
Neutrinos

BONHOMME Aurelie, LAMOUREUX Mathieu,
ZOLOTAROVA Anastasiia

Les neutrinos

OÙ

COMMENT

Neutrinos

QUOI

$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

$\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$

$\nu_e \rightarrow e^- + W$

ν_e, ν_μ, ν_τ

Les propriétés des neutrinos

- Introduit de charge **nulle** et masse **nulle**, interagit seulement par les interactions **faible et gravitationnelle** ⇒ très faible interaction

1930

Postulat

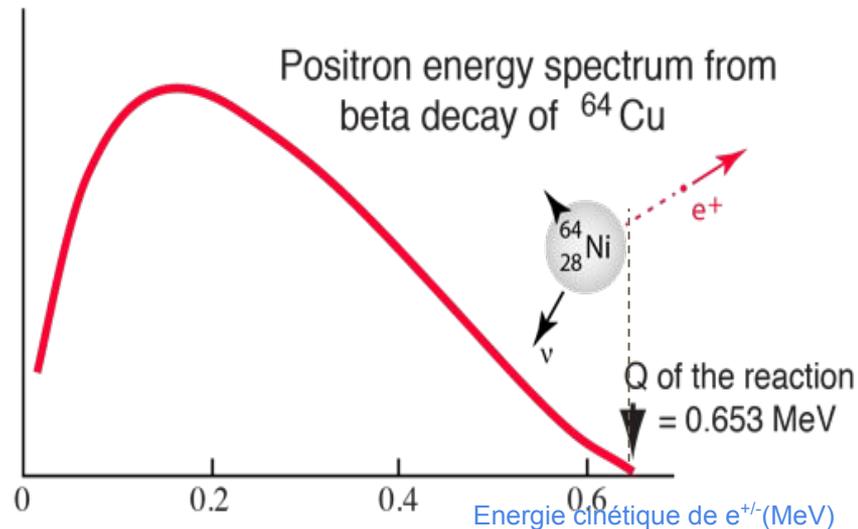


Il manque quelque chose ici pour conserver l'énergie...

+ ν ??

→ invisible E_ν

→ détecté (particule chargée) avec une énergie E_e



"J'ai fait une chose terrible, j'ai postulé une particule qui ne peut pas être détecté"

W. Pauli, 1930

1956

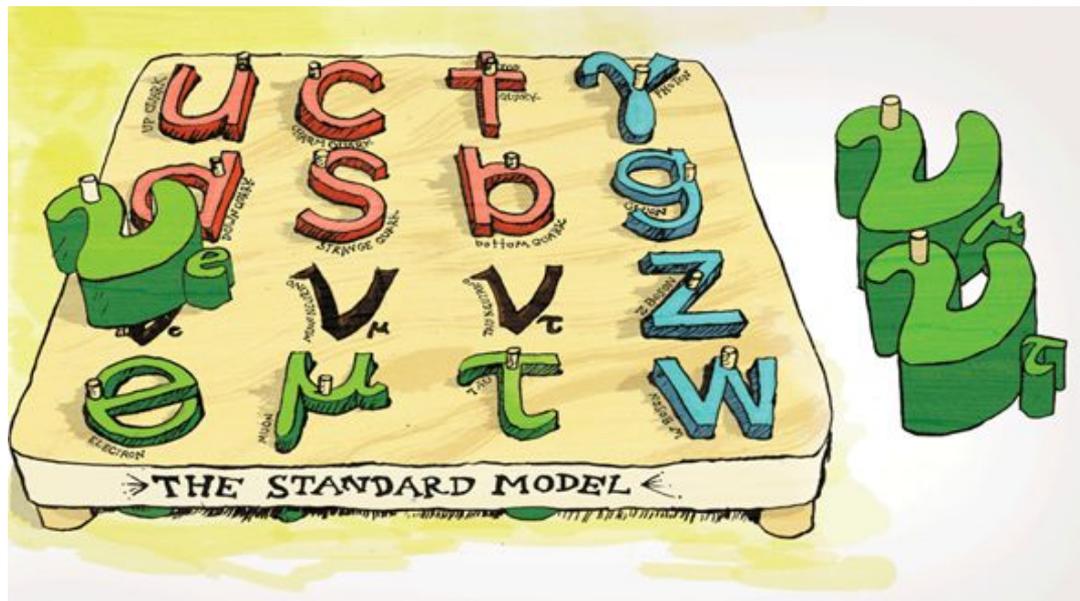
Découverte expérimentale du neutrino

Reines & Cowan - Réacteur Hanford

⇒ Les neutrinos sont partout mais *fantômes*

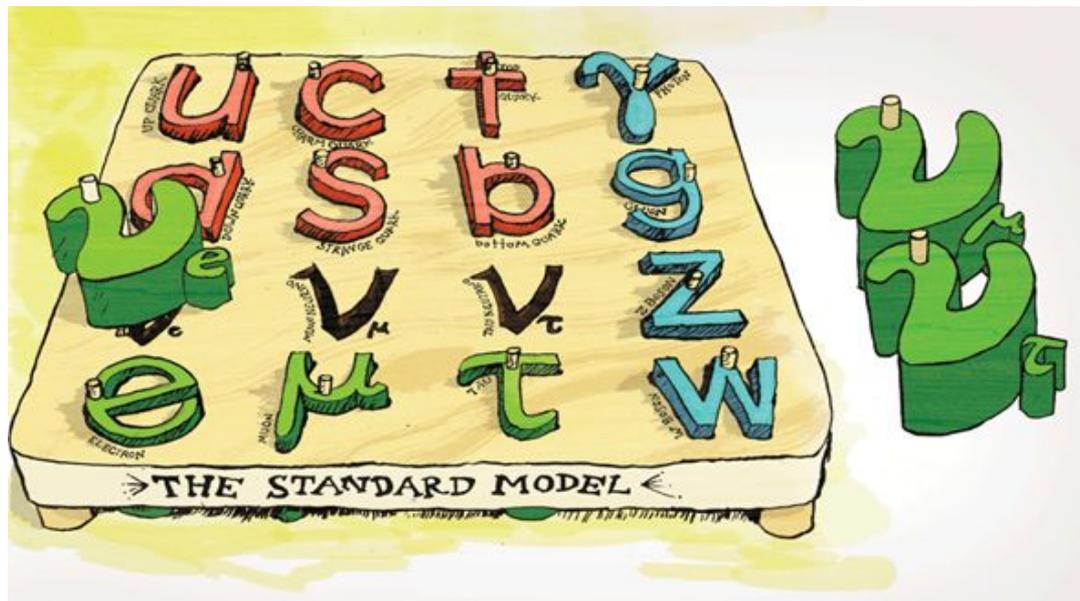
Les propriétés des neutrinos

- Introduit de charge **nulle** et masse **nulle**, interagit seulement par les interactions **faible et gravitationnelle** ⇒ très faible interaction
- Existe sous trois saveurs distinctes : électron (ν_e), muon (ν_μ), tau (ν_τ)
- De masse nulle dans la théorie (Modèle Standard) mais, **masse non nulle** de par les expériences → **oscillations**



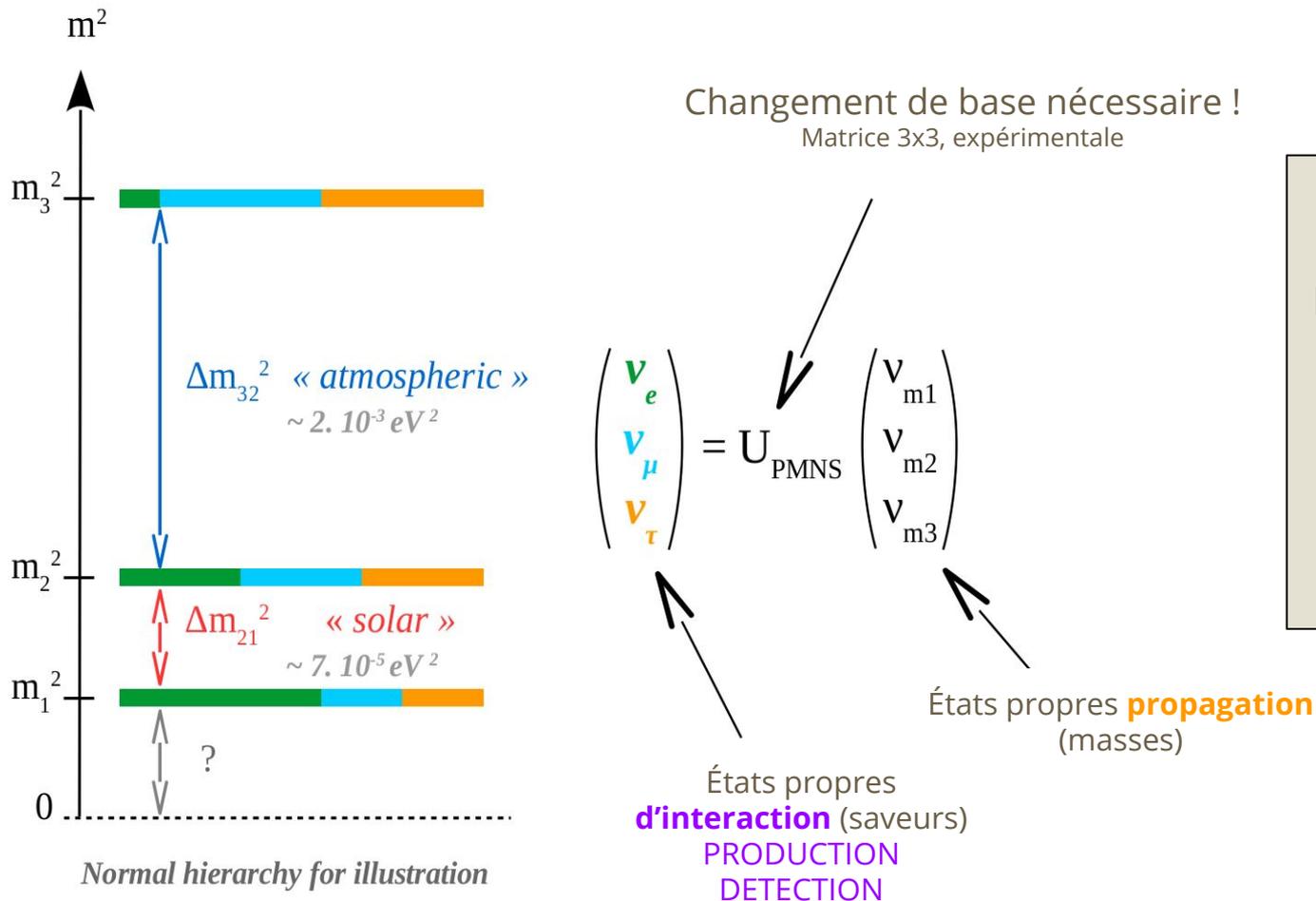
Les propriétés des neutrinos

- Introduit de charge **nulle** et masse **nulle**, interagit seulement par les interactions **faible et gravitationnelle** ⇒ très faible interaction
- Existe sous trois saveurs distinctes : électron (ν_e), muon (ν_μ), tau (ν_τ)
- De masse nulle dans la théorie (Modèle Standard) mais, **masse non nulle** de par les expériences → **oscillations**



Les oscillations des neutrinos

Le neutrino est massif ! Mélange entre états de saveurs et de masses...



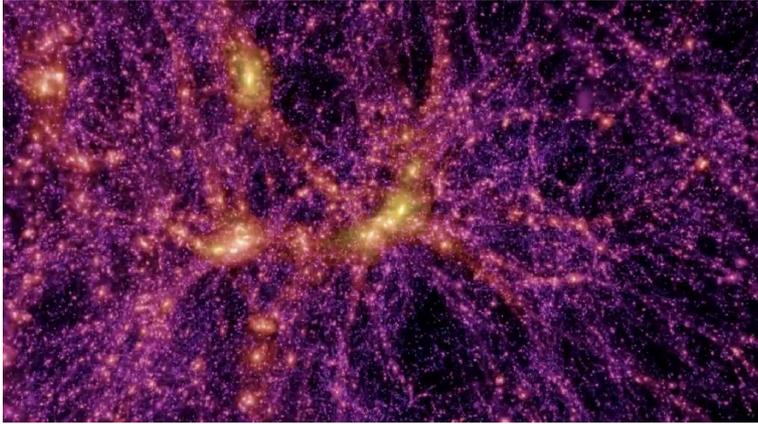
Après propagation, les neutrinos ont une certaine **probabilité** d'être détectés sous une autre saveur:

$$P_{\text{apparition}} = 1 - P_{\text{disparition}}$$

$$\propto \sin^2(2\theta) \sin^2(a \cdot \Delta m^2 L/E)$$

Oscillations !

Les neutrinos sont encore une énigme



- Expériences \Rightarrow différence de masse entre les neutrinos.

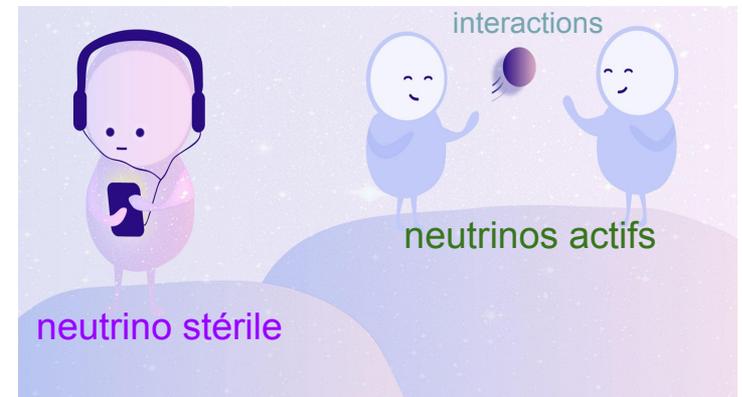
Quelle est leur **masse absolue** ?

Influence sur la formation des structures en cosmologie

- Est-ce que le neutrino est **sa propre antiparticule** ?
- Existe-t-il **plus de trois saveurs** de neutrinos (des neutrinos stériles) ?

Pourrait expliquer des anomalies expérimentales

Permettrait d'étendre le Modèle Standard naturellement



Désintégration double bêta sans neutrino

Expérience CUPID-Mo

Anastasiia
(DPhP)



Pourquoi cherchons-nous $0\nu\beta\beta$?

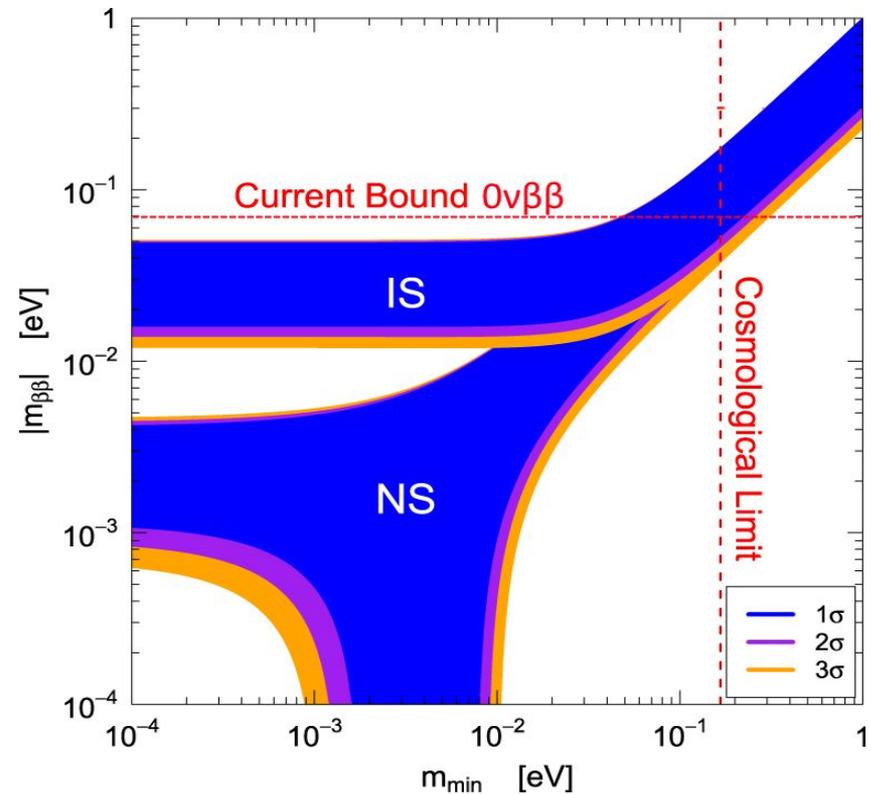
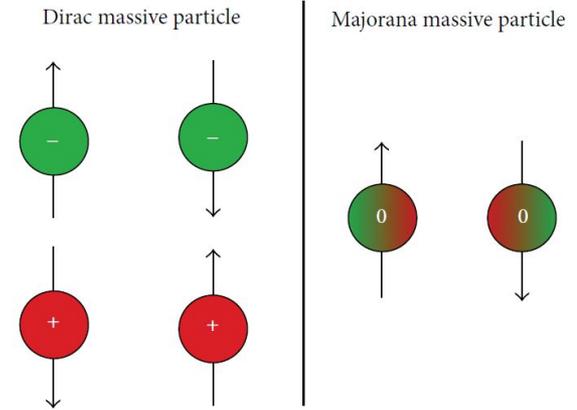
- Nouvelle physique au-delà du modèle standard: violation du nombre leptonique:



- Nature de Majorana du neutrino:

particule = antiparticule

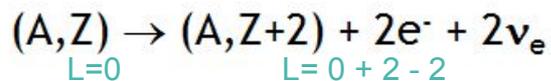
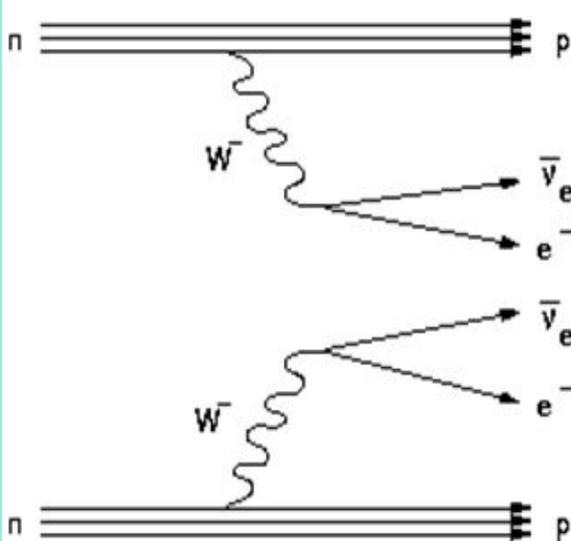
- Impact sur l'origine de l'asymétrie matière / antimatière dans l'Univers
- Définition de l'échelle absolue de masse de neutrinos



Pour rechercher les propriétés des neutrinos ...

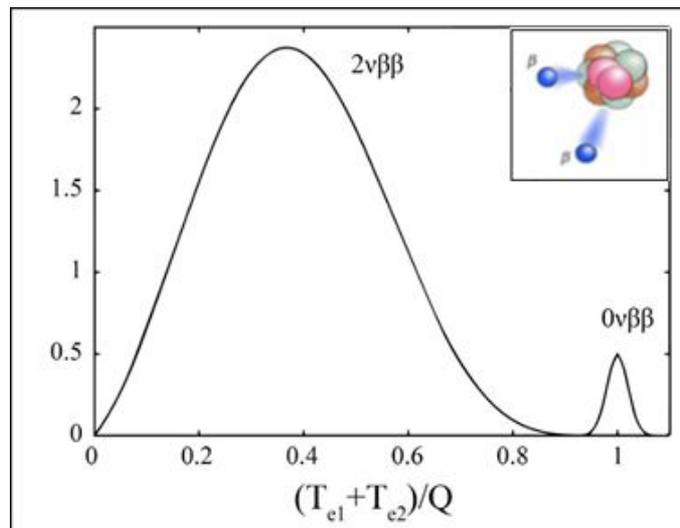
Nous n'avons pas besoin de neutrinos!

Avec deux neutrinos:



$$T_{1/2} (2\nu\beta\beta): \sim 10^{18}-10^{21} \text{ ans}$$

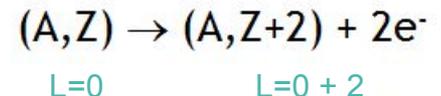
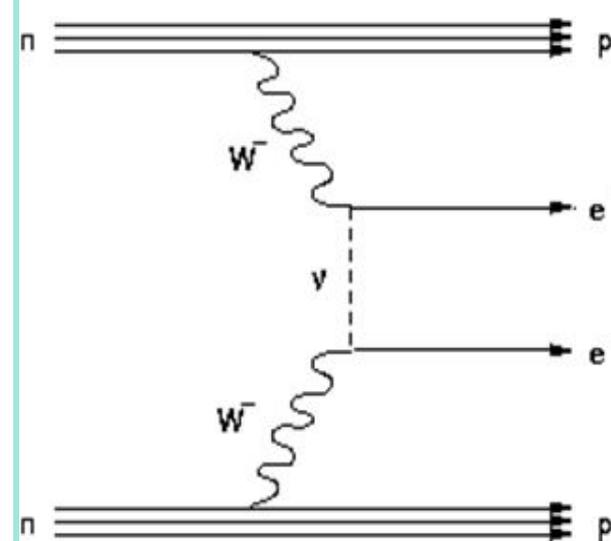
Double désintégration bêta:



Pour comparer: l'âge de l'univers est de $\sim 14 \times 10^9$ ans

Le défi est de réduire le fond autant que possible

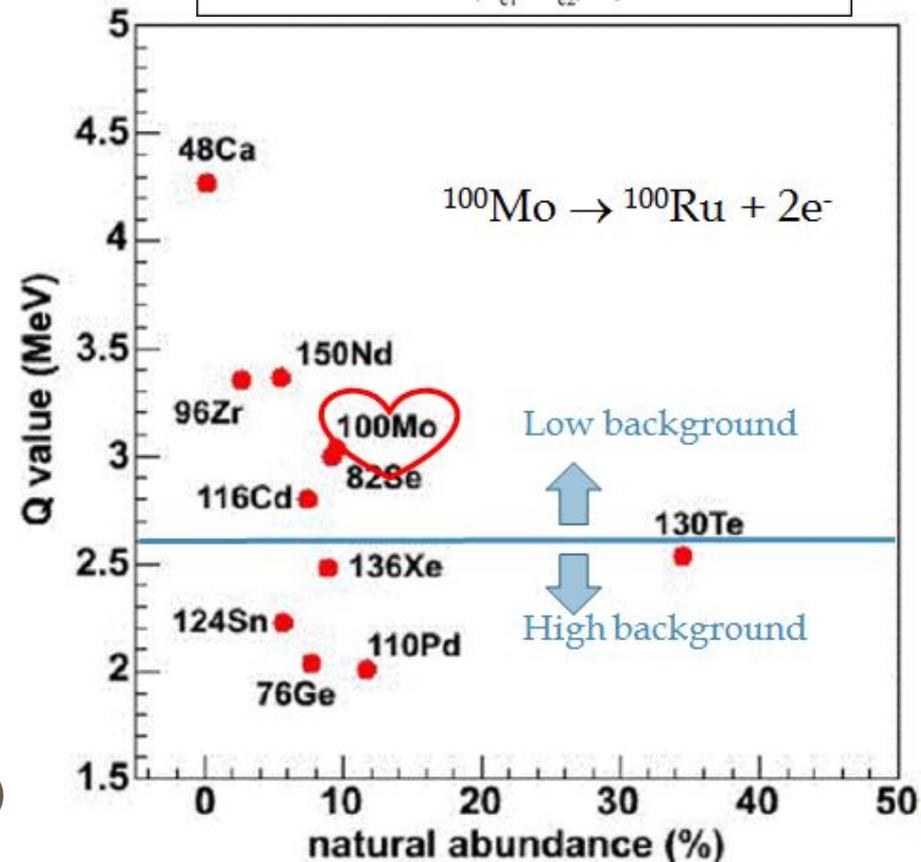
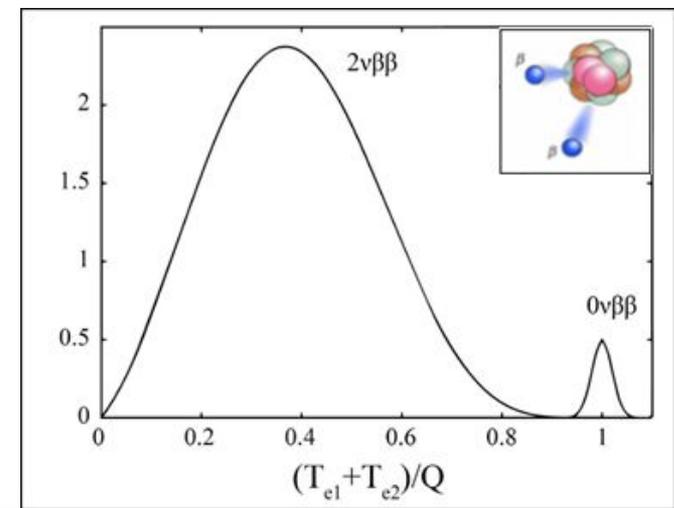
Sans émission de neutrino:



$$T_{1/2} (0\nu\beta\beta): > 10^{24} \cdot 10^{26} \text{ ans}$$

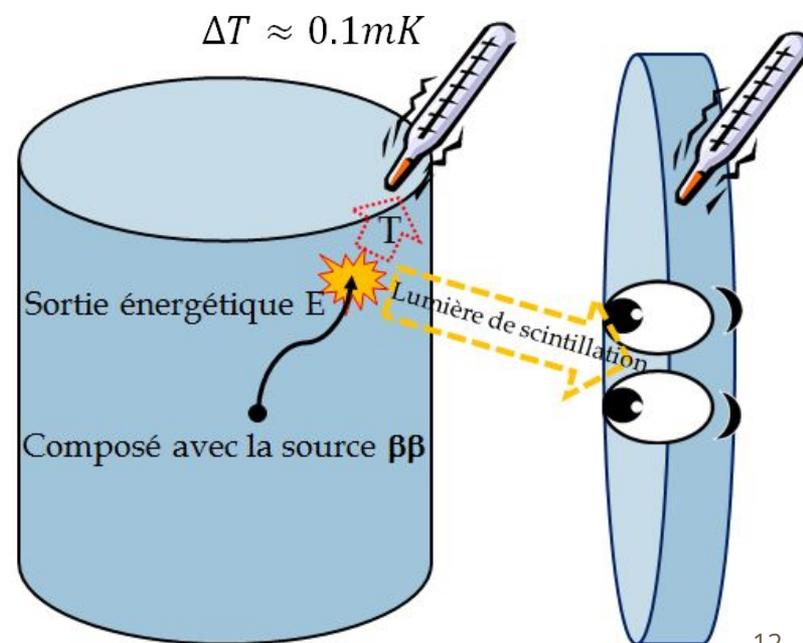
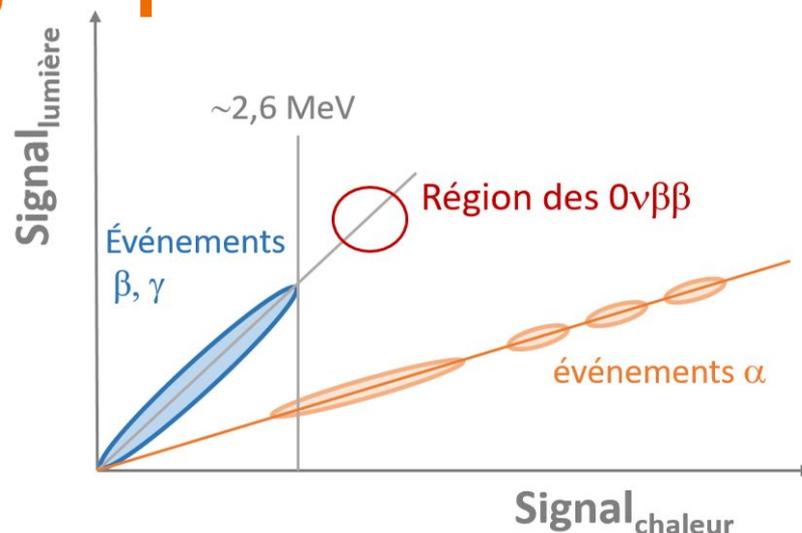
Pourquoi ^{100}Mo ?

- Il n'y a pas d'isotope "parfait", mais ...
- Haute énergie de désintégration: $Q_{2\beta} = 3034 \text{ keV} > 2615 \text{ keV}$
- Abondance isotopique = 9,7%
- Possibilité d'enrichissement en grande quantité
- Prévisions théoriques favorables
- Haute efficacité de détection en cas des cristaux de molybdate
- Très haute résolution d'énergie et puissant discrimination de particules (bolomètres scintillants cryogéniques)



Bolomètres scintillants cryogéniques

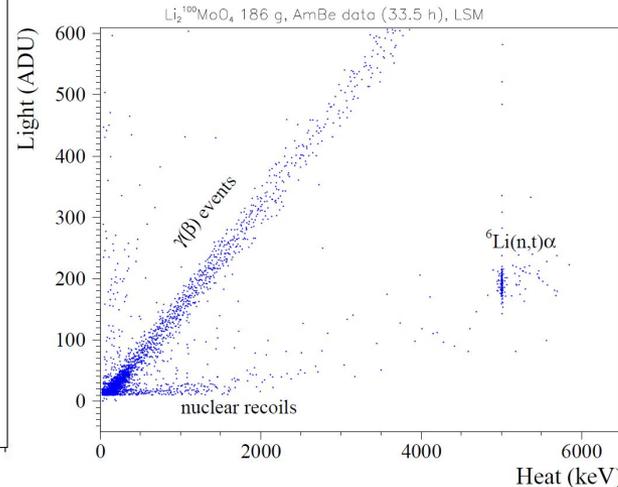
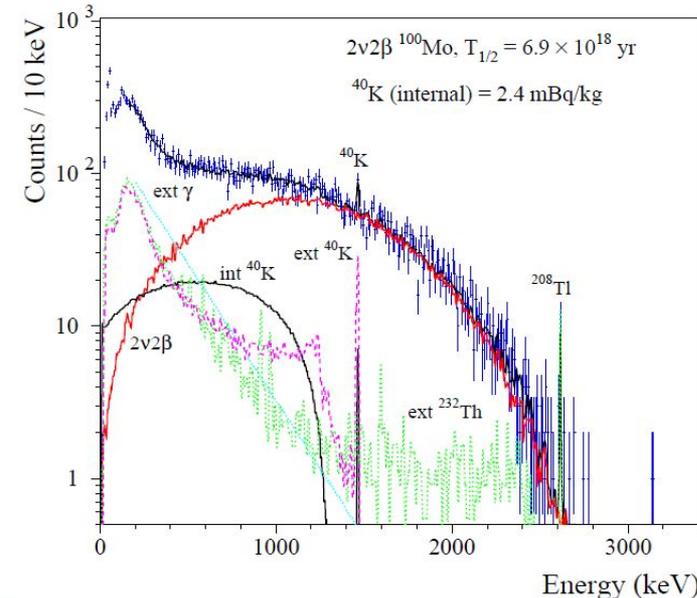
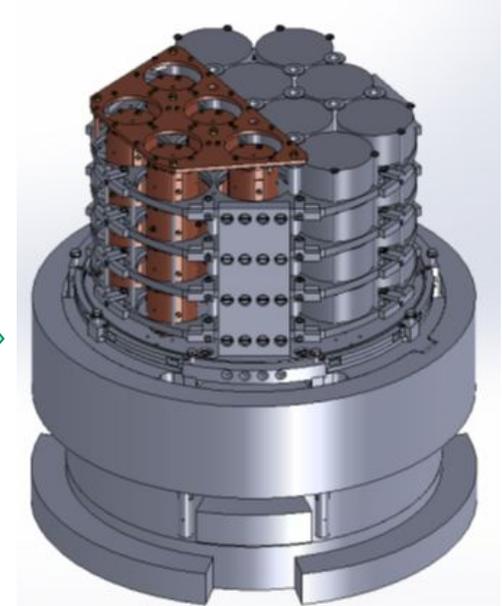
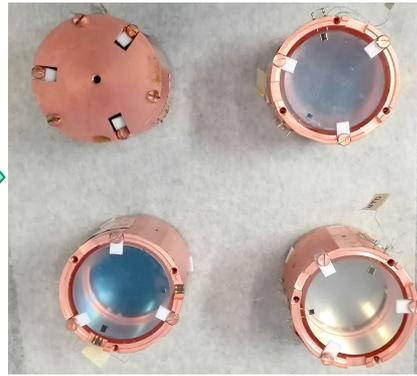
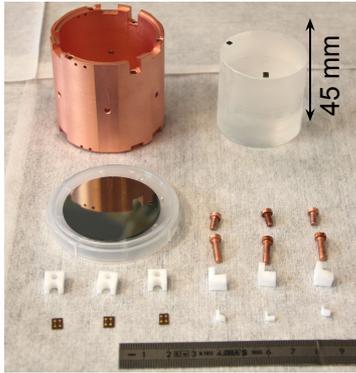
- **L'énergie nucléaire** est mesurée par une augmentation de la **température** dans un cristal
- Température de base $\approx 0,01 \text{ K} = -273,14 \text{ C}^\circ$
- Masse typique: 0.1- 1 kg
- Dans des cristaux scintillants le flash de lumière est produit par l'absorption d'une particule
- **Différentes particules produisent différentes quantités de lumière** pour la même énergie déposée dans le cristal
- **Haute résolution** énergie: 5-7 keV (0,2%)
- **Haute efficacité** d'enregistrement: (70% à 90%)



CUPID-Mo: objectifs et perspectives

Où: Laboratoire Souterrain de Modane (LSM)

- Quand:
- Test d'une tour avec 4 cristaux: maintenant jusqu'à septembre
 - longue prise de données avec 5 tours et 20 cristaux: novembre 2017 - milieu 2018

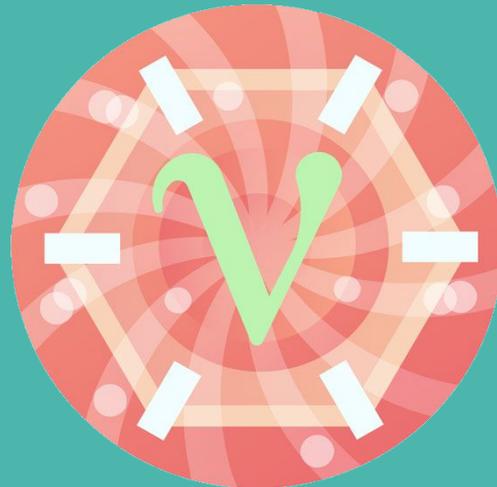


Objectif de démonstrateur à 20 $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$ détecteurs: longue prise de données souterraine en 2017-2018 pour prouver le concept "zéro-fond" pour l'expérience future de la tonne échelle.

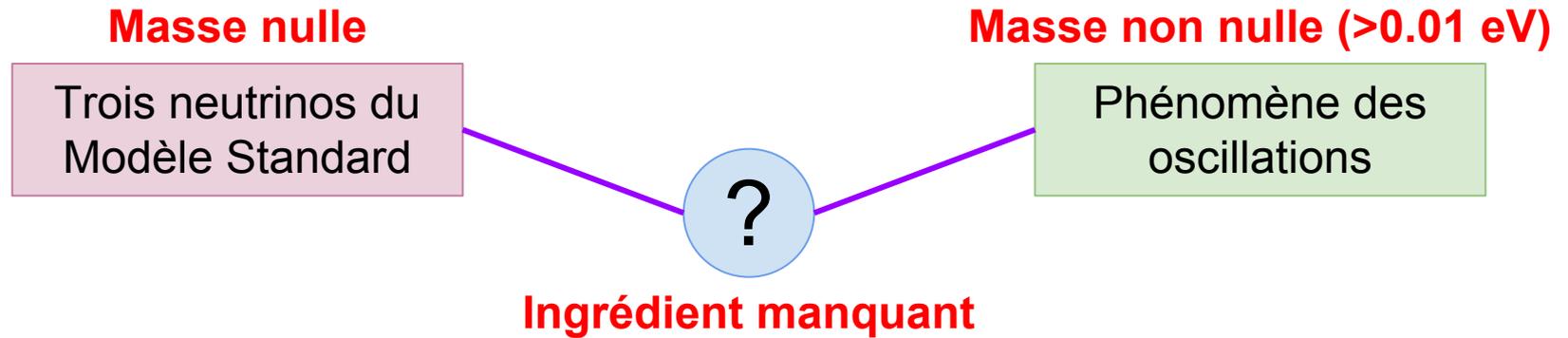
Recherche de neutrinos lourds (~ 100 MeV)

Expérience T2K

Mathieu
(DPhP)



Motivations



On peut ajuster leur masse pour expliquer:

- la matière noire : avec un neutrino au keV
- l'asymétrie matière-antimatière :
avec des neutrinos entre
100 MeV et 100 GeV

Motivations

Masse non nulle (~ 1 eV)

Trois neutrinos du
Modèle Standard

Masse non nulle

Phénomène des
oscillations

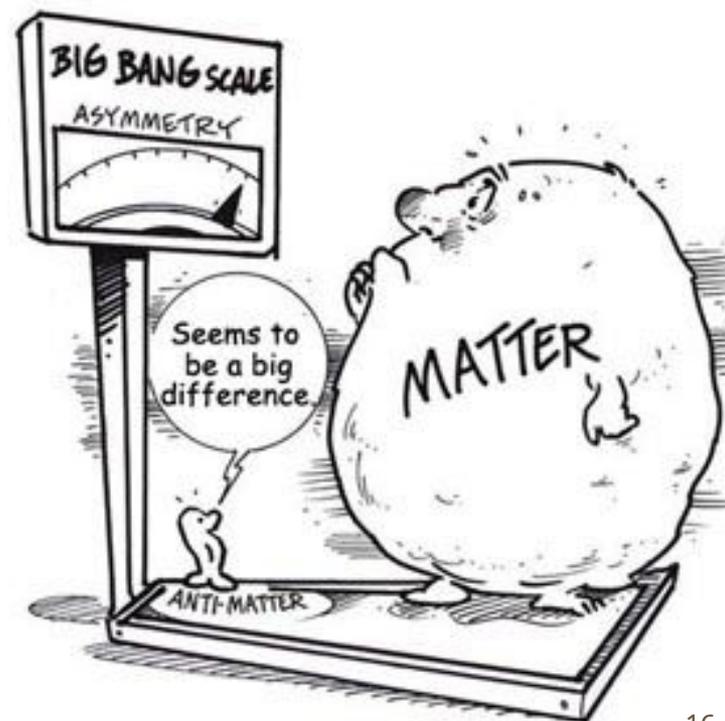
couplage U^2

Trois nouveaux
neutrinos lourds

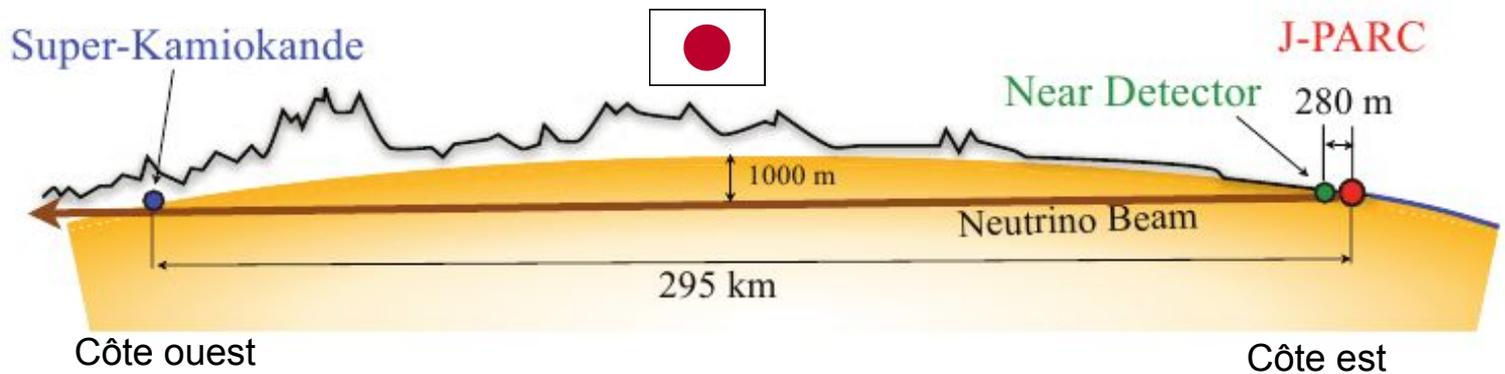
On peut ajuster leur masse pour expliquer:

- la matière noire : avec un neutrino au keV
- l'asymétrie matière-antimatière :
avec des neutrinos entre
100 MeV et 100 GeV

**T2K peut chercher
ces neutrinos**

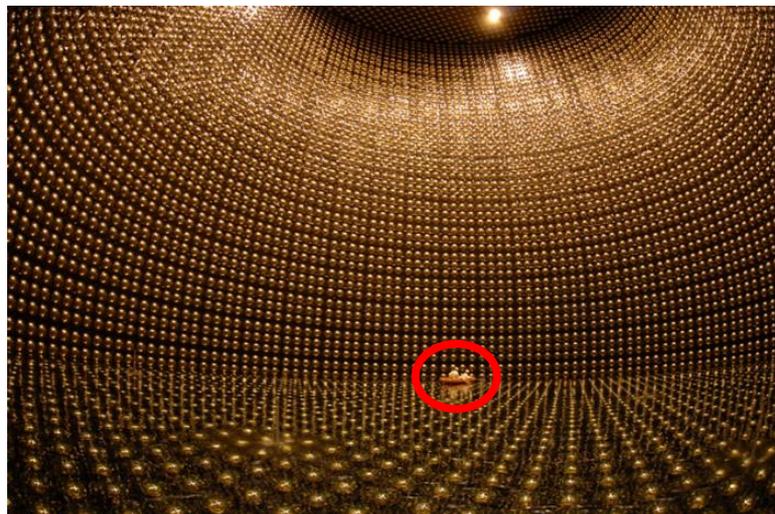


T2K



Expérience d'oscillation des neutrinos, située au Japon

- accélérateur, détecteur proche (280m) et détecteur lointain (295km)



Super-Kamiokande
(50 kilotonnes d'eau)

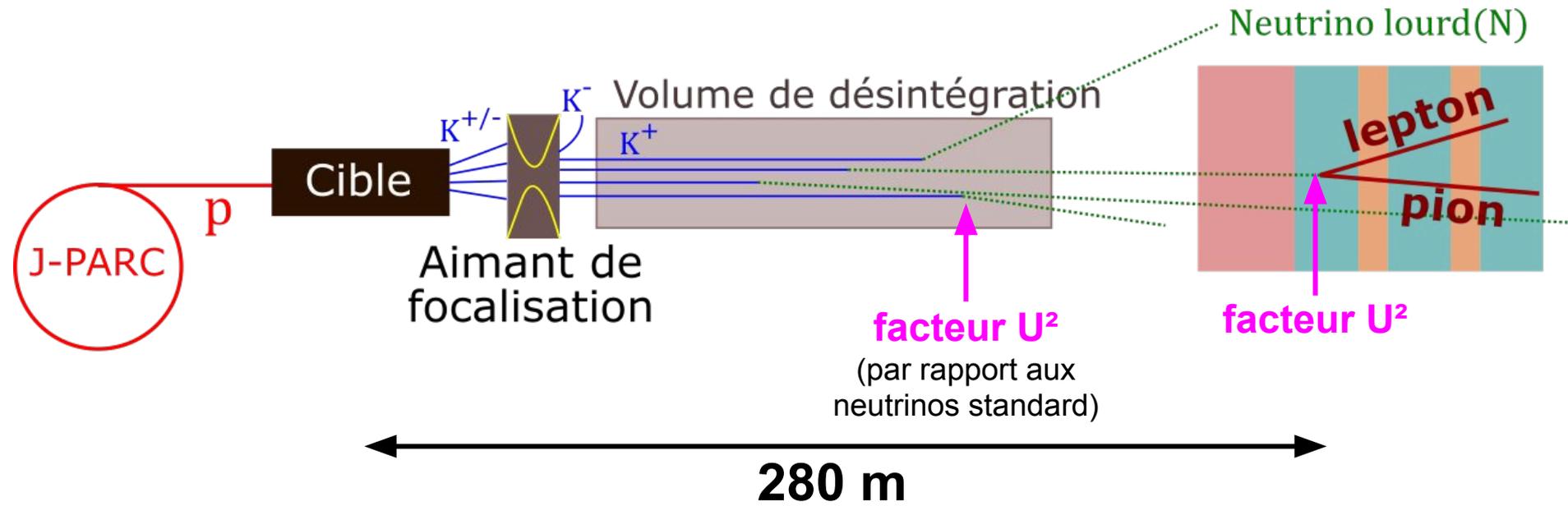


TPC de ND280
(fabriquées en partie au CEA)



J-PARC
(protons de 30 GeV)

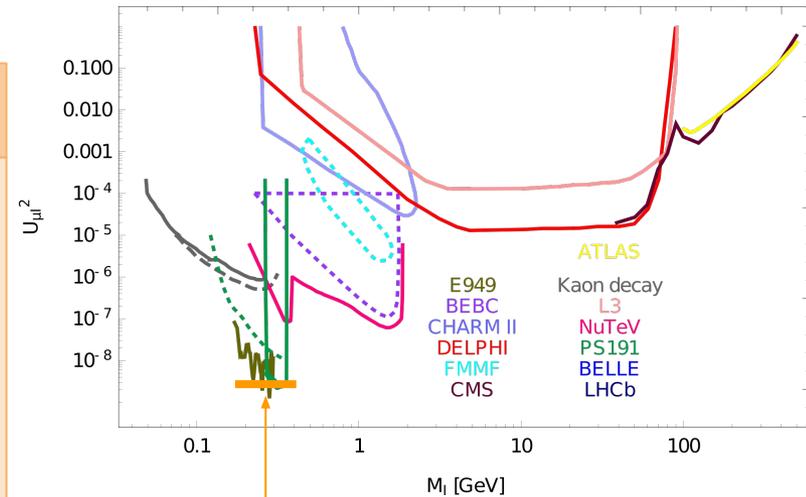
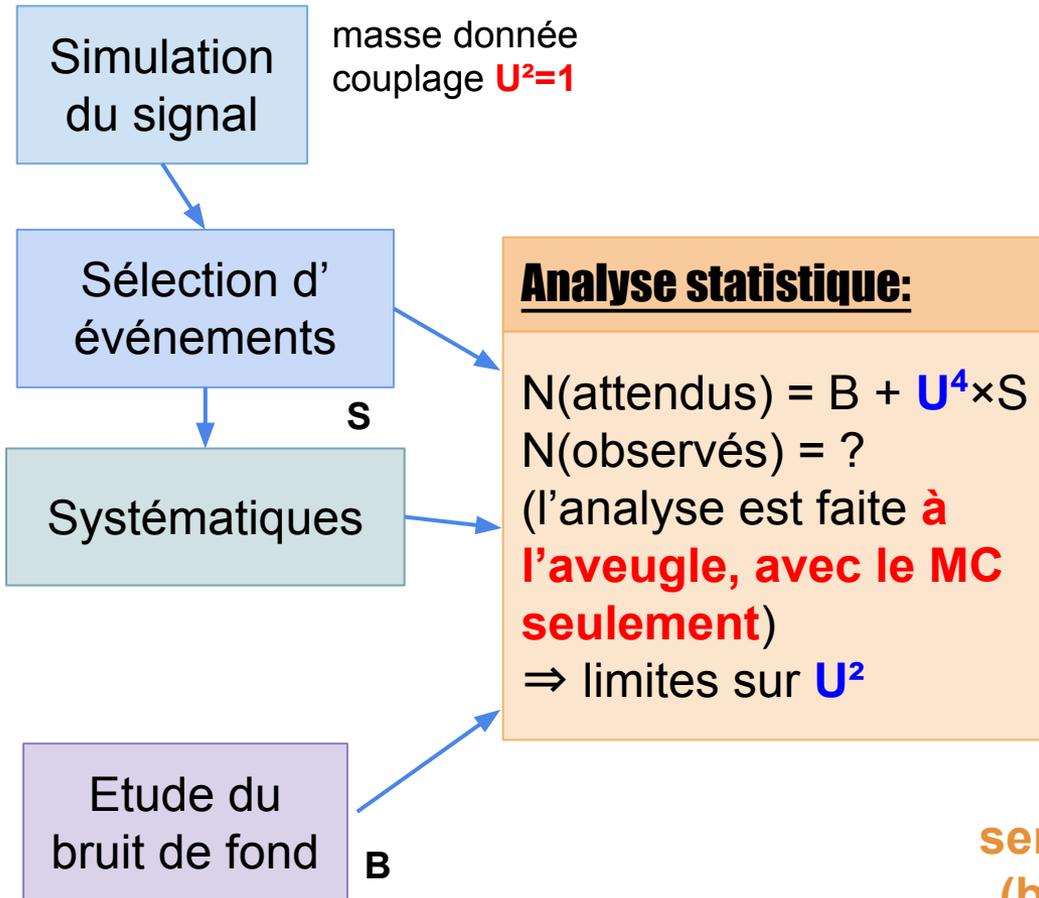
Neutrinos lourds dans T2K



- produits dans la désintégration de kaons ($m < 493$ MeV, flux $\propto U^2$)
- détectés dans le détecteur proche par leur *désintégration* (car instables) en lepton + pion ($m > 140$ MeV, nombre d'événement $\propto U^4$)

T2K peut voir des neutrinos lourds avec une masse **entre 140 et 493 MeV**

Analyse

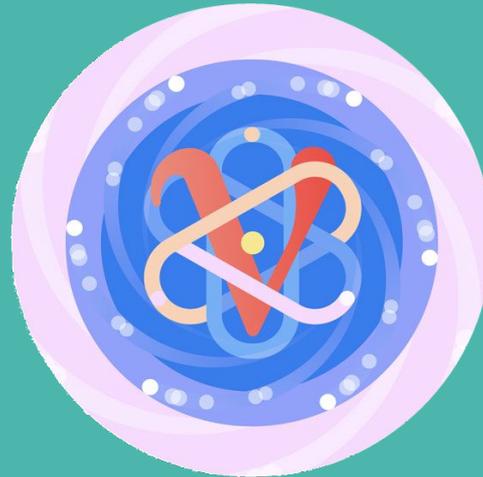


**sensibilité attendue pour T2K
(basée sur des simulations)**

Recherche de stériles légers

Expérience STEREO

Aurélie
(DPhN)



Motivation

L'anomalie des neutrinos de réacteur (2011)



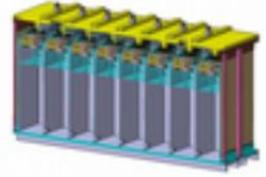
PRODUCTION
(flavours)

ν_e

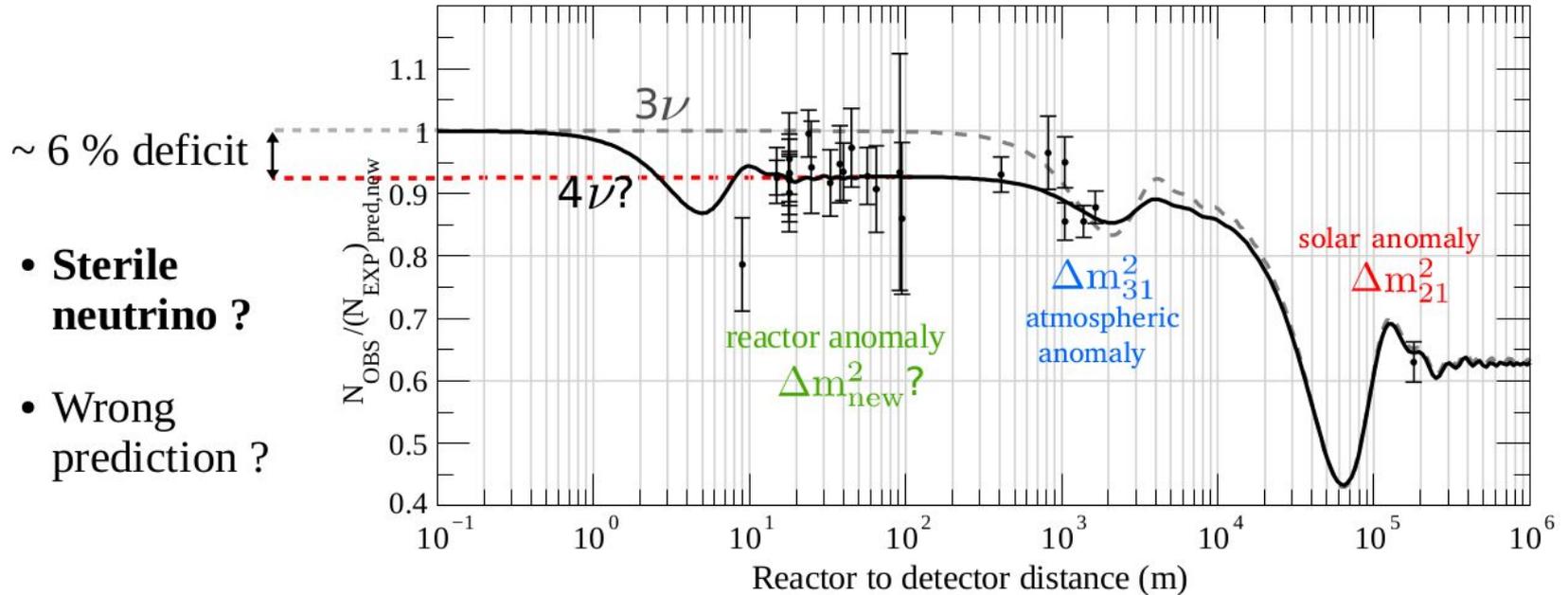
PROPAGATION
(masses)

$\nu_{m1} \nu_{m2} \nu_{m3}$

$\nu_e?$
 $\nu_\mu?$
 $\nu_\tau?$



DETECTION
(flavours)



- Sterile neutrino ?
- Wrong prediction ?

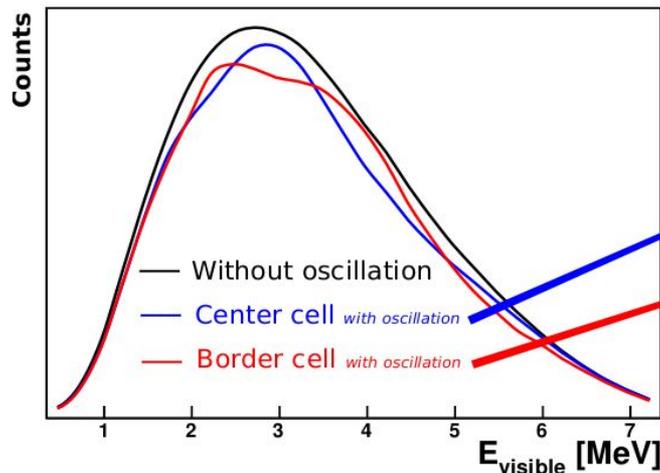
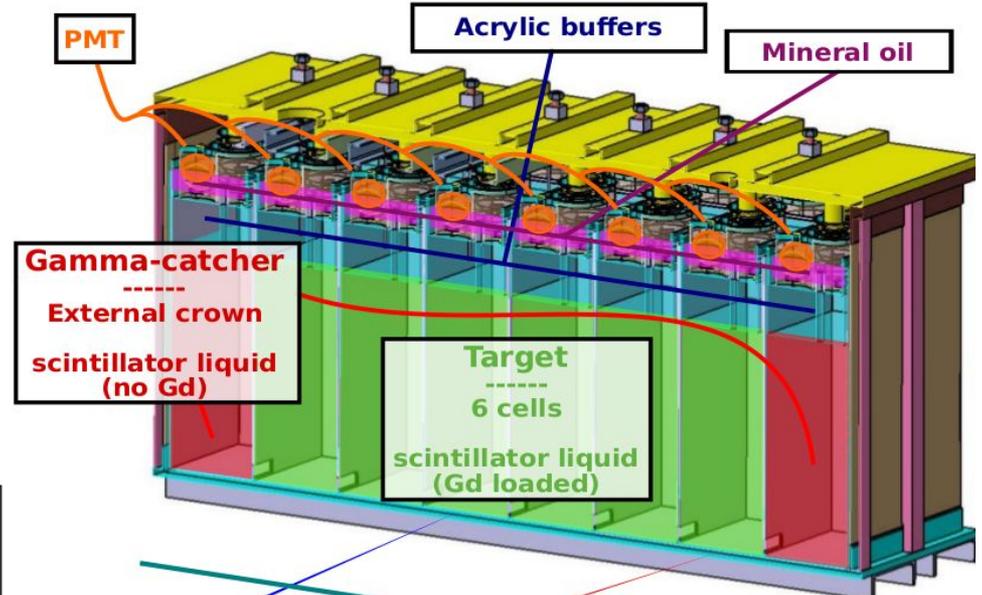
$$P_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e}(E_{\bar{\nu}_e}, L) = 1 - \sin^2(2\theta_{new}) \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m_{new}^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}]}{E_{\bar{\nu}_e} [\text{MeV}]} \right)$$

L'expérience Stéréo

Comment mesurer une oscillation ?

⇒ En mesurant le nombre neutrinos de réacteur en fonction de la **distance** et de **l'énergie**

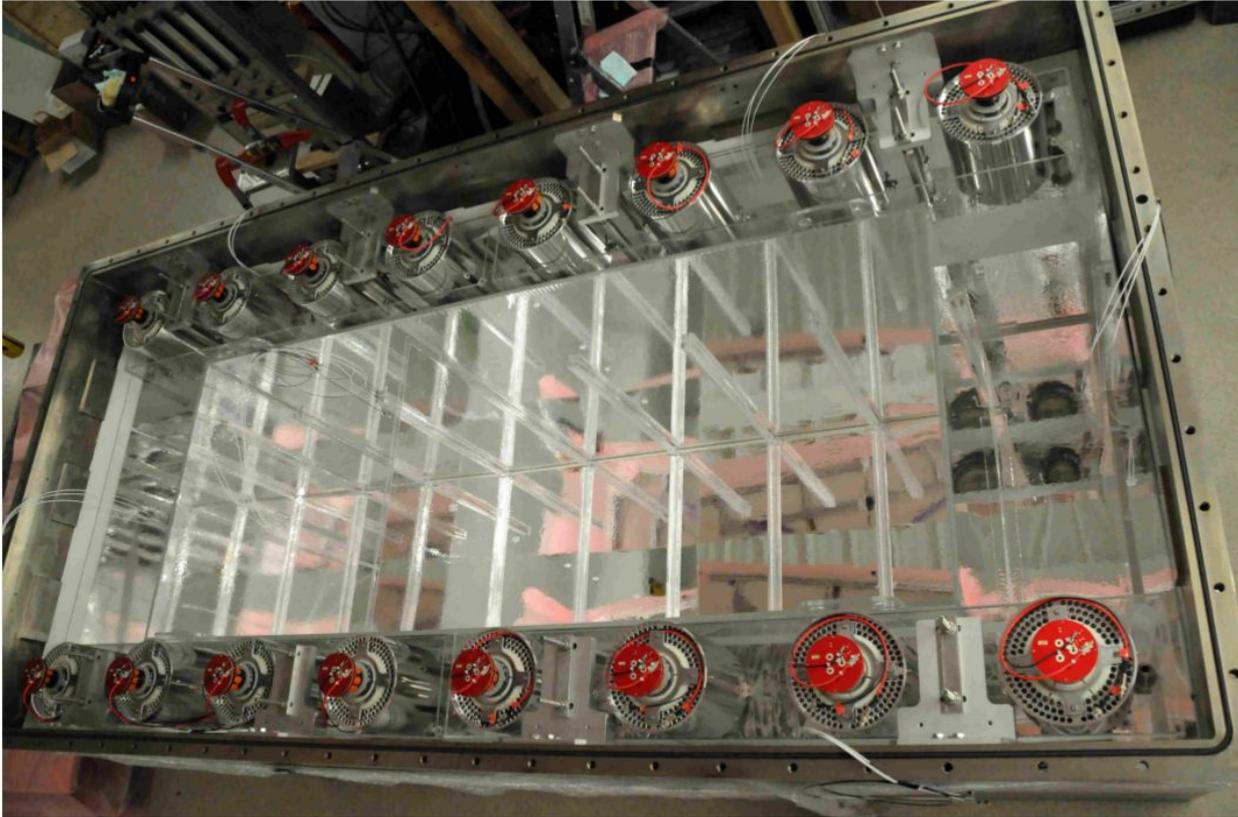
Mesure relative



$$P_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e}(E_{\bar{\nu}_e}, L) = 1 - \sin^2(2\theta_{new}) \sin^2\left(1.27 \frac{\Delta m_{new}^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}]}{E_{\bar{\nu}_e} [\text{MeV}]}\right)$$

L'expérience Stéréo

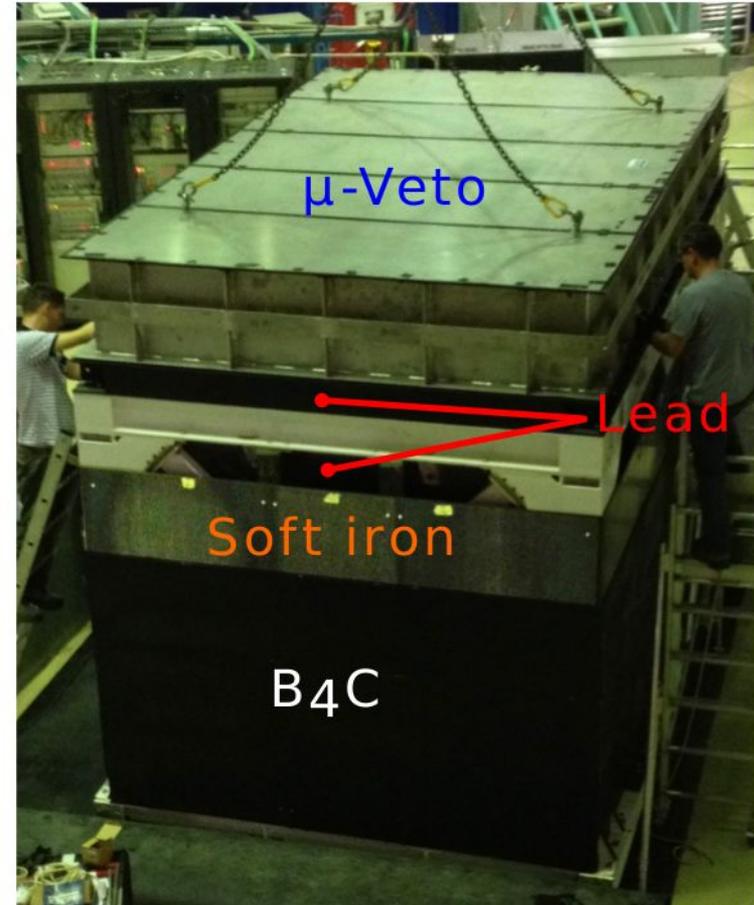
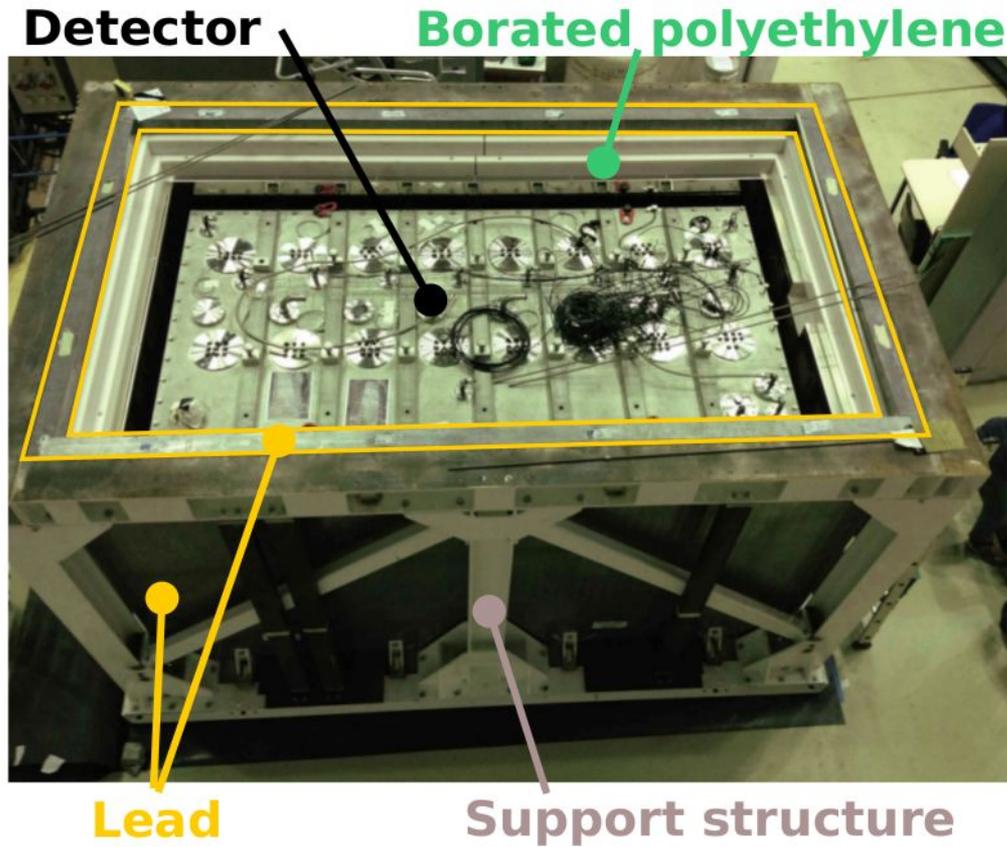
Montage du détecteur, à Grenoble



Inner detector mounting - spring 2016

L'expérience Stéréo

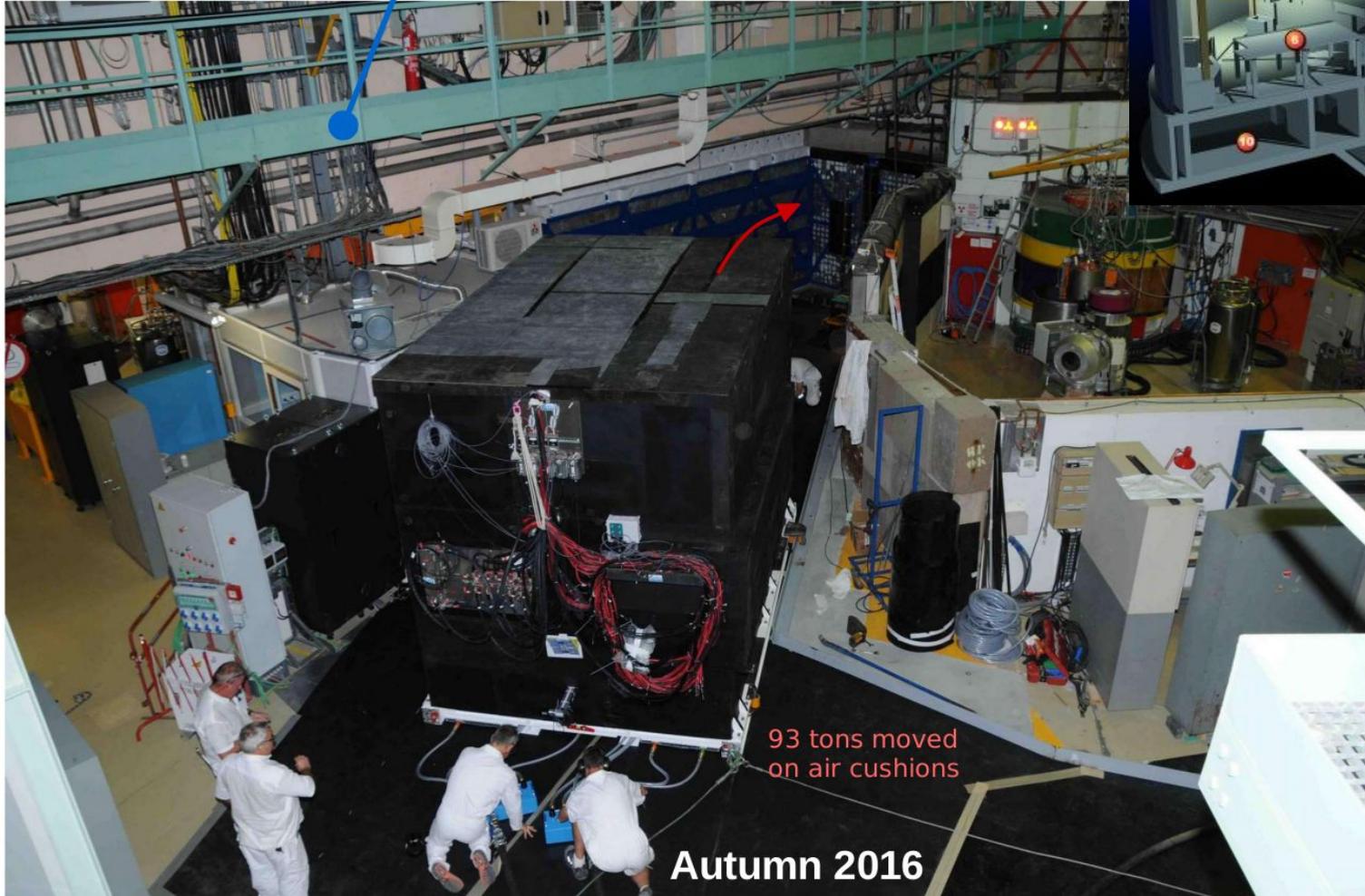
Montage du détecteur, à Grenoble



L'expérience Stéréo

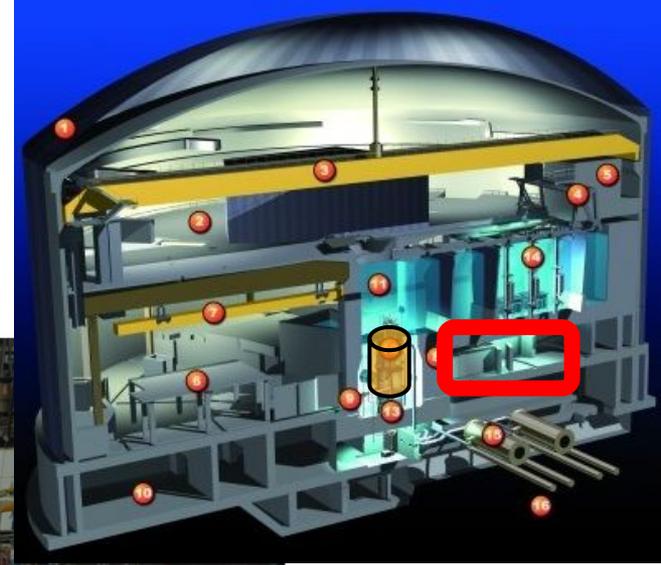
Installation

Water channel
15 mwe overburden



93 tons moved
on air cushions

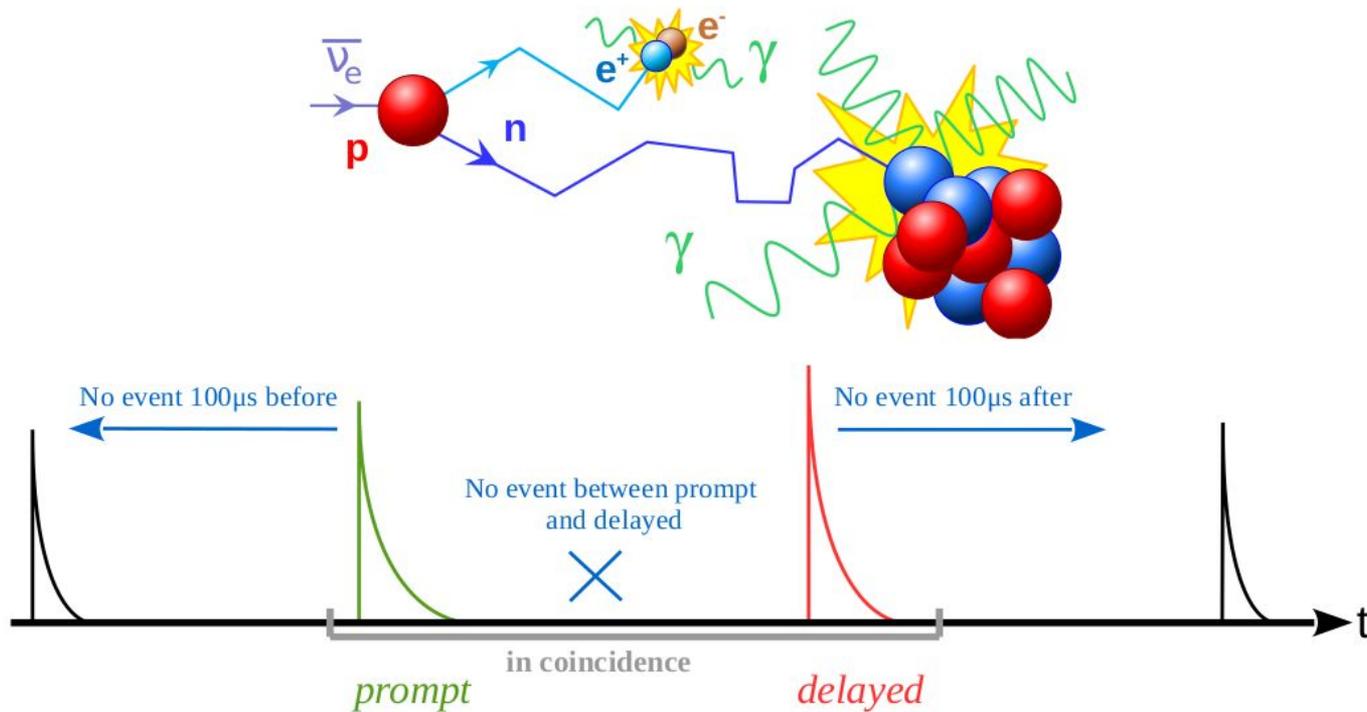
Autumn 2016



L'expérience Stéréo

Comment détecte t-on un antineutrino électronique ?

Réaction bêta inverse dans le liquide



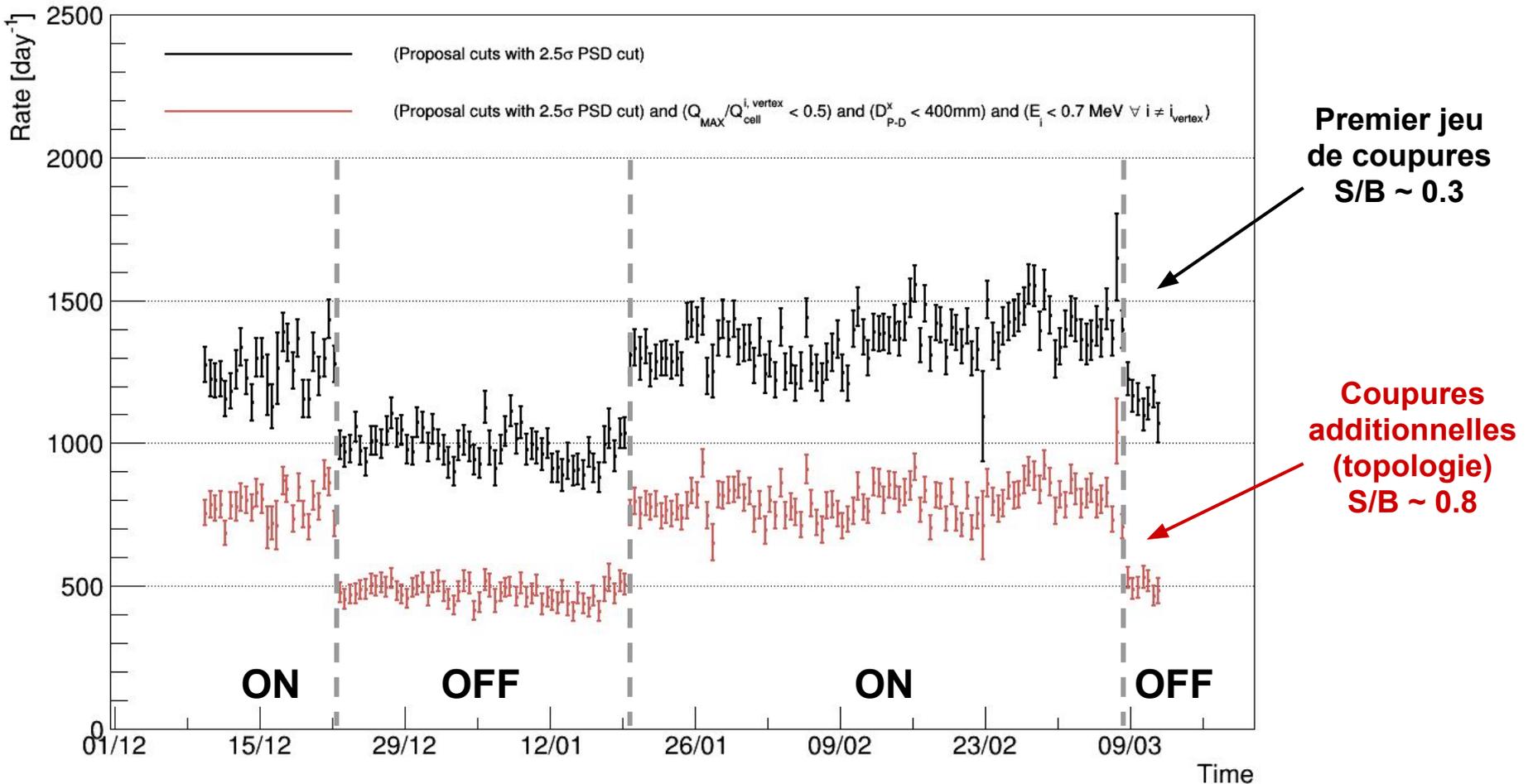
Energy deposit and annihilation of e^+
 $E_{\text{detector}} \in [2,8] \text{ MeV}$

Capture on Gd and γ cascade
 $E_{\text{detector}} \in [5,1] \text{ MeV}$

L'expérience Stéréo

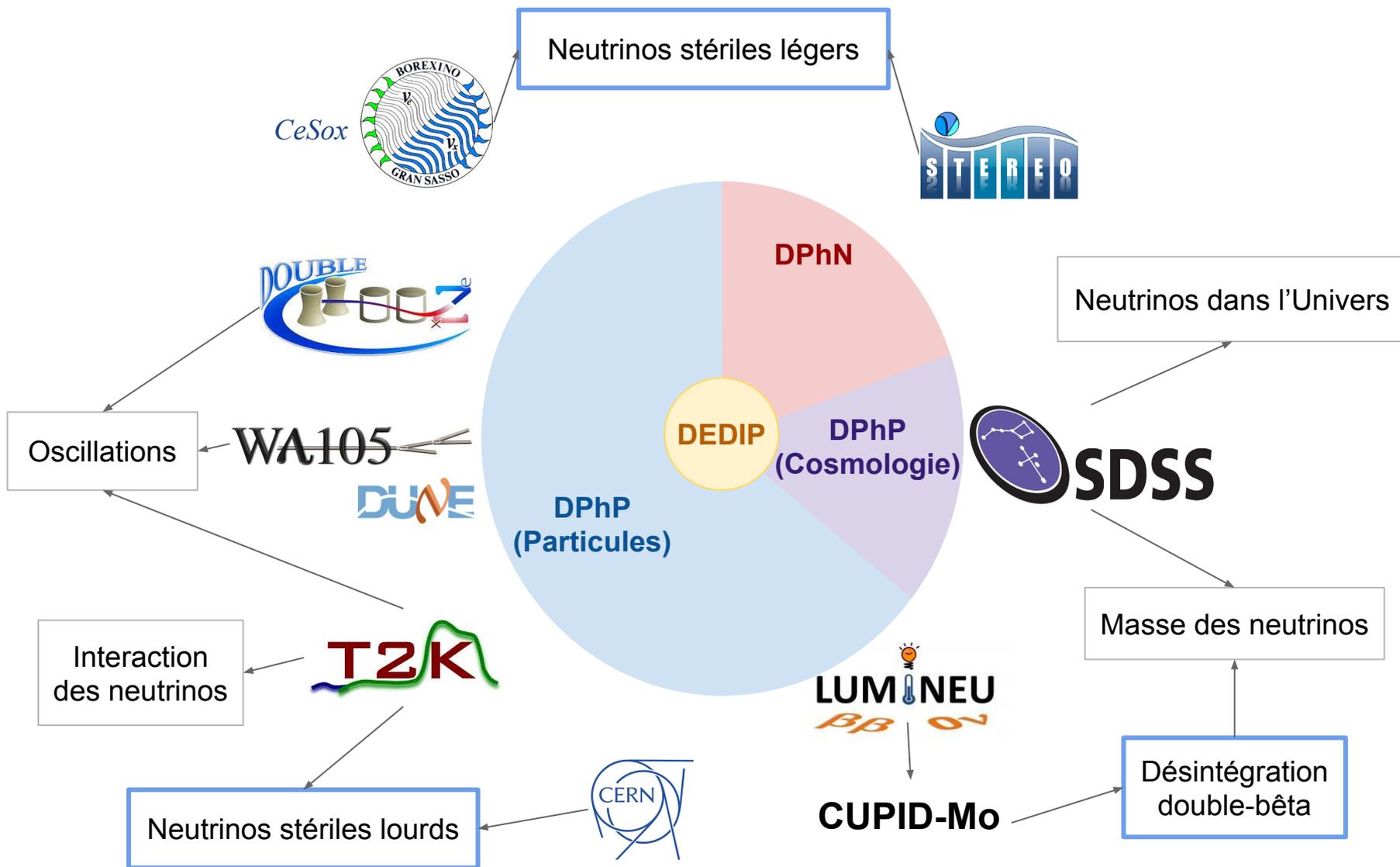
Les premiers neutrinos !

Evolution du taux de candidats IBD dans le détecteur Stéréo



Conclusion

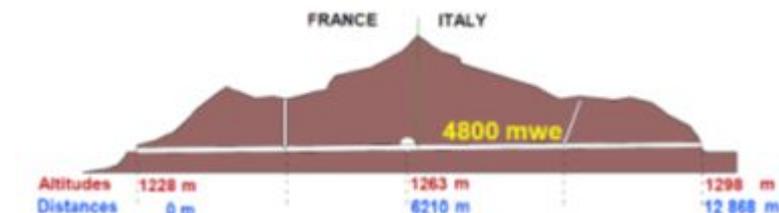
Conclusion : les neutrinos à l'IRFU



Backups

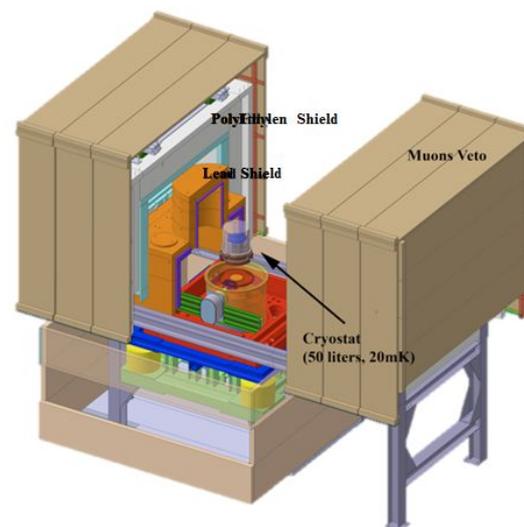
Laboratoire Souterrain de Modane (LSM):

- Tunnel de Fréjus
- 1,7 km de surcharges de roches (~ 4,8 km, w.e)
- Réduction cosmétique $\mu = 10^{-8}$ (1 / m²h)
- Flux d'air déradonisé (~ 30 mBq / m³)



Installation EDELWEISS:

- Chambre propre
- Cryostat en cuivre
- Faible teneur en radioactivité (min. 20 cm)
- Polyéthylène (min. 50 cm)
- Surveillance de μ / n / Ra
- Muon veto





From LUMINEU to CUPID-Mo

Tests of ZnMoO_4 , natural and enriched. (from 2008)



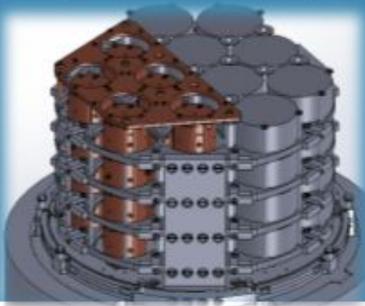
Tests of Li_2MoO_4
First crystals - 2010



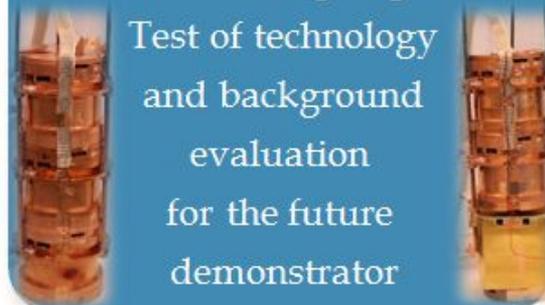
$\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$: production of first enriched crystal in 2015



20 enriched crystals: autumn 2017. Prove of 0-background experiment concept



Two suspended towers, 4 enriched $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$ crystals
winter 2016 – spring 2015



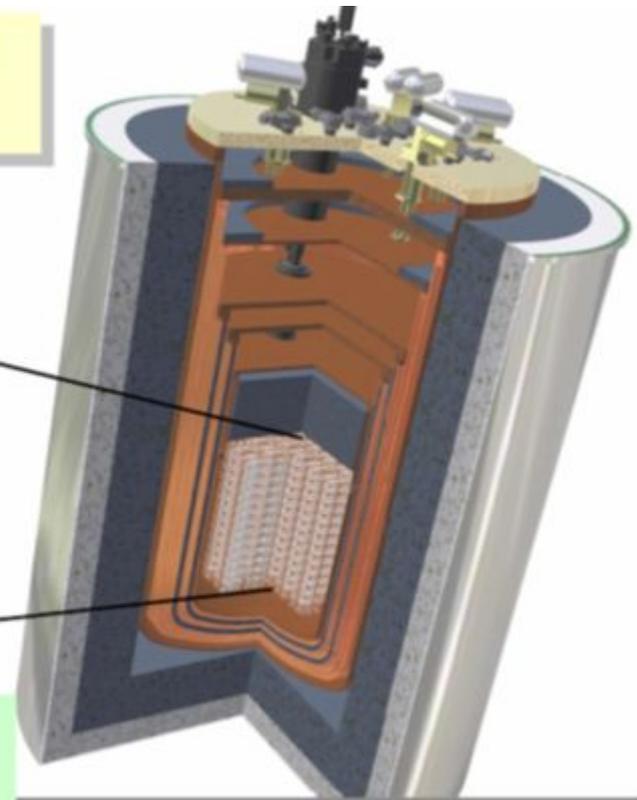
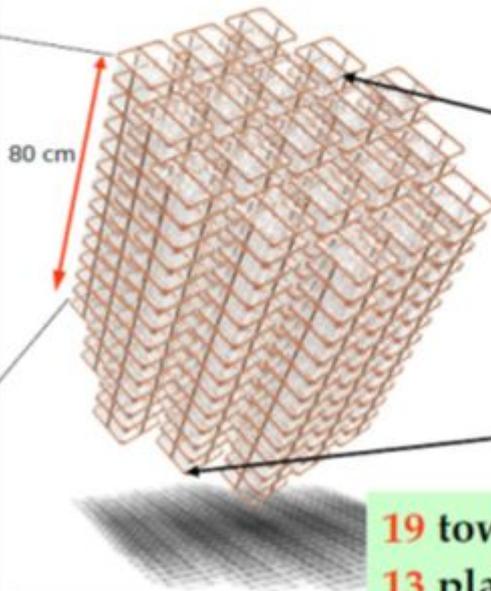
Test of technology and background evaluation for the future demonstrator

Suspended tower in LSM to compare ZnMoO_4 and $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$ to choose best (2015-2016)



CUPID: CUORE Upgrade with Particle IDentification

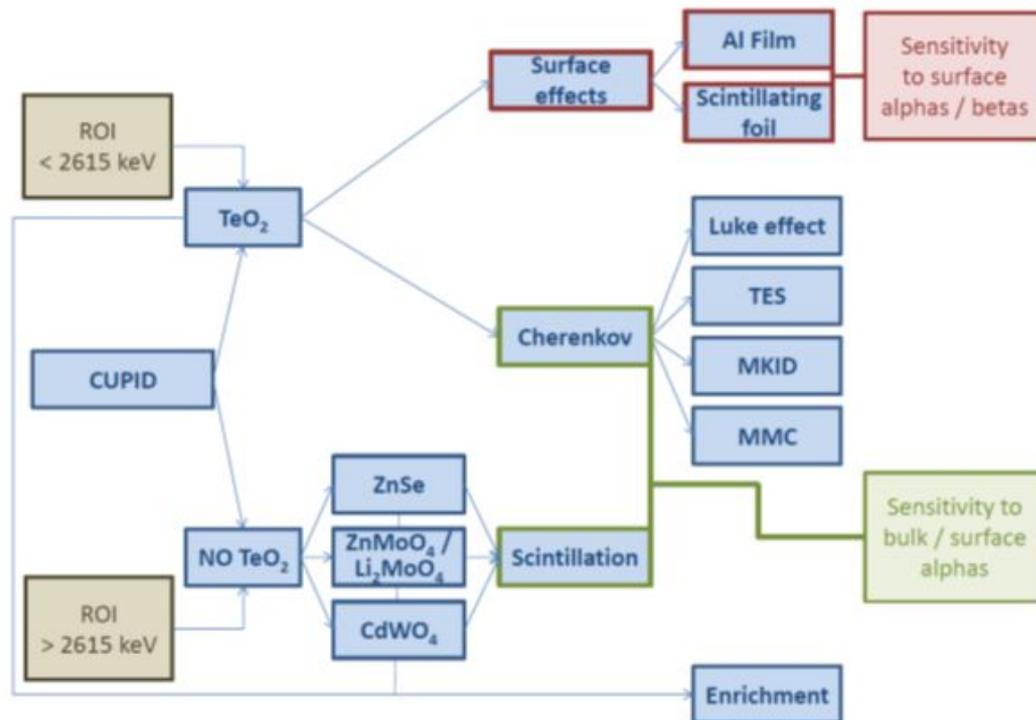
Array of 988 TeO_2 $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ detectors (750 g each)
 $M = 741 \text{ kg}$ of $\text{TeO}_2 = 206 \text{ kg}$ of ^{130}Te



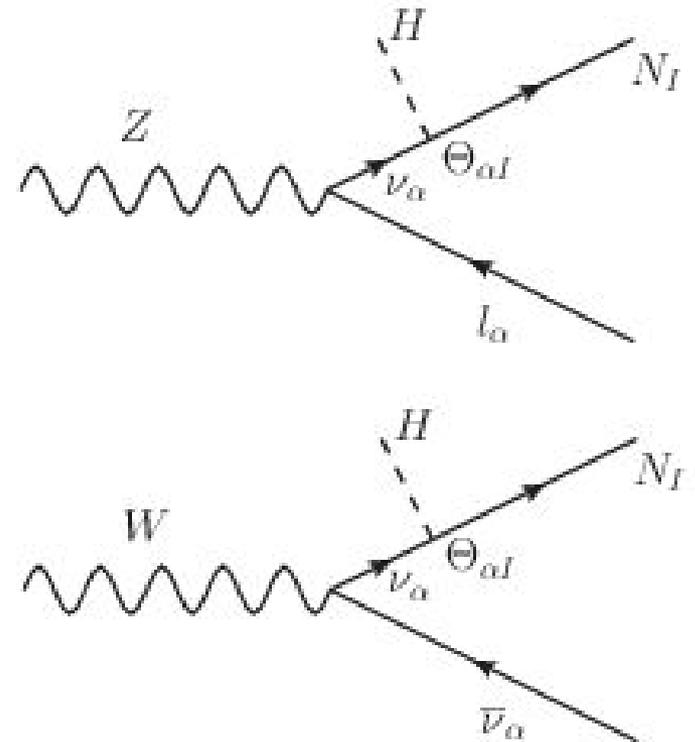
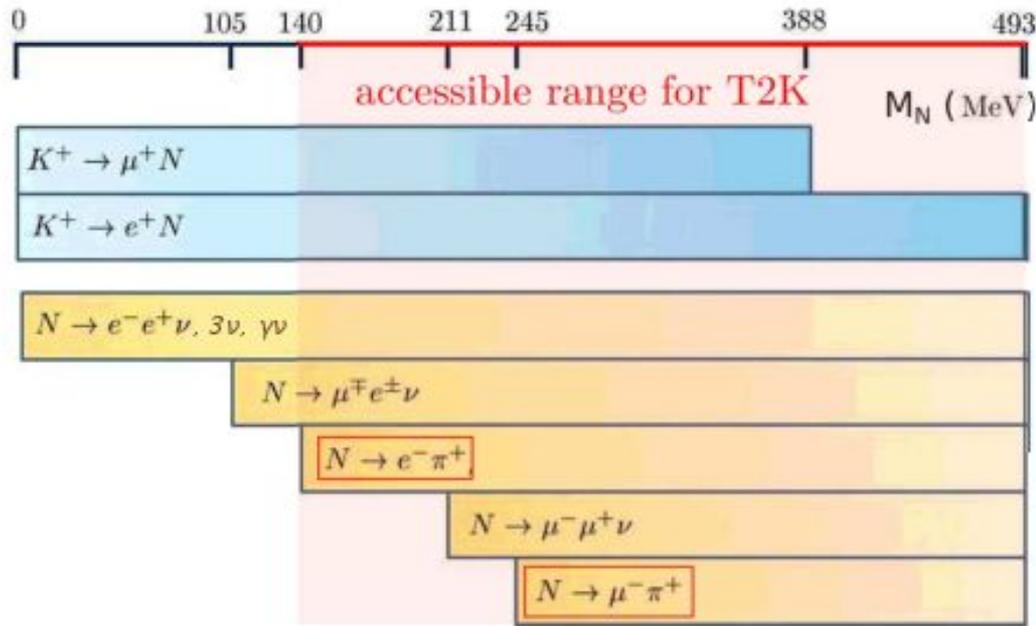
**19 towers with
13 planes of
4 crystals each**

CUPID: CUORE Upgrade with Particle IDentification

- Suivi de CUORE avec fond amélioré par un facteur 100
- Réduire / contrôler fond des matériaux et des muons / neutrons
- Améliorer la technologie des détecteurs pour éliminer fond de surface

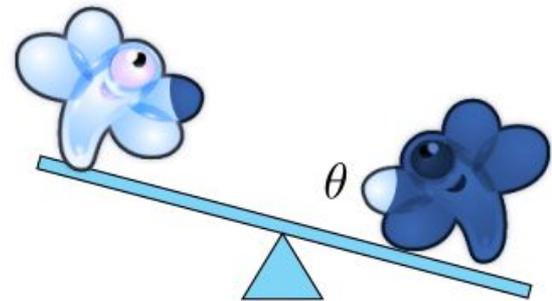


Neutrinos lourds



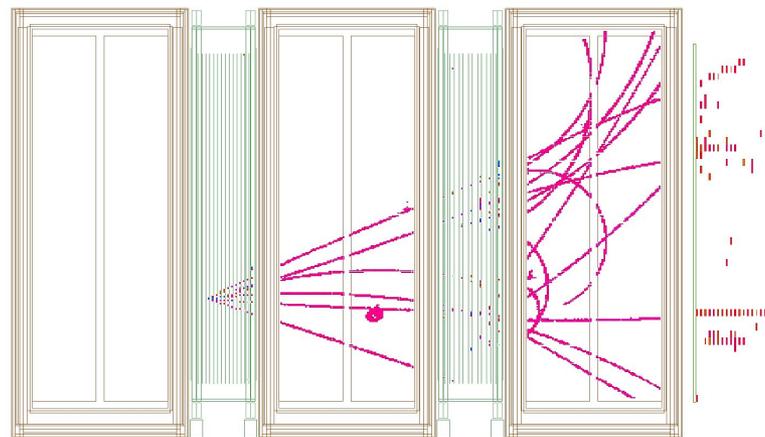
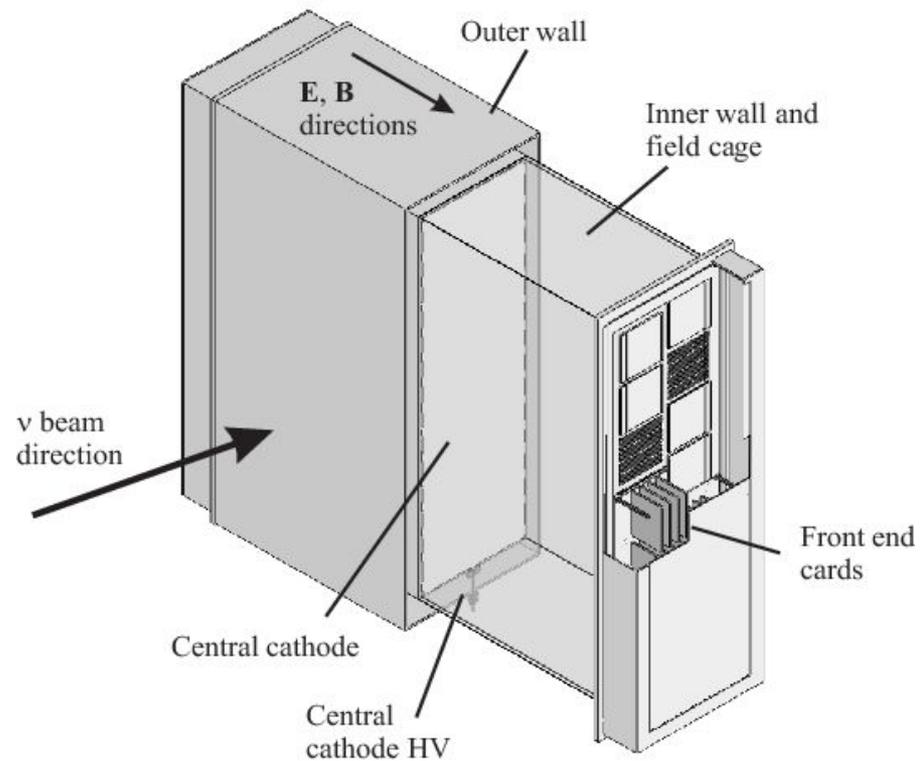
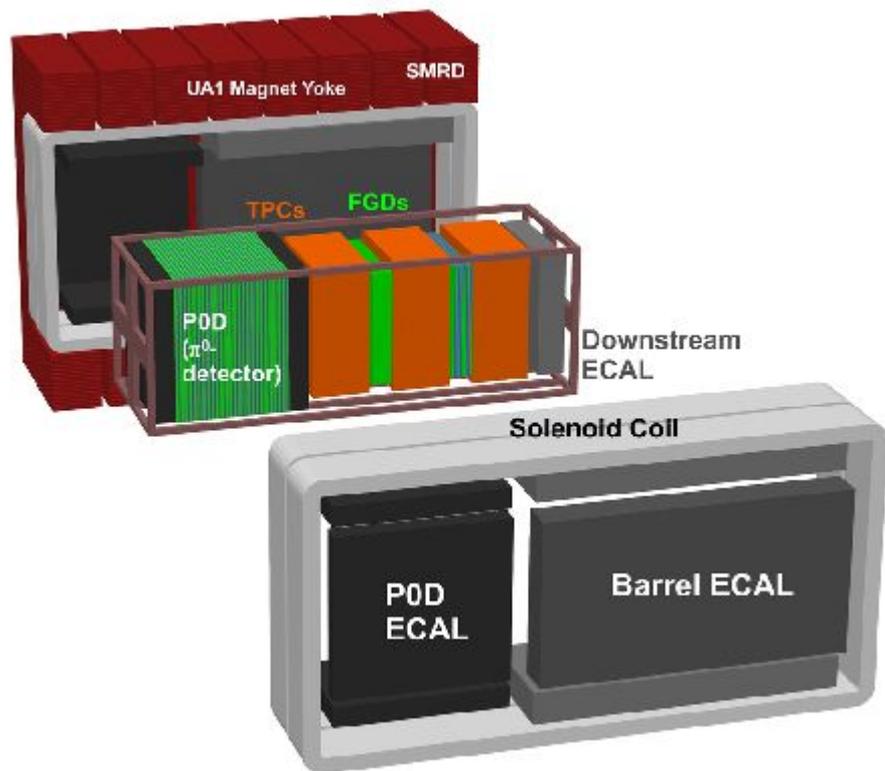
If $\theta \equiv A/B \ll 1$ (seesaw condition), the matrix has two mass eigenstates:

- one mainly left (active) with mass $m \simeq \theta^2 B$
- one mainly right (sterile) + a fraction θ of left (active) with mass $M \simeq B$

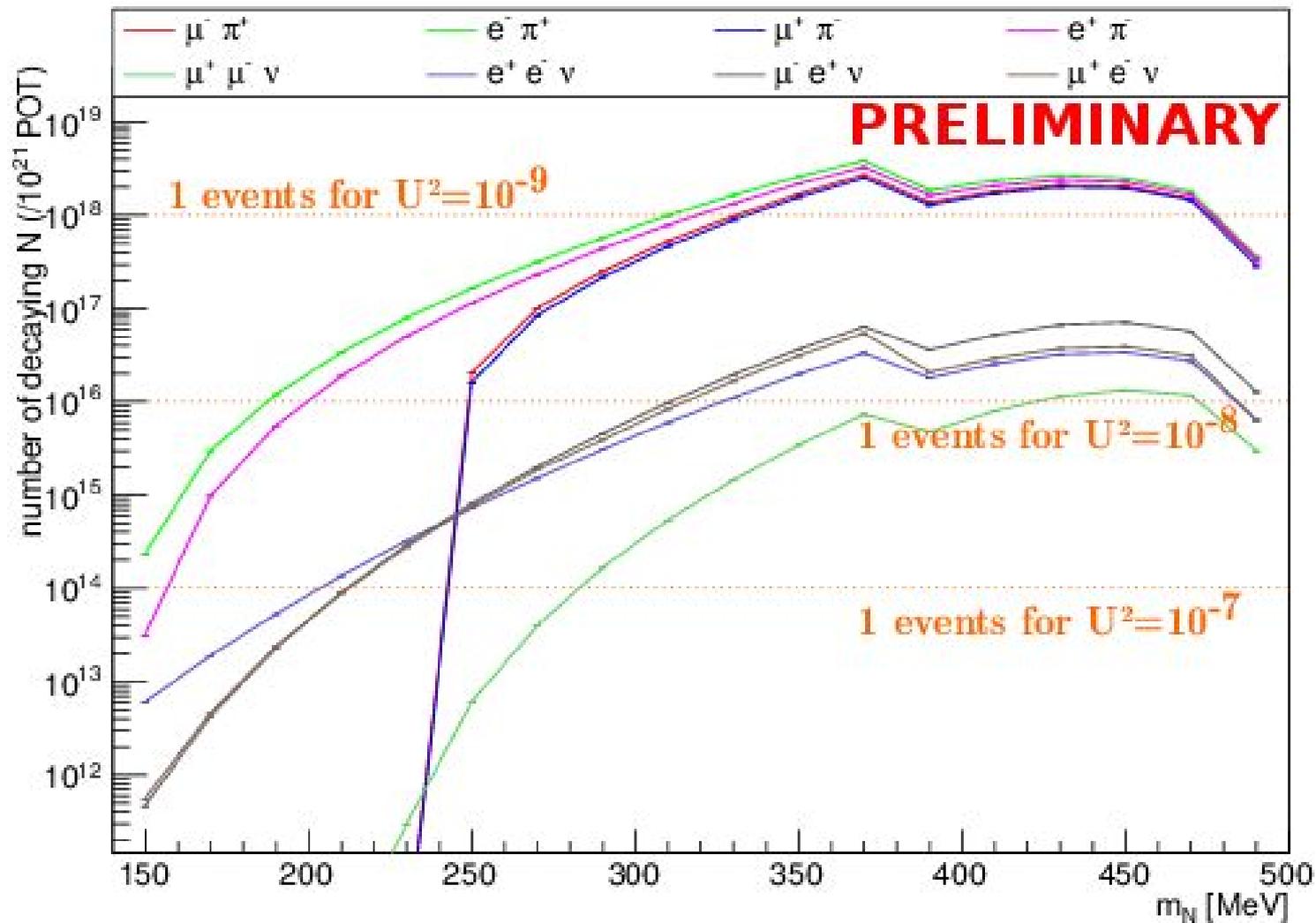


$\sim 0.1 \text{ eV}$ keV?
 GeV?
 10^{16} GeV?

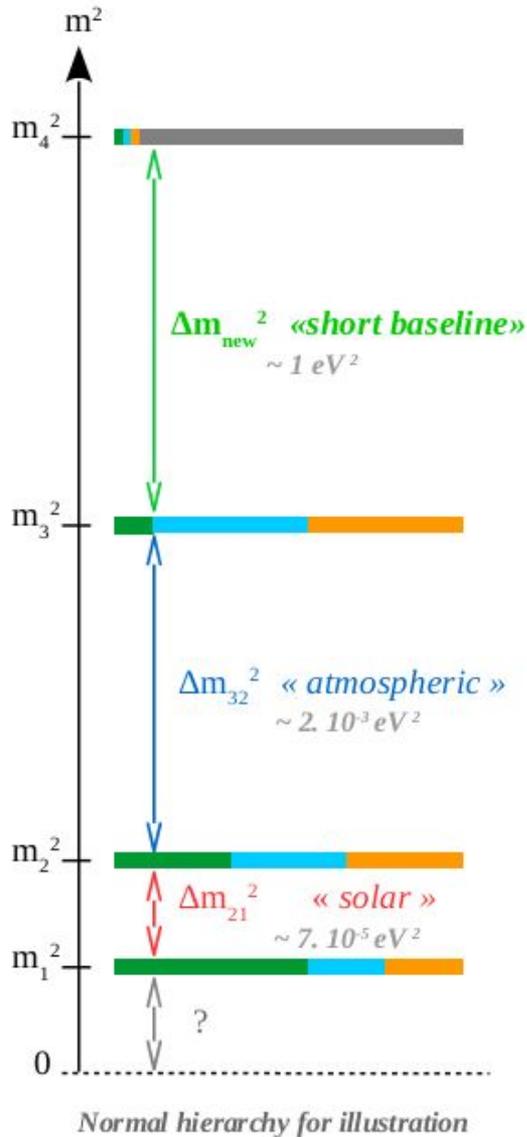
ND280



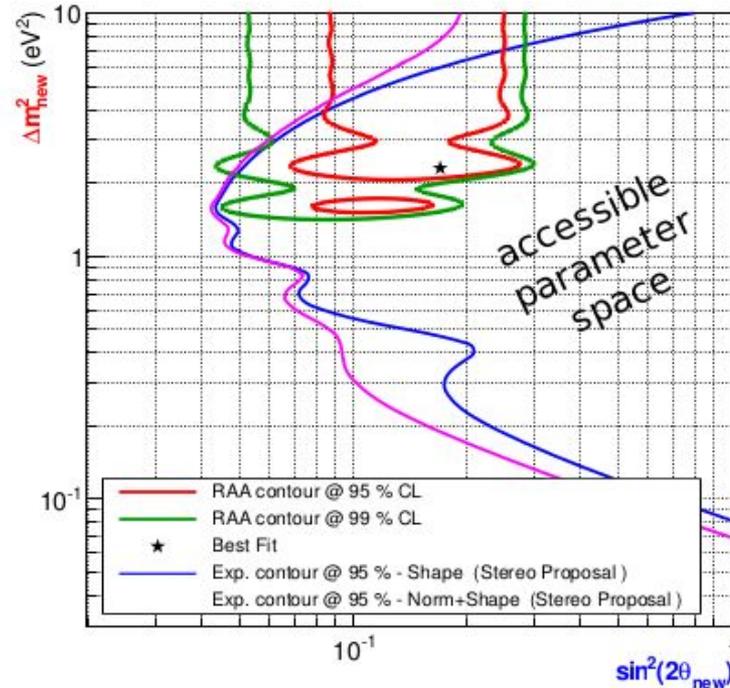
Simulation des neutrinos lourds



Stéréo: sensibilité



Introducing sterile neutrinos at the eV^2 mass-scale
 $\rightarrow U_{PMNS}$ is now a 4x4 matrix
 Two new parameters: $\sin^2(2\theta_{new})$ and Δm_{new}^2



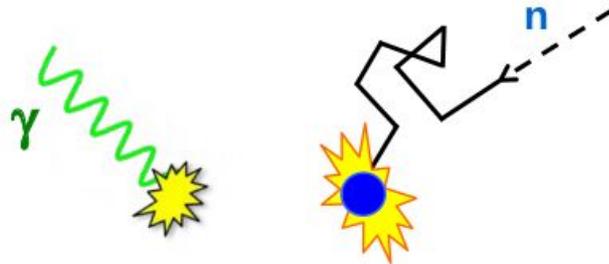
\rightarrow STEREO will look for oscillations in this parameter space region

Stéréo: bruit de fond

Background is reduced via passive shieldings, **online** and **offline** rejections.
The remaining component is **subtracted statistically**

Two main backgrounds:

- Random coincidences between uncorrelated signals → Reduced via **topological cuts** in distance. Subtracted via the **off-time windows method**.
- Physically correlated signals from cosmics



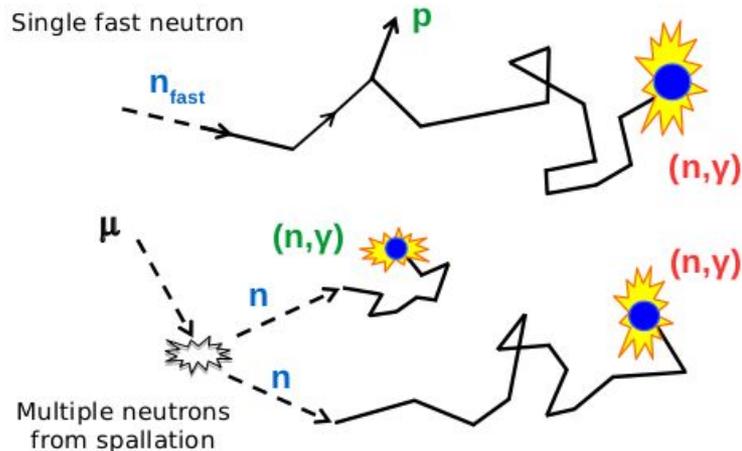
Stéréo: bruit de fond

Background is reduced via passive shieldings, **online** and **offline** rejections.
The remaining component is **subtracted statistically**

Two main backgrounds:

- Random coincidences between uncorrelated signals
- Physically correlated signals from cosmics

→ Rejection via a **muon veto**, **isolation cuts** and **pulse shape discrimination**
Subtracted based on **reactor OFF** measurements.



L'expérience Stéréo

Les premiers neutrinos !

Evolution du taux de candidats IBD dans le détecteur Stéréo

