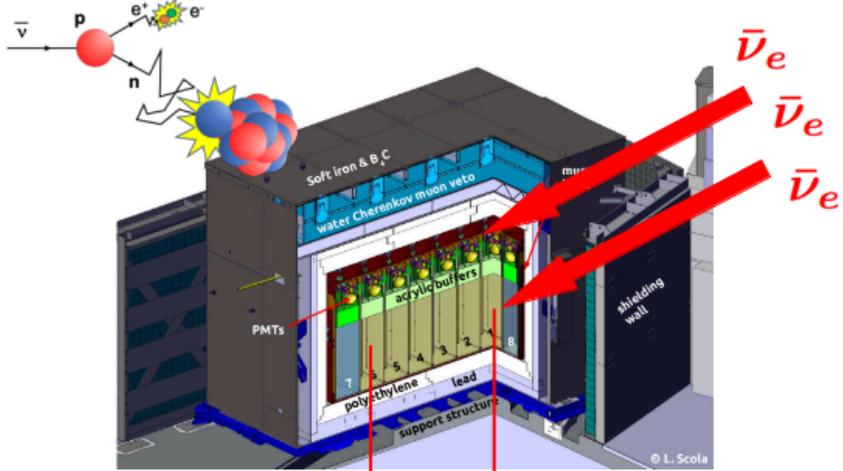
KamLAND Collaboration, **Precision Measurement of Neutrino Oscillation Parameters with KamLAND**, *PhysRevLett.100.221803*



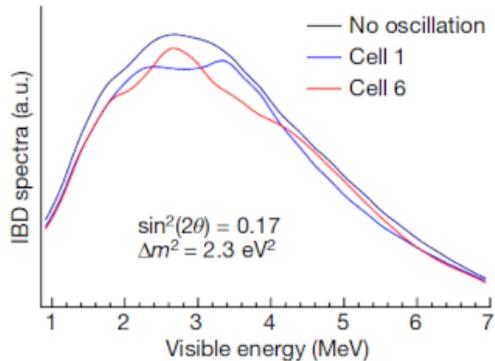
G. Mention and all, **The Reactor Antineutrino Anomaly**, *J. Phys.: Conf. Ser.* 408 012025

Illustration de l'anomalie réacteur.
(red) flux optimal (blue) déficit moyen
expérimentale.

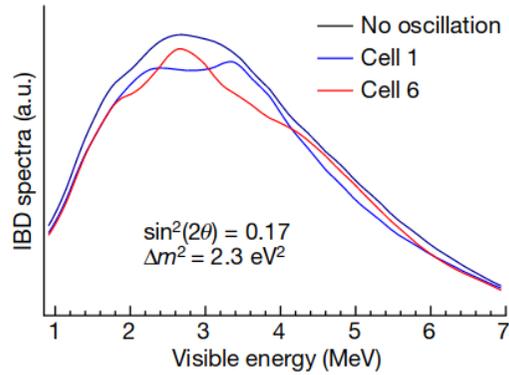
- Déficit de 6% à 3σ CL, sur le flux d'antineutrino attendu mesuré par plusieurs expériences
- Interprété comme une amplitude moyenne ($\sin^2(2\theta_{ee})$) d'oscillation à haute fréquence (Δm_{ee}^2) d'une nouvelle saveur lourde



11.3 m 9.4 m



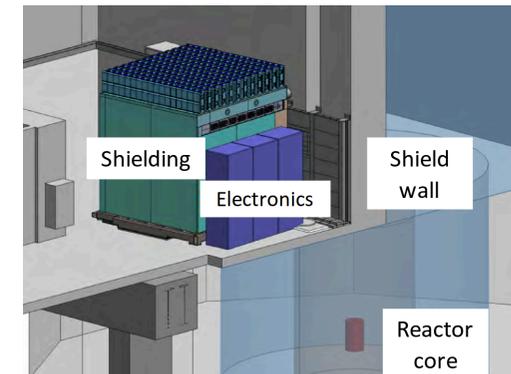
- Interaction des neutrinos via désintégration beta inverse
- Scintillateurs liquides dopés Gadolinium
- Mesure des photons de scintillation dans des photo-multiplicateurs



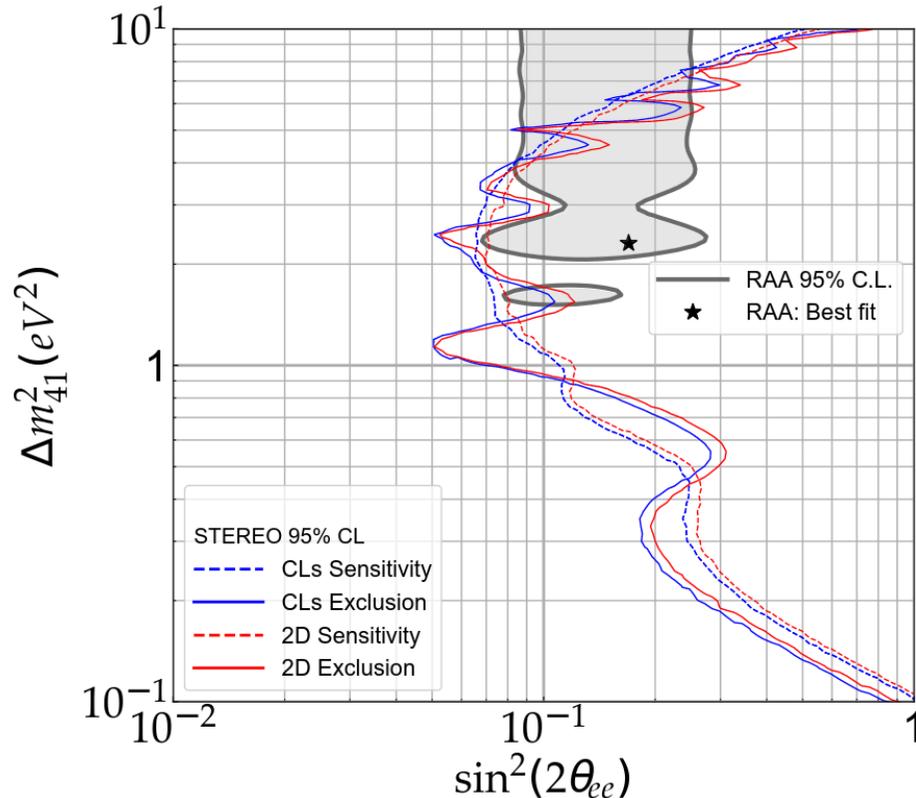
- STEREO
- Faible distance 9 à 11 m, 6 scintillateurs actifs
- $S/B \approx 1$, plus de statistiques
- *Objectif*: Réaliser une mesure d'oscillation indépendamment du spectre réacteur.

STEREO collaboration, **The STEREO experiment**, *JINST 13 (2018) 07, P07009*

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



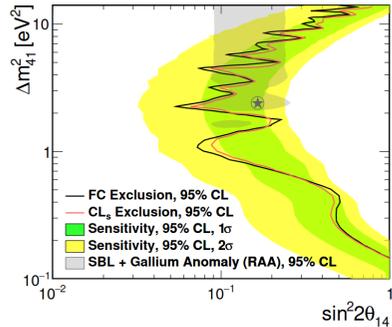
Prospect collaboration, **The PROSPECT Reactor Antineutrino Experiment**, *j.nima.2018.12.079*



- Données phase 2 + phase 3.
- 107 558 candidats IBD.
- Exclusion de l'hypothèse des neutrinos stériles à plus de 4σ pour les valeurs de la RAA.

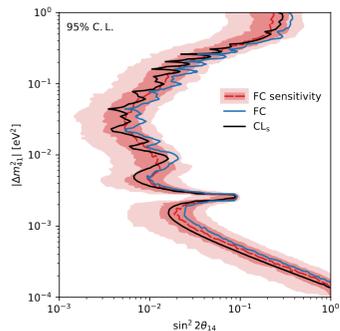
STEREO collaboration, **STEREO neutrino spectrum of ^{235}U fission rejects sterile neutrino hypothesis**,

Nature 613 (2023) 7943, 257-261



- 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*



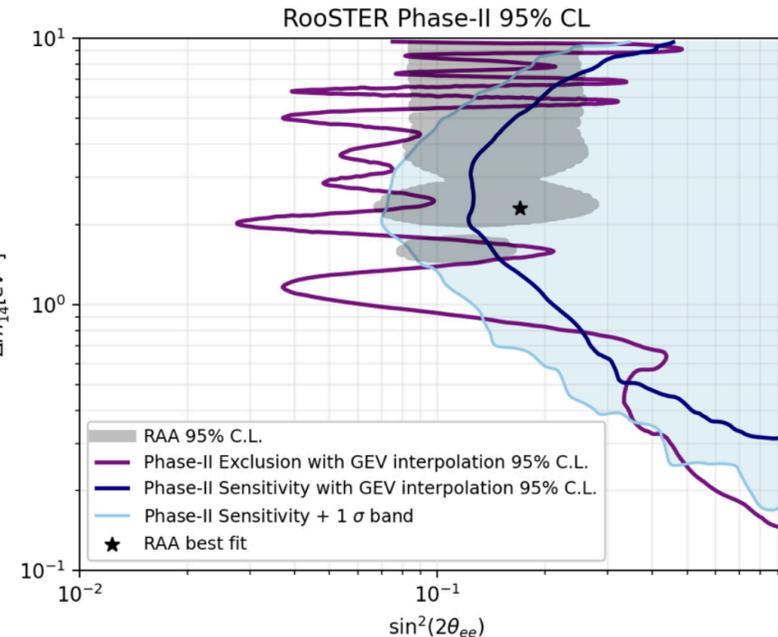
- Mesure de $\sin^2(2\theta_{13})$ comme objectif principale
- Combustible Pu + U fuel, réacteur civile → nuisance additionnelle
- Faible bruit de fond (quelques %)
- Distance à la source $\approx 1\text{km} \Rightarrow$ Sensible aux faibles valeurs de Δm^2 .

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

- Fit joint des 3 échantillons, plus de statistiques, sensibilité aux bases masses.
- Paramètres de nuisances communs: spectre U235.

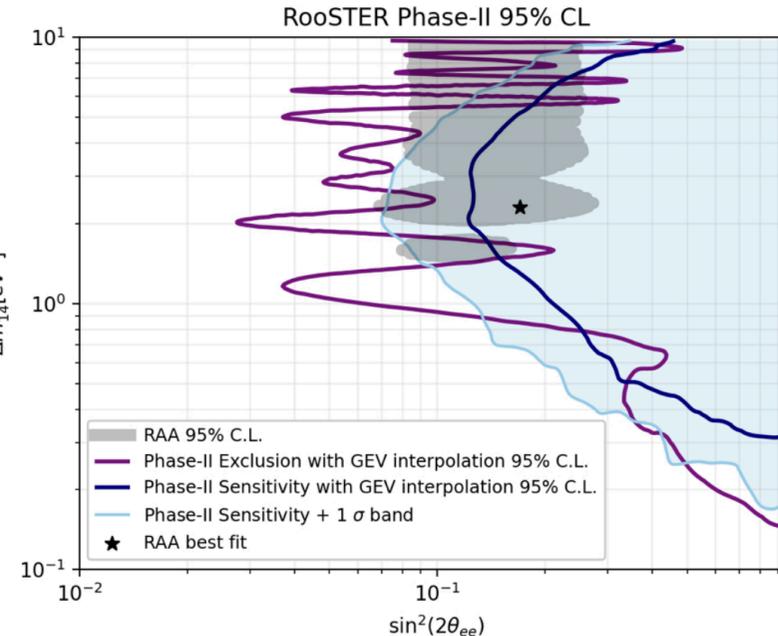
- Shape only analysis.
- Exclusion contour only, no spectrum measurement.
- Spectrum free in oscillation fit, common U235 spectrum for Prospect and STEREO.
- DB: Same U235 + fixed Pu contribution? Or additional nuisance parameters?

- Alternative analysis for phase 2.
- Shape only fit.
- RooFit based.
- No Phase 3 due to lack of manpower
- Analytical response vs G4 for published STEREO analysis.
- LAPP DPS analysis largely follows same approach.



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

- Analyse des données phase 2
- Basé sur un ajustement “shape only”
- développé avec le framework RooFit
- Pas étendu aux données phase 3 du à un manque de moyens humains
- Notre analyse sur base sur une approche similaire



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

Pros:

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

Cons:

- Computationally intensive fit, high dimensionality of parameter space due to number of nuisance parameters.
- Took 24h per fit for phase 2 only.
- Phase 3 + Prospect + Daya Bay → impracticably 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 d'ajustement de 24h par toy pour la phase 2. + 2000 toys par point de l'espace des phases à tester, (~10 000 points)
+ 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.
- Jax+numpy comme lib de computing pour avoir un control plus fin des étapes de calcul. (≈ 10 min/fit)
- Jax pour jit le modèle et ses possibilités d'exécution sur gpu.
- Benchmark de différents algorithmes et méthodes d'optimisation.

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

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

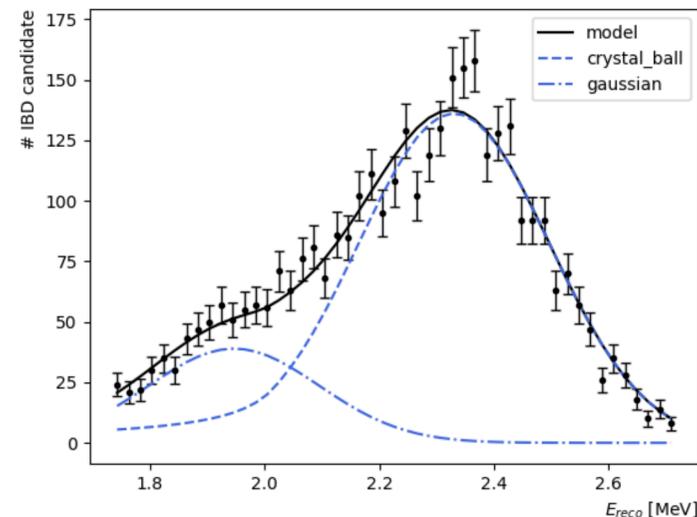
- Shape only fit, prediction φ normalised to data D .
- Less dependent on spectrum total flux, less sensitive at low-frequency oscillations.
- Antineutrino spectrum Φ free in the fit -> independent of spectrum predictions.

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

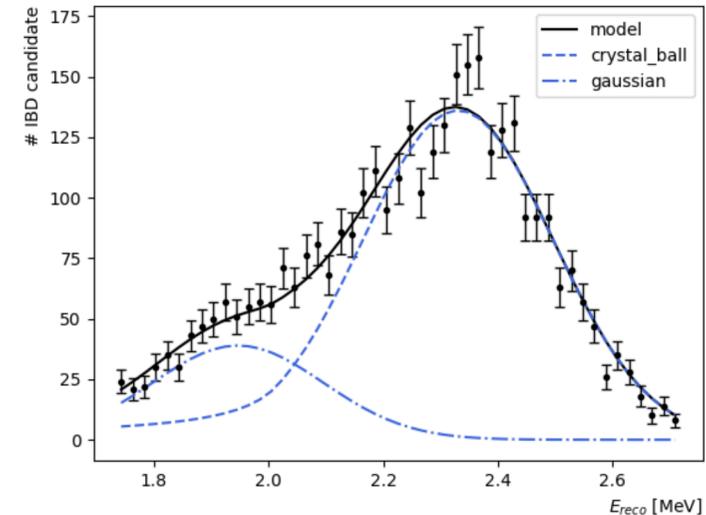
$$\chi^2 = \sum_{i,c=1..6} \frac{(N_c \varphi_{ci} - D_{ci})^2}{\sigma_i^2} + \sum_{c=1..6} \vec{\pi}_{c\vec{p}}^T \hat{V}_{c\vec{p}}^{-1} \vec{\pi}_{c\vec{p}}$$

- 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

- One model per cell fitted on MC data.
- 2 component PDF over reconstructed energy ($E_{\text{reco};i}$);
 - ▶ Core Gaussian + power law (crystal ball).
 - ▶ Leak Gaussian.
- Core Gaussian: Well reconstructed events.
- Core power law: Badly reconstructed events.
- Leak : 1 annihilation γ loss.
- Resolution: Stochastic + geometric effects (electronic noise founded compatible with 0).



- Un modèle ajusté par cellule
- Modèle $\stackrel{\text{def}}{=} \text{PDF}$ à 2 composante fonction de $(E_{\text{reco};i})$;
 - ▶ Core Gaussienne + loi de puissance (crystal ball)
 - ▶ Leak Gaussienne
 - Core Gaussienne: Distribution principale d'évènements biens reconstruits
 - Core loi de puissance: Évènements mal reconstruits
 - Leak : Évènements partiels, perte de photon d'annihilation
- Resolution: Effets stochastiques et geometriques



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

- Non-linear response allowed for mean.
- Same dependence on E_{true} for leaked energy and resolutions.

$$\begin{aligned} \mu_{\text{Core}} &= \mu_0 + \mu_1 \times E_{\text{true};j} + \mu_2 \times E_{\text{true};j}^2 \\ \mu_{\text{Leak}} &= \mu_0 + \mu_1 \times (E_{\text{true};j} - \delta) + \mu_2 \times (E_{\text{true};j} - \delta)^2 \\ \frac{\sigma_{\text{Core}}}{\mu_{\text{Core}}} &= \sqrt{a^2 + \frac{b^2}{\mu_{\text{Core}}}}; & \frac{\sigma_{\text{Leak}}}{\mu_{\text{Leak}}} &= \sqrt{a^2 + \frac{b^2}{\mu_{\text{Leak}}}} \end{aligned}$$

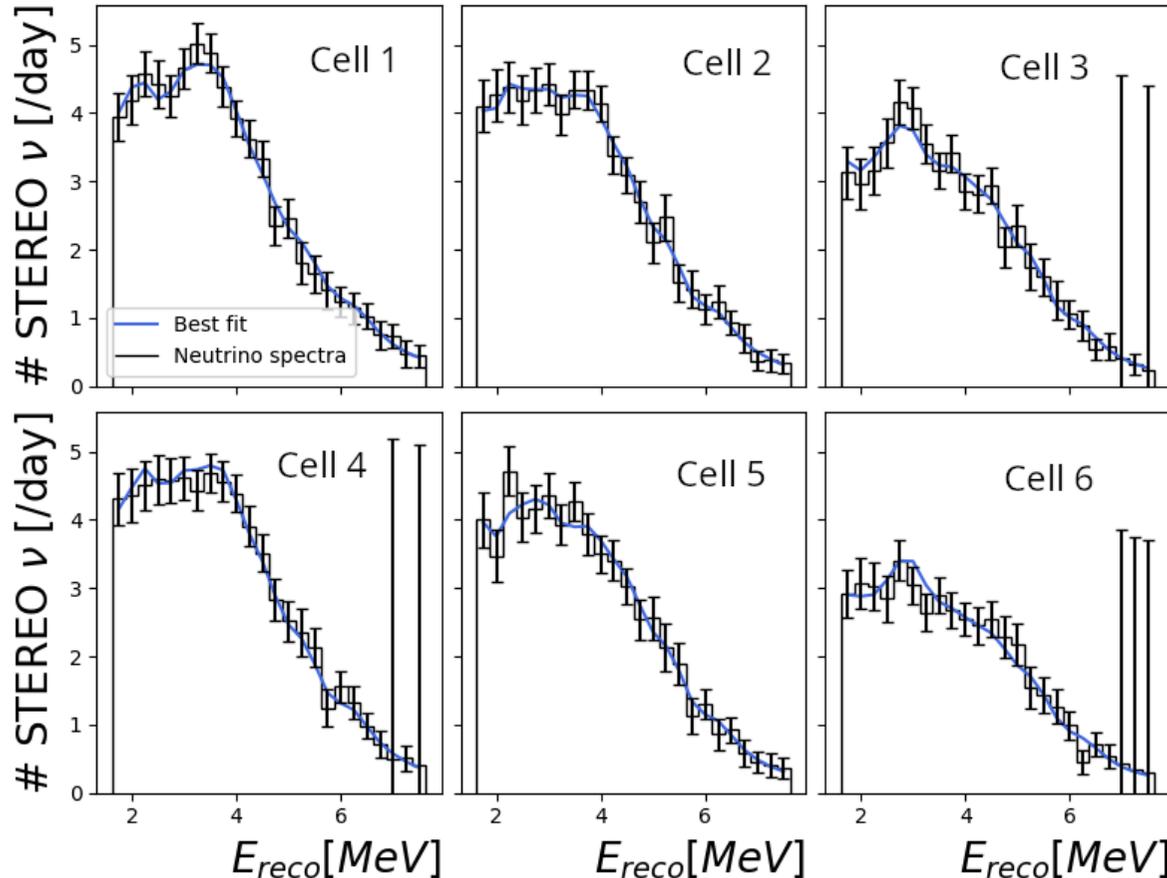
$$\begin{aligned} \hat{R}_{\text{cij}}(E_{\text{reco};i}, \vec{p} \mid E_{\text{true};j}) &= f \times \frac{\mathcal{L}_{\text{Leak}}(E_{\text{reco};i}, \mu_{\text{Leak}}, \sigma_{\text{Leak}} \mid E_{\text{true};j})}{\int \mathcal{L}_{\text{Leak}}(E_{\text{reco};i}, \mu_{\text{Leak}}, \sigma_{\text{Leak}}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

$$\vec{p}' = \vec{p} \times (1 + \vec{\pi}_{\vec{p}}) \quad \hat{V}_{\vec{p}} \doteq \text{COVARIANCE}(\vec{p})$$

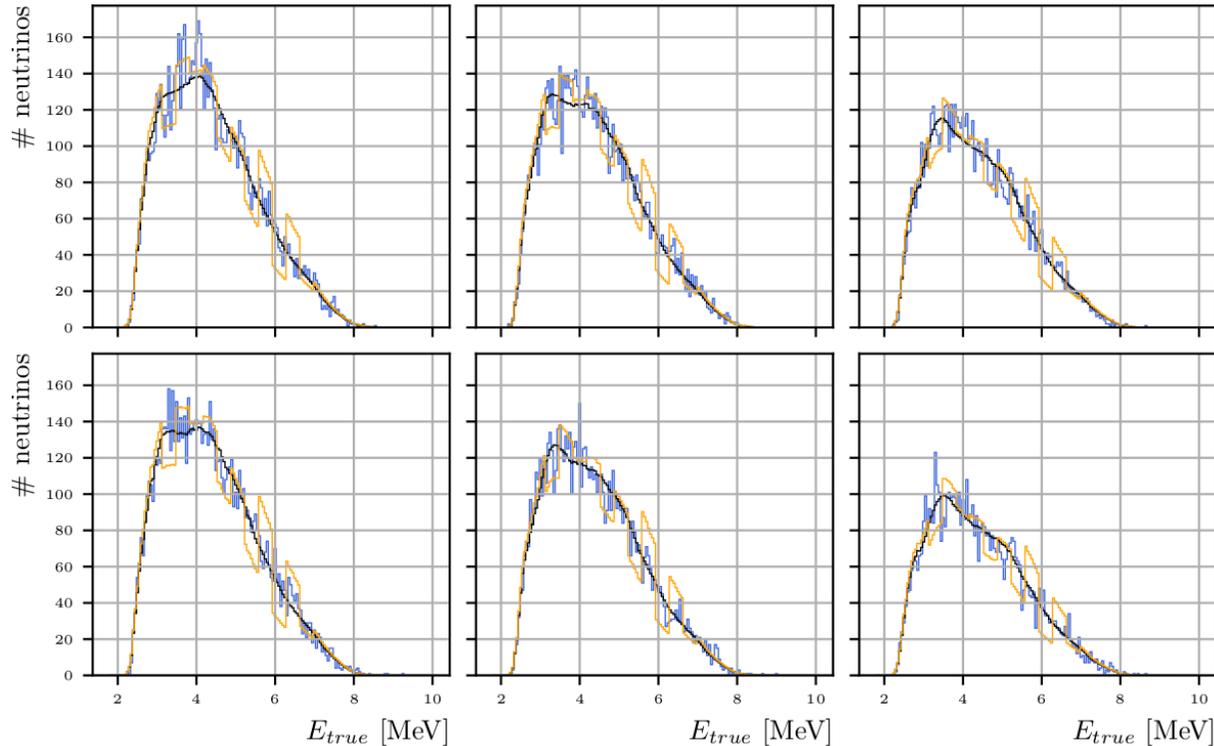
$$\vec{\pi}_{\vec{p}} \sim \mathcal{N}(\vec{0}, \sqrt{\hat{V}_{\vec{p}}}) \quad \chi^2 = \dots + \sum_{c=1..6} \vec{\pi}_{c\vec{p}}^T \hat{V}_{c\vec{p}}^{-1} \vec{\pi}_{c\vec{p}}$$

Analytical response model parameters free in the fit, constrained through pull terms.

$$\sin^2(2\theta)=0.21\pm 0.042, \Delta m^2=2.30\pm 0.037 [\text{eV}^2], \chi^2=51.69$$

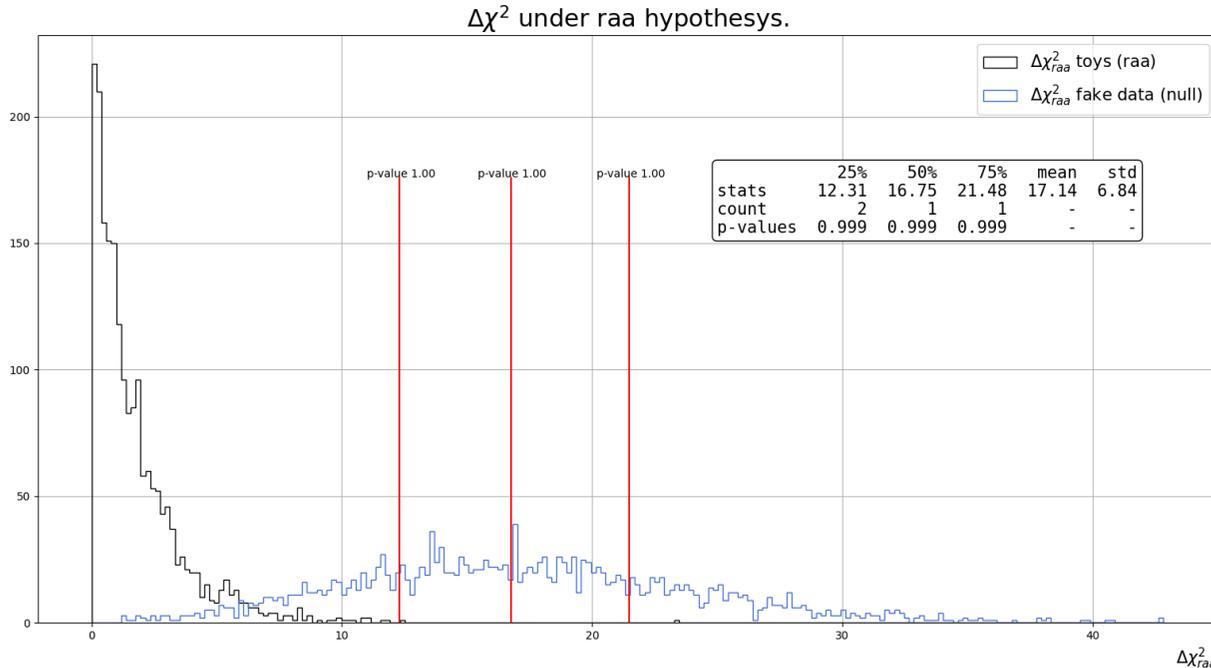


- Spectre en neutrino mesuré du toy RAA (noir)
- En **bleu** le spectre ajusté avec tous les paramètres libres



- Le spectre de référence (noir) varie entre chaque cellule à cause des oscillations
- En **bleu** le spectre de référence avec des fluctuations poissonniennes, le spectre vrai du toy
- En **orange** le spectre ajusté

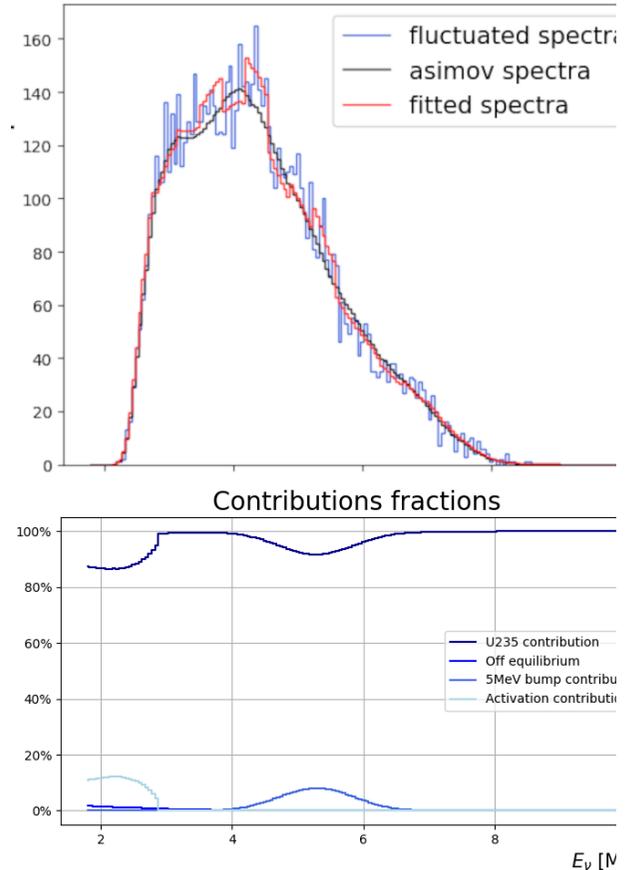
$$\Delta\chi_{\text{RAA}}^2 = \chi^2(\sin^2(2\theta) = 0.17, \Delta m^2 = 2.3|x) - \chi^2(\sin^2(2\theta), \Delta m^2|x)$$

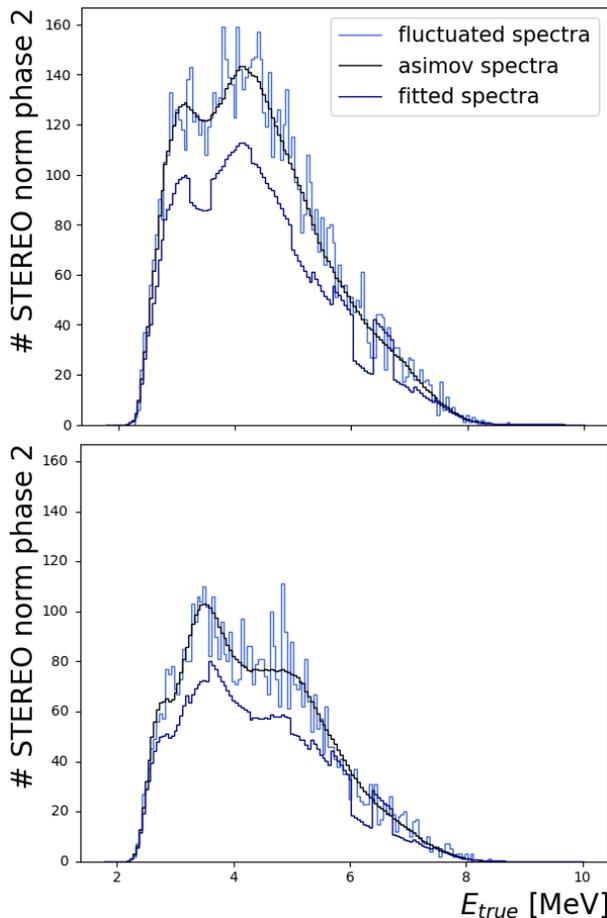


Des toys générés sous une hypothèse donnée (ici RAA), et ajustés librement puis fixés à la valeur de génération \rightarrow Distribution de $\Delta\chi^2$.

Une distribution de $\Delta\chi^2$ de toys hypothèses nulle.

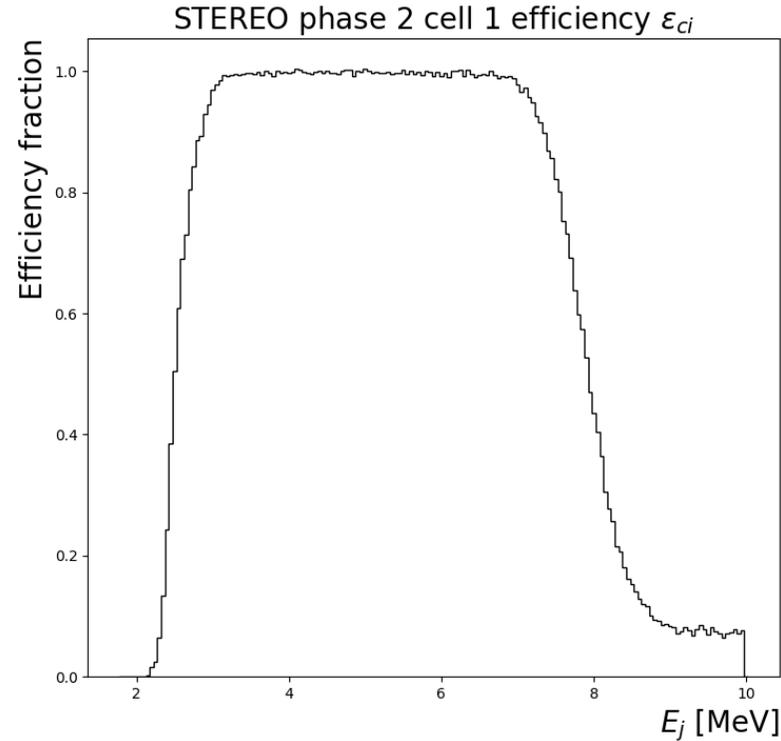
- Spectrum prediction, potential systematic → treat as nuisance.
- Free U235 component + fixed corrections in fit.
- Free by chunk of 7×50 keV energy bins.
- Spectra free between 2.775 and 9.675 MeV, fixed elsewhere where signal or efficiency is too low.
- Corrections: activation and off-equilibrium.
- For toys generation, HM + STEREO's bump.
- No regularization terms, no measurement intended.
- Shared among cells and experiments.





Instabilité des paramètres de nuisance du spectre réacteur.

- Spectre réacteur contraint à basse et haute énergie.
- Variations permises sur des groupes de 350 keV.



- Extracted from neutrino MC IDB dataset.
- Defined per cell.

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

- 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.

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

- Paramètres physiques d'intérêts : $(\sin^2(2\theta_{14}), \Delta m_{14}^2)$
- Probabilité d'observer un neutrino électronique moyenné sur chaque bins du spectre neutrino
- Chaque cellule de STEREO a une distance moyenne différente au cœur : (9.427, 9.773, 10.13, 10.48, 10.84, 11.18) metre

$$\Delta\chi^2(\theta_{\text{fixed}}) = -\ln(\mathcal{LR}(\theta_{\text{fixed}})) =$$

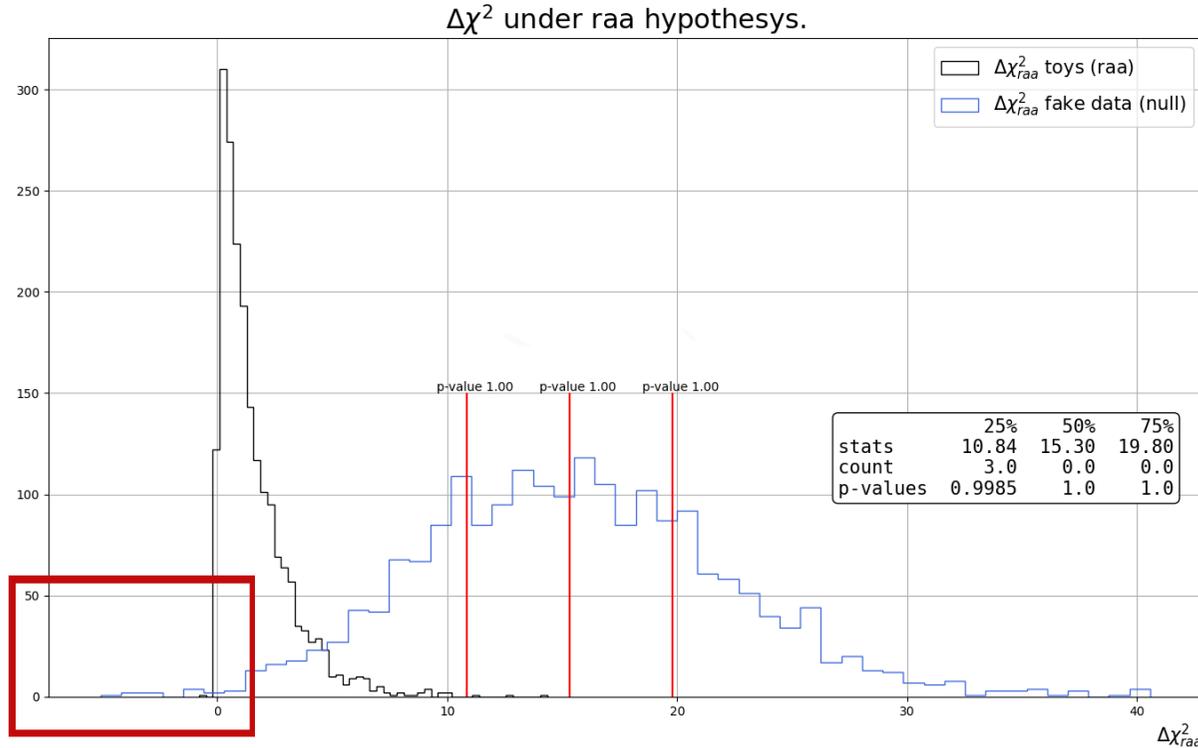
$$\min_{\vec{\pi}_{\vec{p}}, \Phi} \left\{ \chi^2(\theta_{\text{fixed}}, \vec{\pi}_{\vec{p}}, \Phi \mid D_{\text{ci}}) \right\} - \min_{\theta_{\text{free}}, \vec{\pi}_{\vec{p}}, \Phi} \left\{ \chi^2(\theta_{\text{free}}, \vec{\pi}_{\vec{p}}, \Phi \mid D_{\text{ci}}) \right\}$$

- $\theta \doteq (\sin^2(2\theta_{14}), \Delta m_{14}^2)$ physical parameters of interest.

“Feldman Cousins”, i.e.:

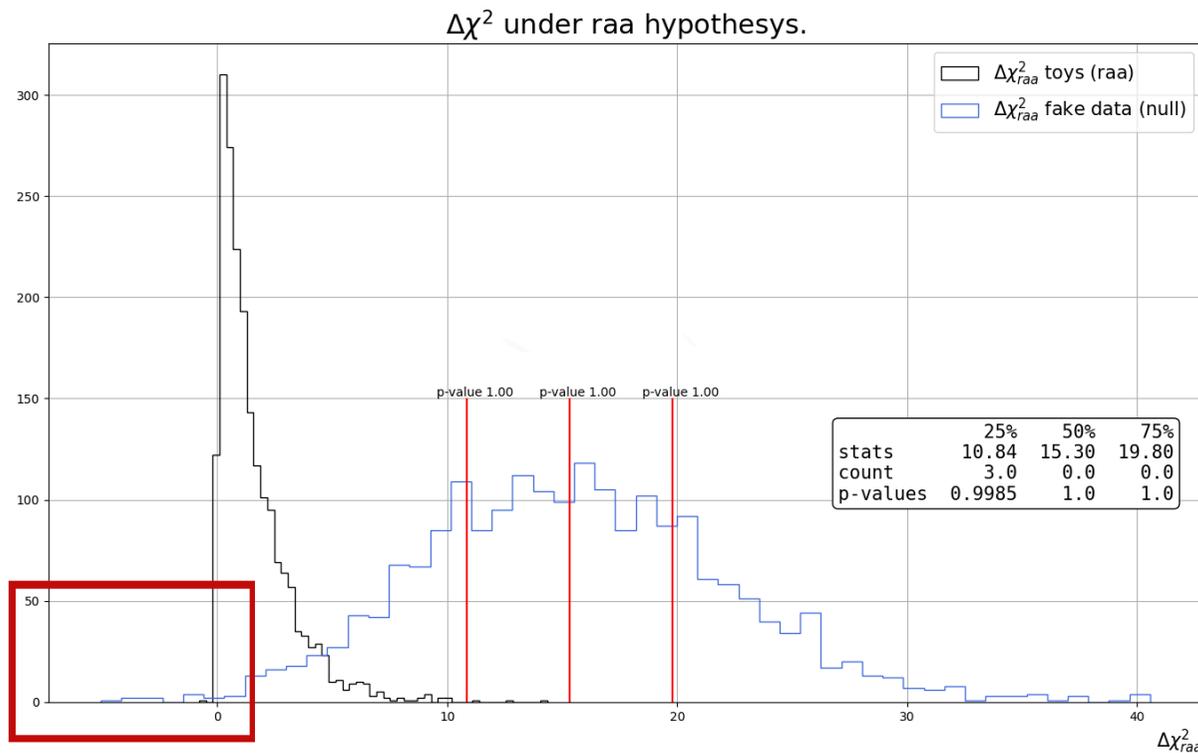
- Likelihood ratio test for each point in the sterile neutrino phase space plan.
 - $\Delta\chi^2(\theta_{\text{fixed}})$ distribution from fitting toys
 - Compare with data's $\Delta\chi^2(\theta_{\text{fixed}})$ and compute p-value.

$$\Delta\chi_{\text{RAA}}^2 = \chi^2(\sin^2(2\theta) = 0.17, \Delta m^2 = 2.3|x) - \chi^2(\sin^2(2\theta), \Delta m^2|x)$$



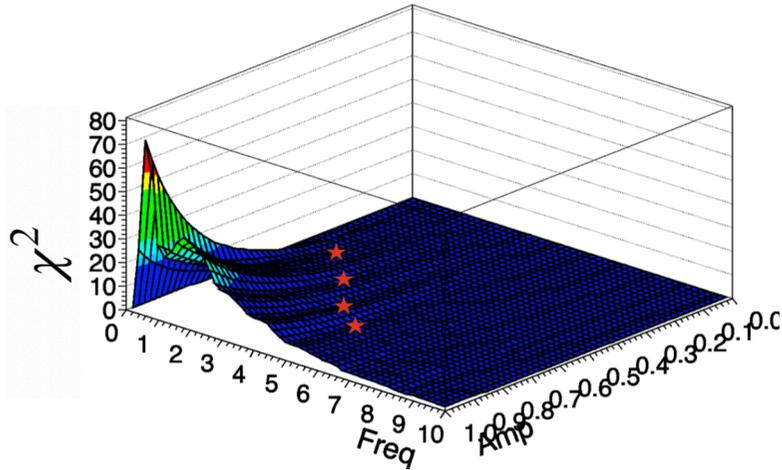
Valeurs de $\Delta\chi_{\text{RAA}}^2$ négatives sur certains fit de toys générés avec l'hypothèse nulle.

Par définition, le best fit ne peut avoir une valeur supérieur à un ajustement avec les paramètres d'oscillations contraints.



Valeurs de $\Delta\chi^2_{RAA}$ négatives sur certains fit de toys générés avec l'hypothèse nulle.

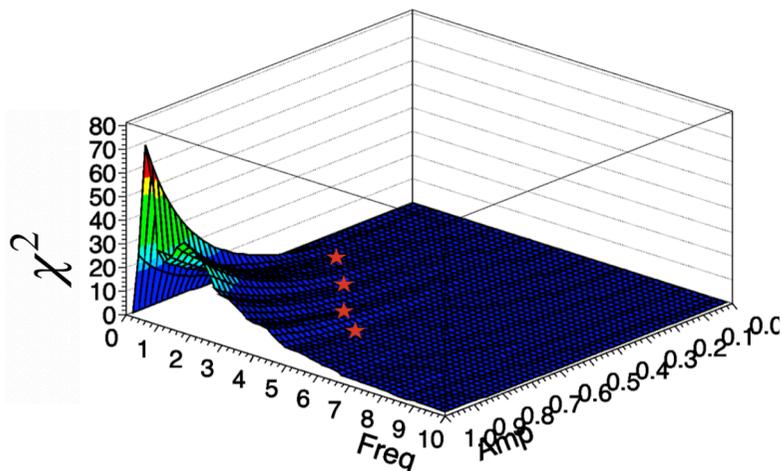
Par définition, le best fit ne peut avoir une valeur supérieur à un ajustement avec les paramètres d'oscillations contraints.



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

- Minuit2, gradient descend based algorithm.
- Minuit2 has trouble crossing between valleys in chi2.
- \Rightarrow 30 minimization using different initial values for frequency.

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

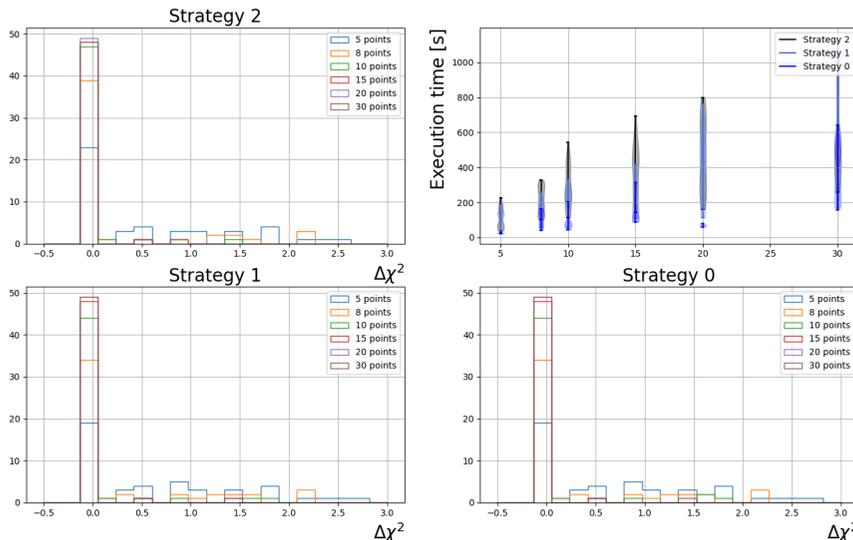


Le comportement sinusoïdal des oscillations selon la fréquence, avec le choix du binning du spectre observé, induit une succession de minima locaux à explorer.

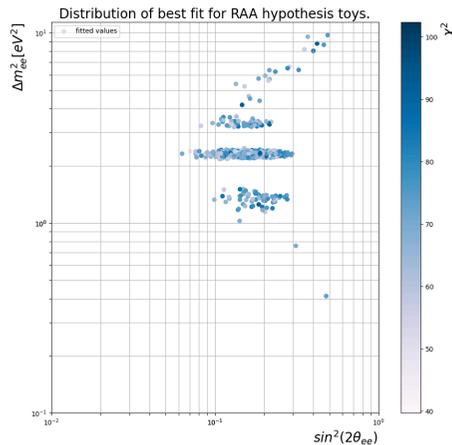
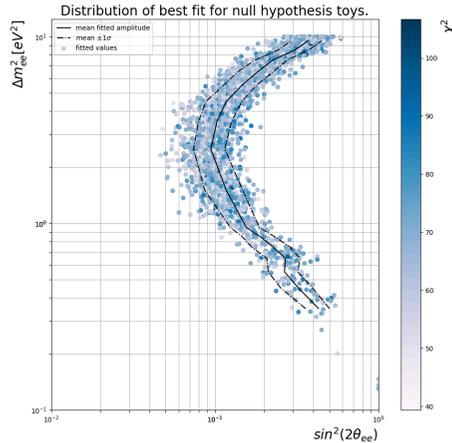
- Minuit2, algorithme de descente de gradient
- Difficile pour les descentes de gradient de passer de “vallée” en vallée
- \Rightarrow Recherche de stratégies de minimisations additionnelles

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

- Échantillonnage 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.

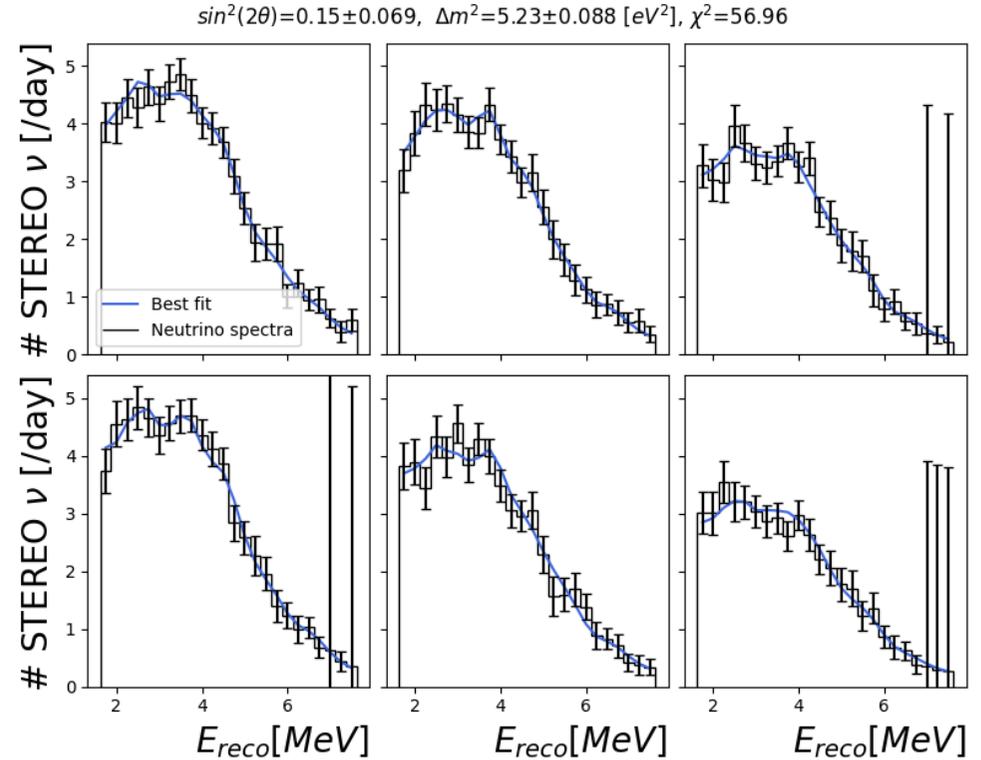
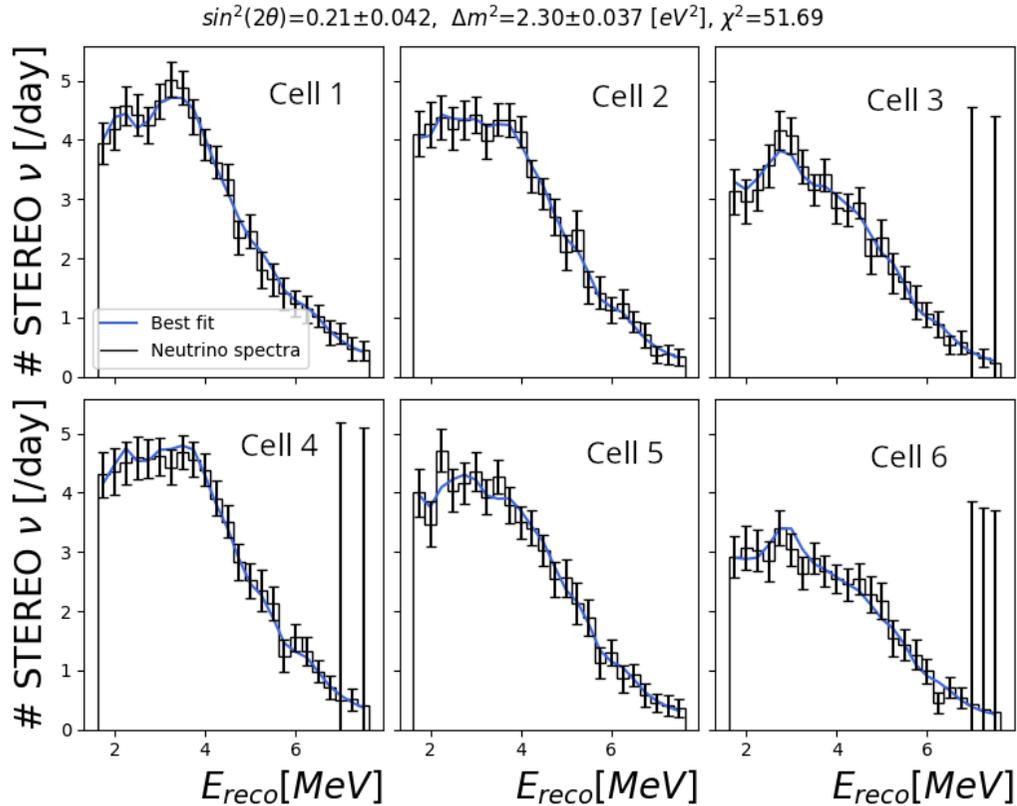


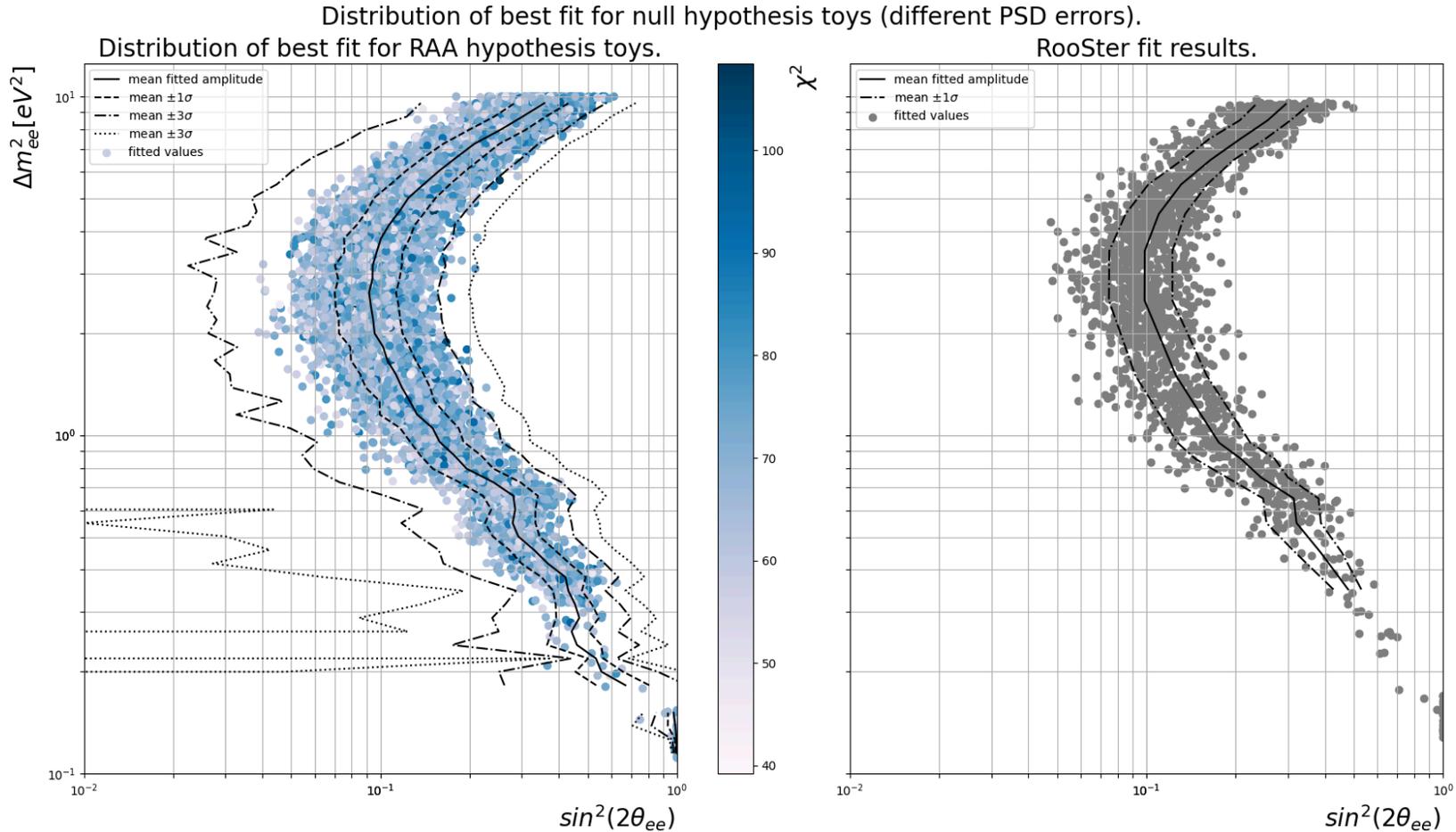
- On fait varier le nombre de points en fréquences et la stratégie de minuit.
- χ^2 'optimal' fixé comme étant celui pour 100 points en fréquence avec la stratégie 2.
- Impact de la stratégie limité sur la fiabilité du fit.

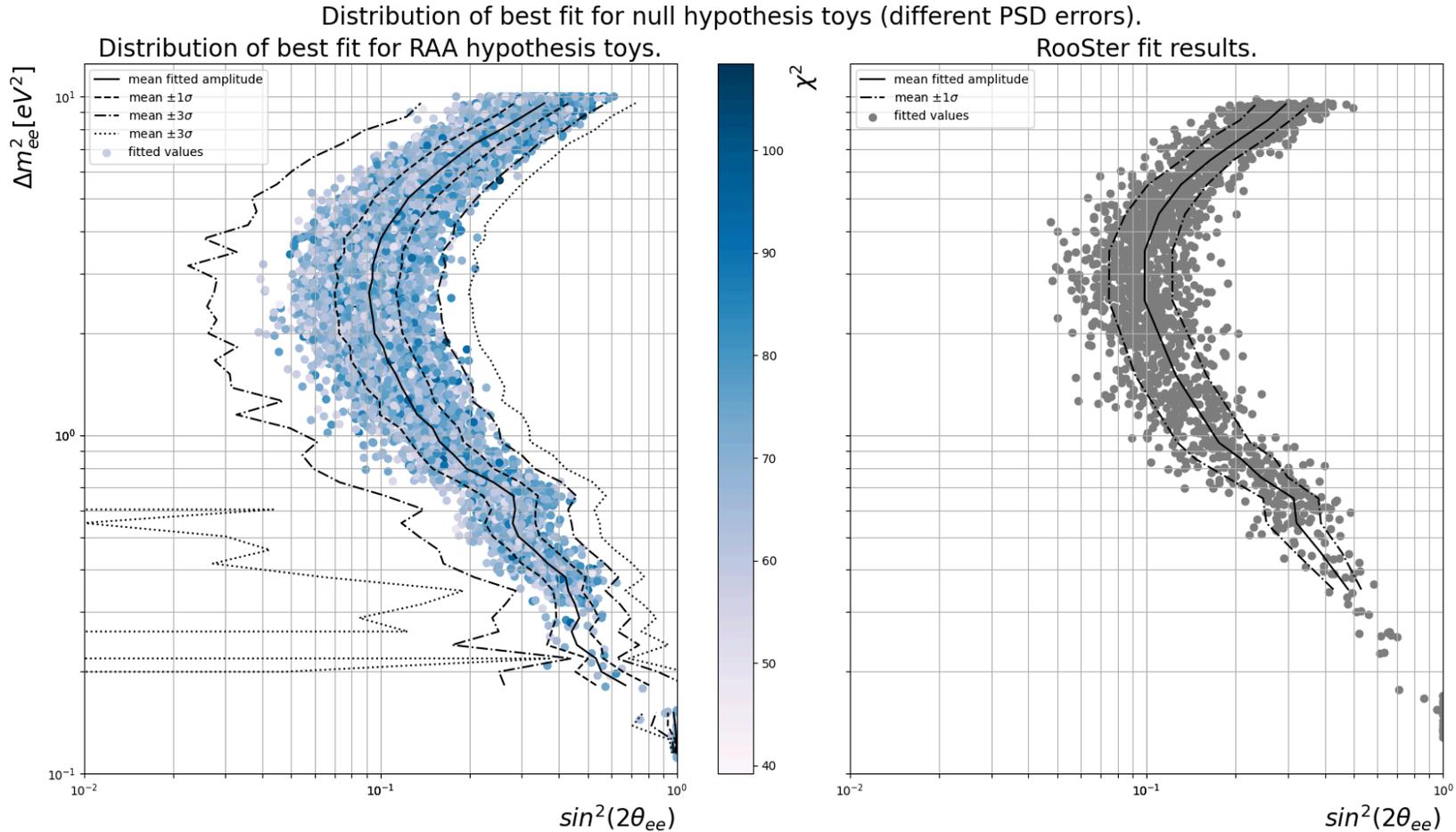


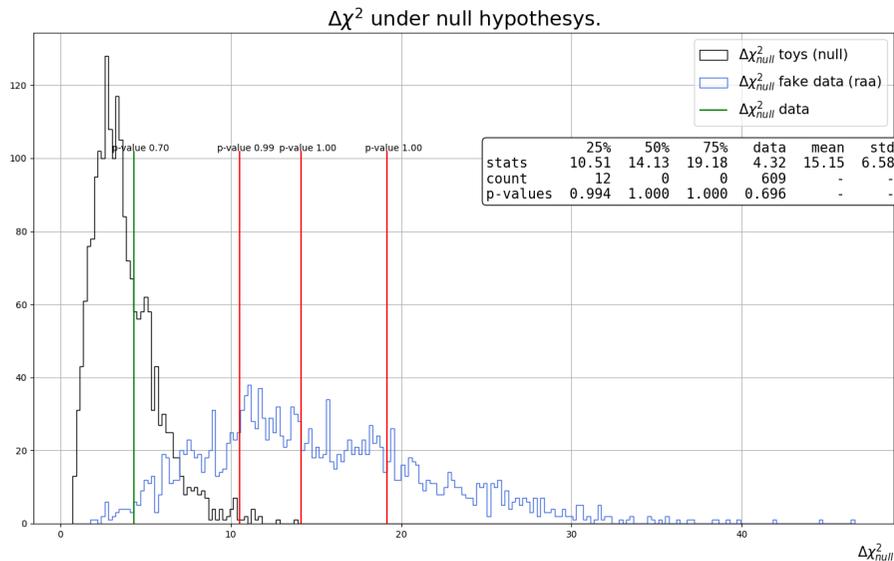
- Valeurs de parametres d'oscillation non nulles induites par les fluctuations statistiques.
- Distribution des valeurs autour de la limite de sensibilité.

- RAA bien résolue expérimentalement.
- Valeurs ajustées proches de la valeur de générations.

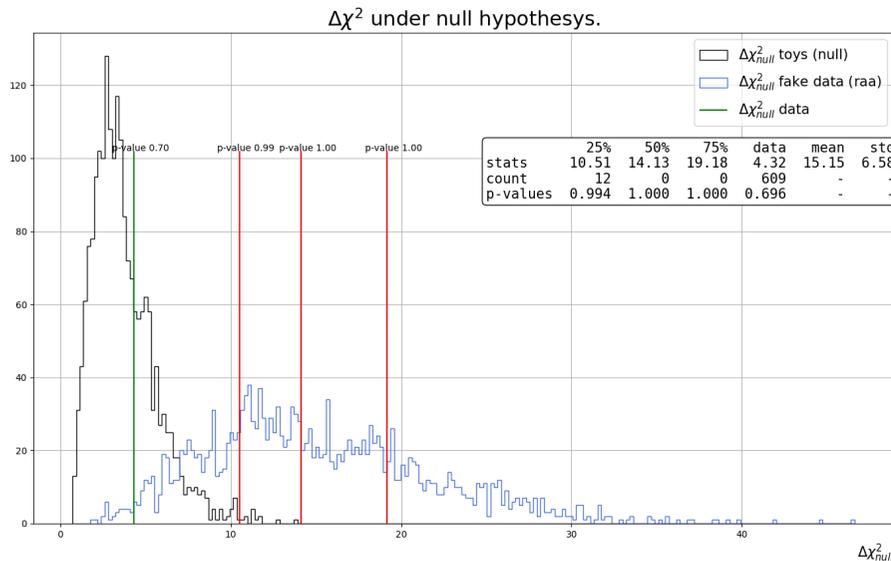






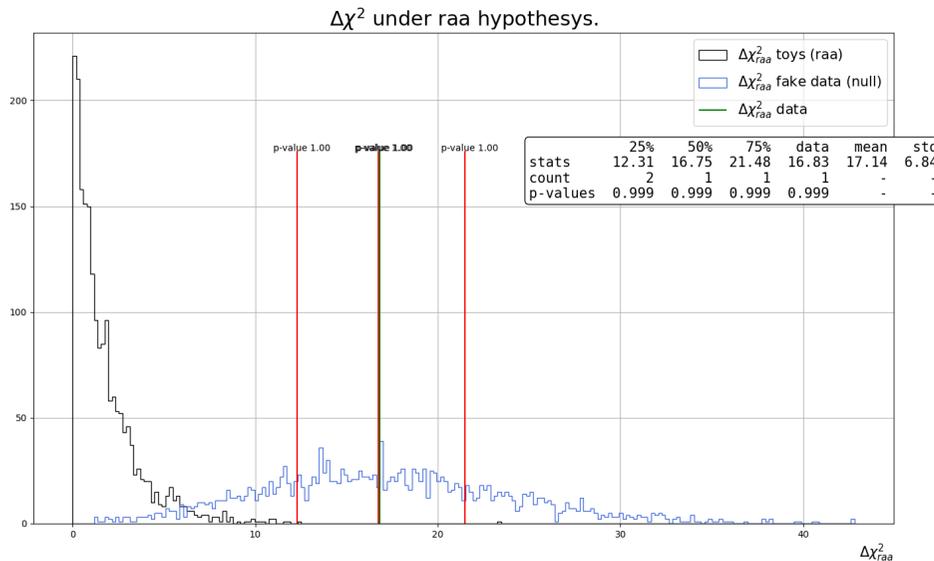


- Deviation from chi2 law for 2dof as expected.
- Comparaison of $\Delta\chi^2$ distribution for null and RAA toys under null hypothesis $\Delta\chi^2(\theta_{\text{null}})$
- Data does not exclude null hypothesis.

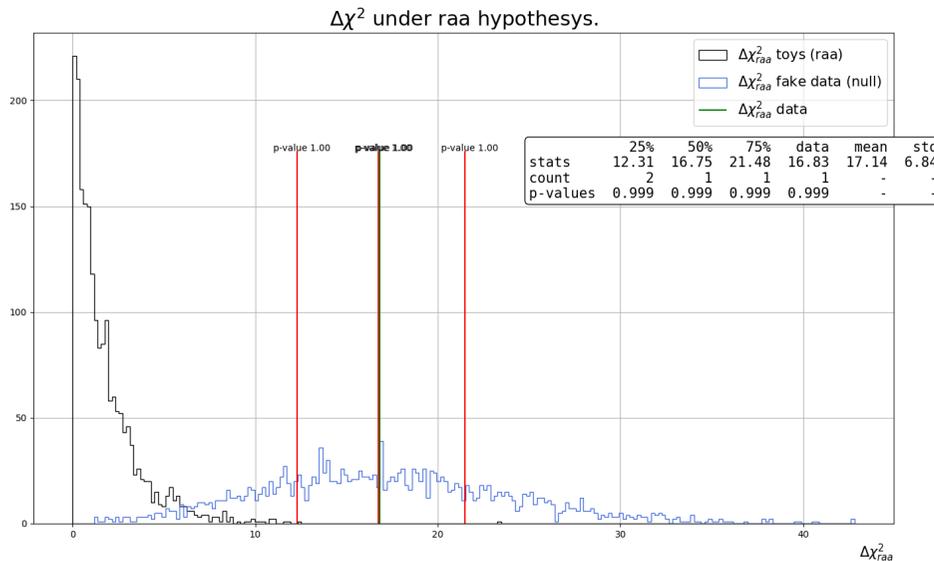


Comparaison de la distribution de $\Delta\chi^2$ de toys générés avec l'hypothèse RAA (bleu) et hypothèse nulle (noir)

- Les toys RAA montrent que l'on peut exclure, en moyenne, l'hypothèse nulle avec un niveau de confiance important
- La valeur $\Delta\chi^2$ des données montre que l'on ne peut exclure l'hypothèse nulle



- Comparison of $\Delta\chi^2$ distribution for RAA and null toys under RAA hypothesis $\Delta\chi^2(\theta_{\text{RAA}})$
- Data $\Delta\chi^2$ exclude RAA hypothesis with p-value $< \frac{1}{2000}$.



Comparaison de la distribution de $\Delta\chi^2$ de toys générés avec l'hypothèse nulle (bleu) et hypothèse RAA (noir)

- Les toys hypothèse nulle montrent que l'on peut exclure, en moyenne, l'hypothèse RAA avec un niveau de confiance important
- La valeur $\Delta\chi^2$ des données montre que l'ont exclu l'hypothèse RAA à plus de 3σ