

# Neutrinos et matière noire, de l'ombre à la lumière

30<sup>ème</sup> colloque Bouyssy  
Thibaut Houdy



15 décembre 2022

# Qui suis-je?

L1-L2, CPGE, Lycée Chaptal, Paris (2009 – 2011)  
 L3 -Magis. de Phys. Fonda, U. Paris-Sud (2011 – 2013)  
 M2 NPAC, U. Paris-Sud (2013 – 2014)

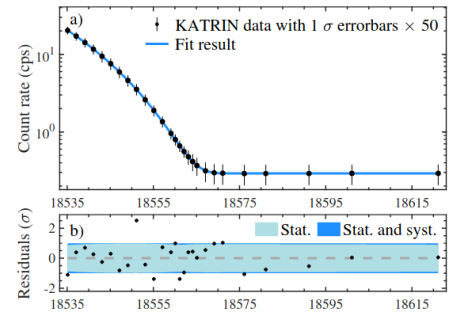


**Doctorat**, APC/CEA-Irfu, U. Paris-Diderot (2014 – 2017)

- Etude des **neutrinos solaires ( $^8\text{B}$ ) et stériles ( $e\nu$ ) dans Borexino**

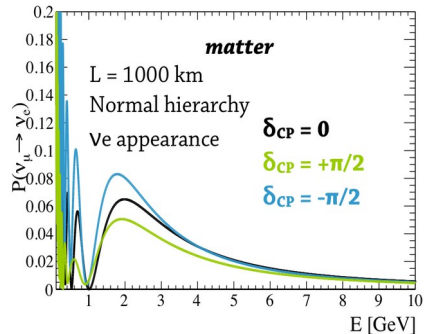
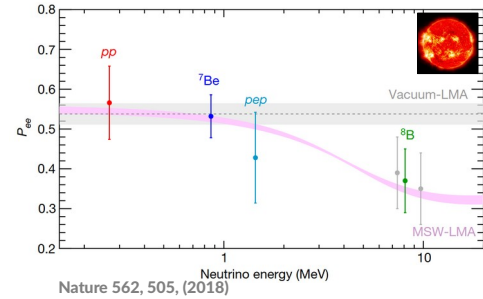
**Postdoctorat**, Max-Planck Physique, Munich, (2018 - 2021)

- Rejoins **KATRIN (masse du neutrino)**
- Recherche de **neutrinos stériles au keV** avec **KATRIN**



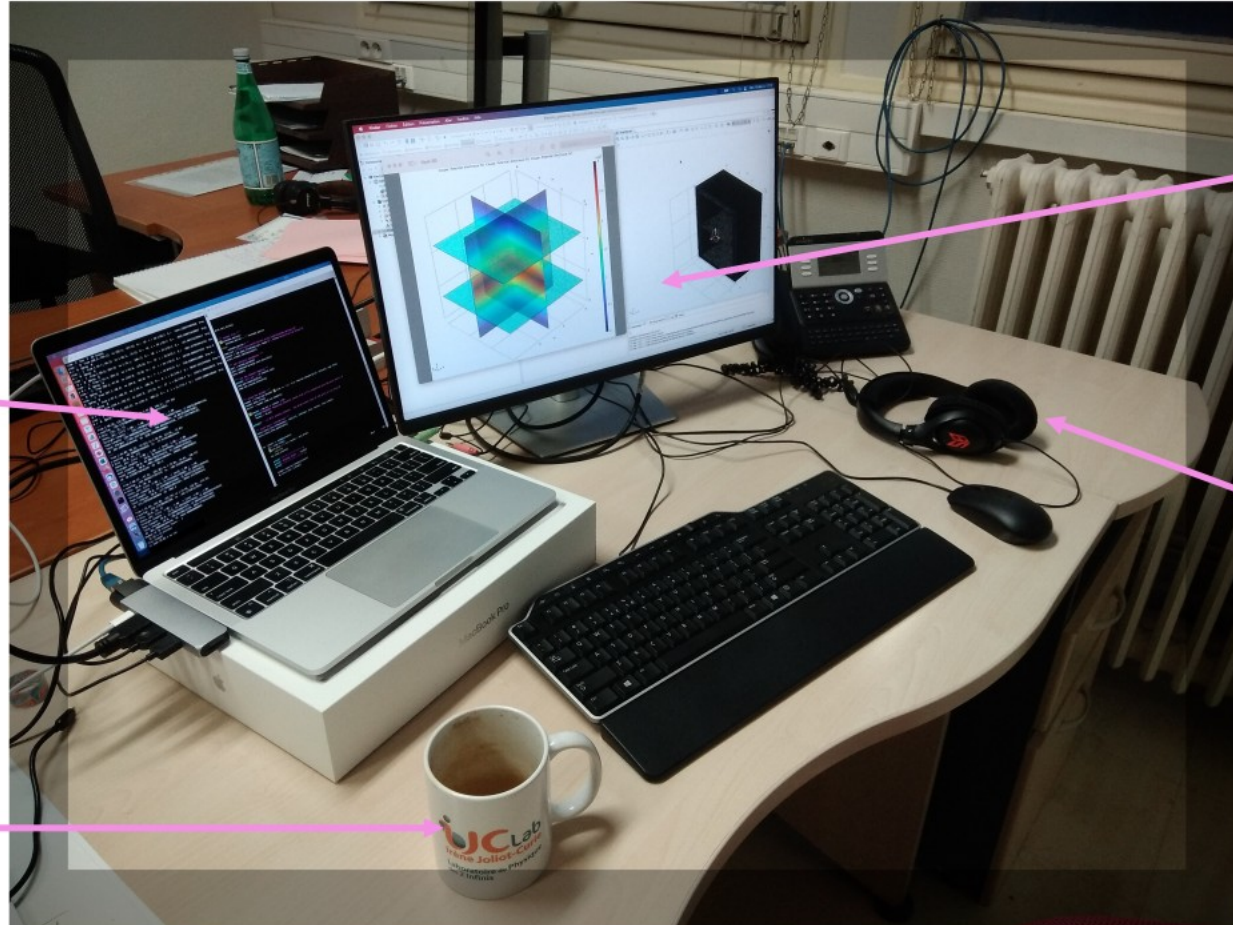
**Maitre de conférence**, l'U. Paris-Saclay, IJCLab (2021 -)

- Cours en Electromagnétisme, Instrumentations et Nucléaire & Particules. Responsable de la plateforme  $E_2\text{PN}$
- Rejoins DUNE (**hiérarchie de masse, phase CP**, unitarité de la matrice PMNS)



# Le métier de chercheur

**Analyse de données**  
(code informatique  
C++, python, bash, ...)



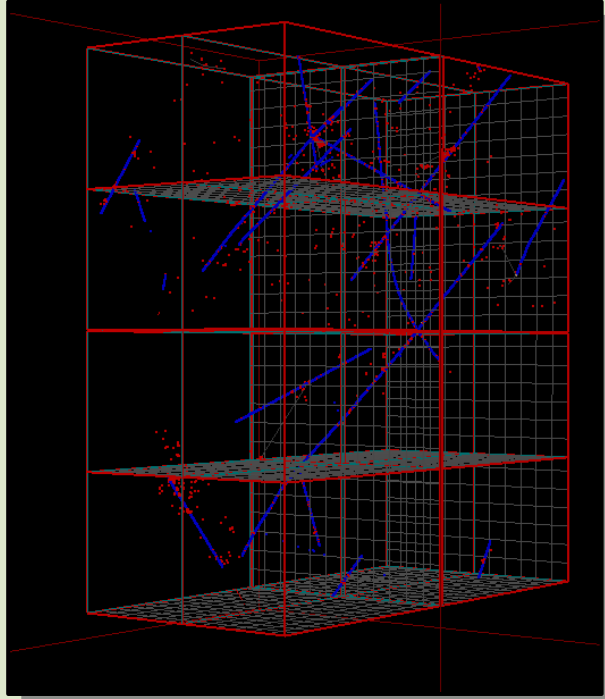
**Simulations numériques**  
(thermique, électrostatique)

**Télé-réunions à distance**  
(plusieurs fois / semaines,  
Europe – États-Unis)  
**Conférences, ...**

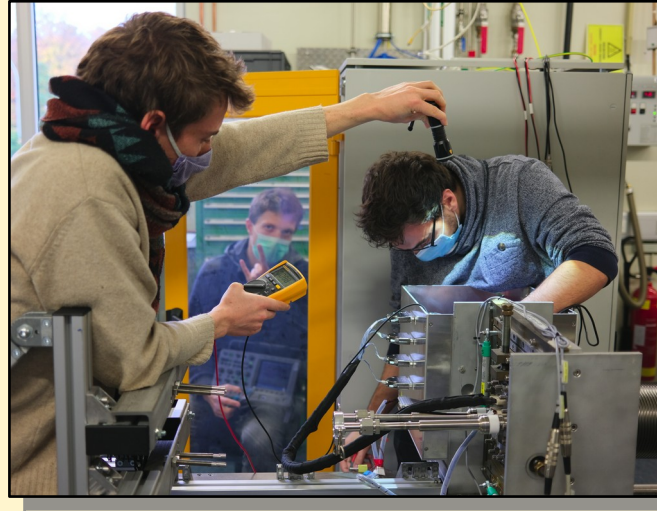
**Café**  
(très important! =D)

Tiré de Y.Kermaidic – 29<sup>ème</sup> Colloque Bouyssi

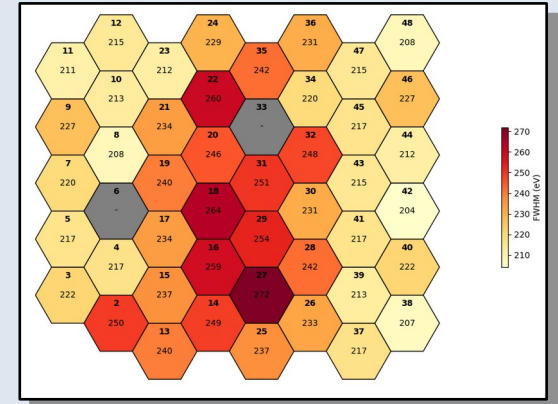
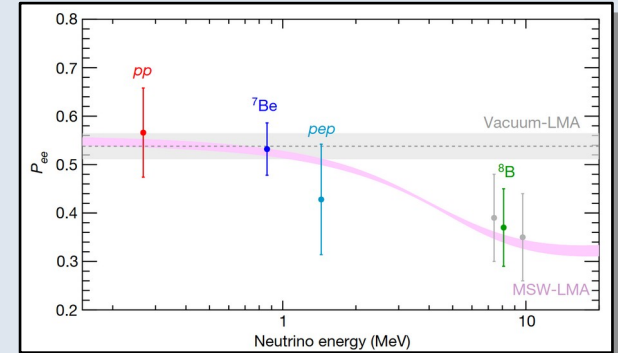
# Le métier de chercheur



Simuler les effets physiques en amont pour optimiser la sensibilité de l'expérience en aval pour comprendre les données

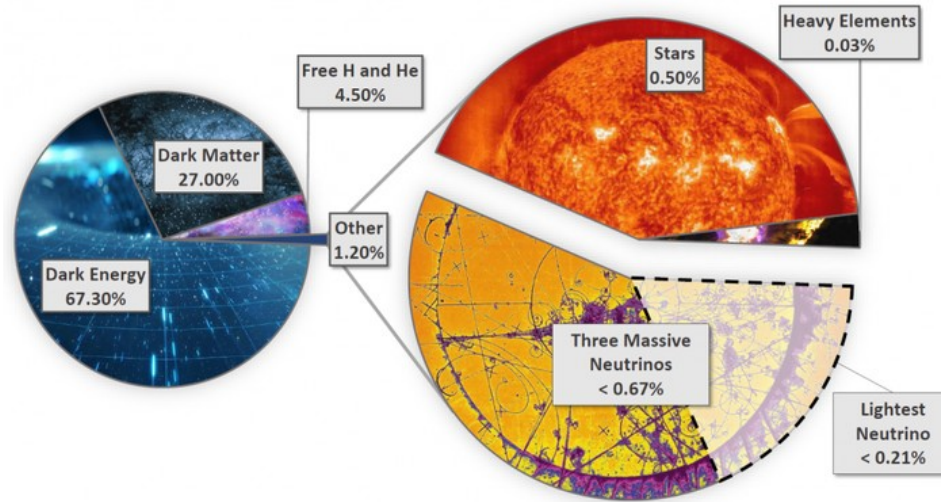


Construire des prototypes et les tester dans des environnements exigeants (ultra vide, souterrain, très froid, champ magnétique ou potentiel électrostatique intense)



Analyser des données, en déduire des propriétés physiques et évaluer les performances des technologies utilisées

# L'Univers



- Qu'est-ce que la matière noire?
- Quelle est l'évolution de l'univers depuis le Big Bang?
- Qui est responsable de l'asymétrie matière/antimatière?

# La matière

## Standard Model of Elementary Particles

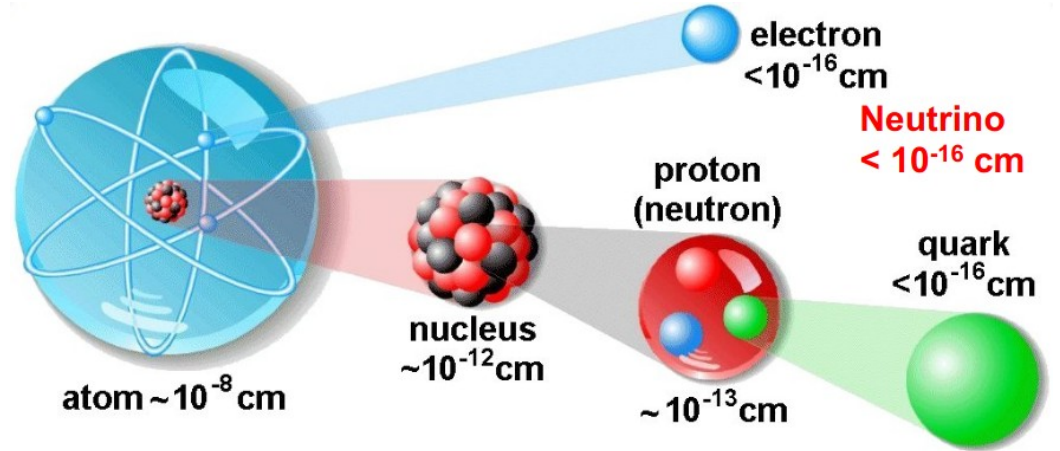
three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)		
	I	II	III		
mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon	<b>H</b> higgs
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b><math>\gamma</math></b> photon	
	<b>e</b> electron	<b><math>\mu</math></b> muon	<b><math>\tau</math></b> tau	<b>Z</b> Z boson	
	<b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	<b>W</b> W boson	

**QUARKS** (left side of the table)

**LEPTONS** (left side of the table)

**GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS** (right side of the table)

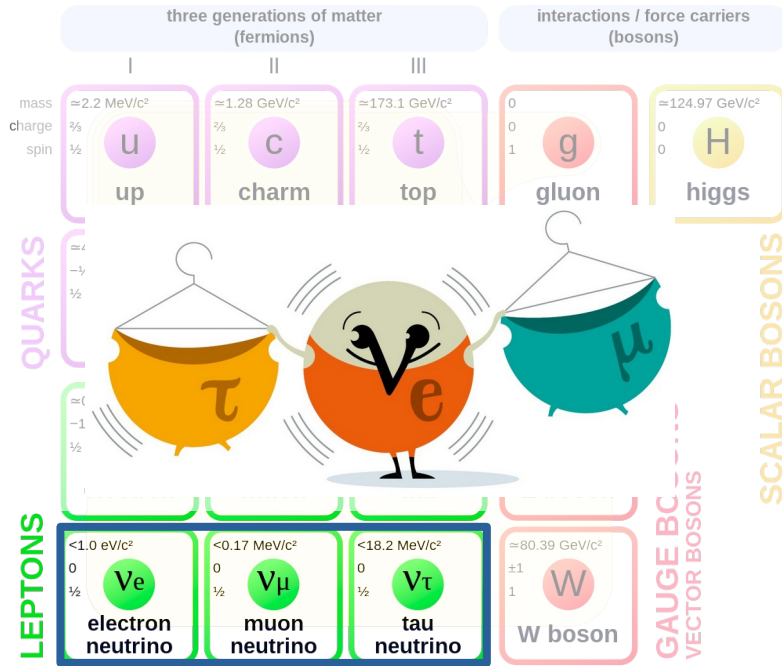
**SCALAR BOSONS** (right side of the table)



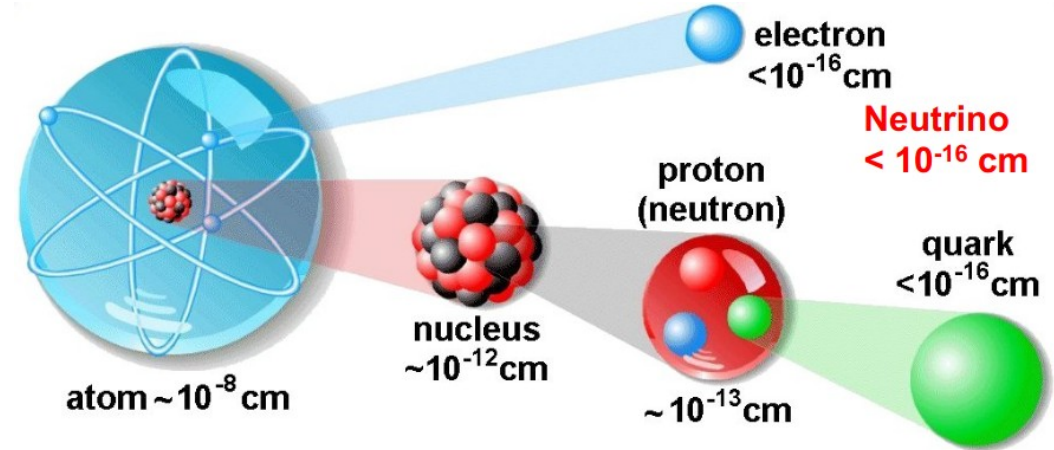
# Les neutrinos

OBSERVE TOUS LES JOURS

## Standard Model of Elementary Particles



Seulement 3?



Propriété unique des neutrinos: ils oscillent!  
 (ils changent de saveur au cours de leur propagation)

# Le neutrino

$$P_{\alpha \rightarrow \alpha} = 1 - \sin^2(2\theta_{ij}) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E}\right)$$

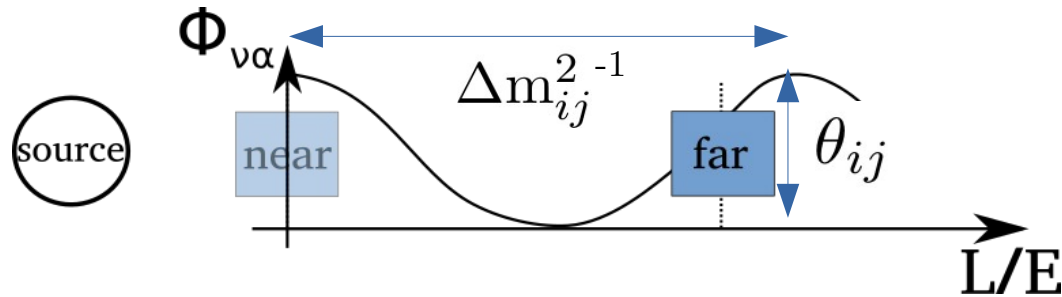
← distance  
← energie

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U_{\text{PMNS}} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} \quad \text{with} \quad U_{\text{PMNS}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i\alpha} & 0 & 0 \\ 0 & ? & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Fixe L,E et on compte les neutrinos



Accès à  $\Delta m^2$  et  $\theta$ !





# Le neutrino

$$\Theta_{23} \sim 38.4 - 53.0$$

$$\Theta_{13} \sim 7.99 - 8.91$$

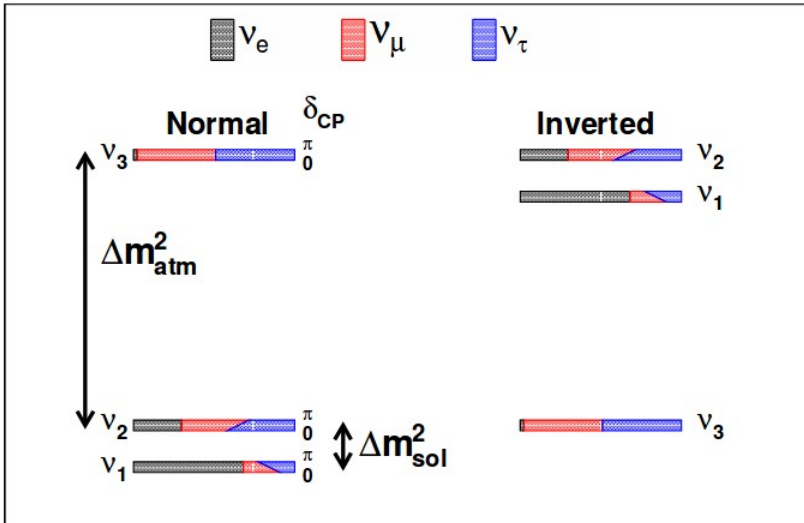
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U_{\text{PMNS}} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} \quad \text{with} \quad U_{\text{PMNS}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i\alpha} & 0 & 0 \\ 0 & ? & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} \delta_{\text{CP}} &\sim [-169, -25] \quad [\text{NH}] \\ \delta_{\text{CP}} &\sim [-84, -72] \quad [\text{IH}] \end{aligned}$$

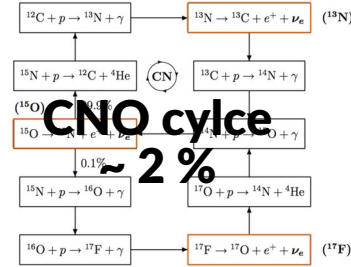
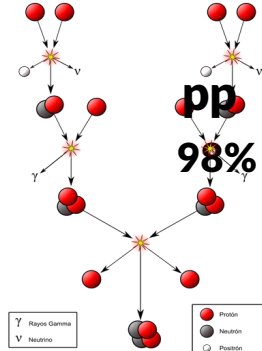
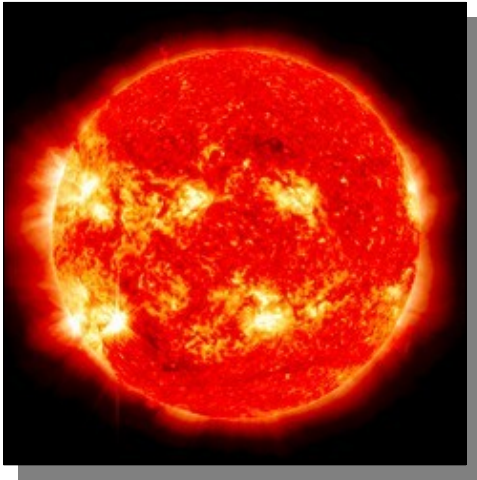
$$\Theta_{12} \sim 31.38 - 35.99$$

$$\Delta m_{21}^2 \sim 7.5 \times 10^{-5} \text{eV}^2$$

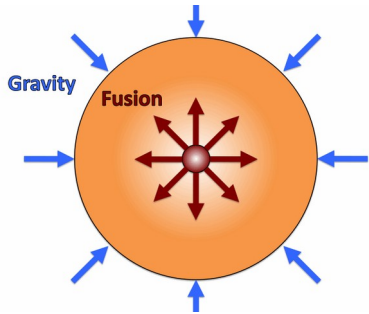
$$\Delta m_{31}^2 \begin{cases} +2.458 \times 10^{-3} \text{eV}^2 \quad [\text{NH}] \\ -2.448 \times 10^{-3} \text{eV}^2 \quad [\text{IH}] \end{cases}$$



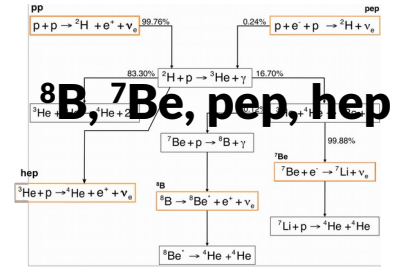
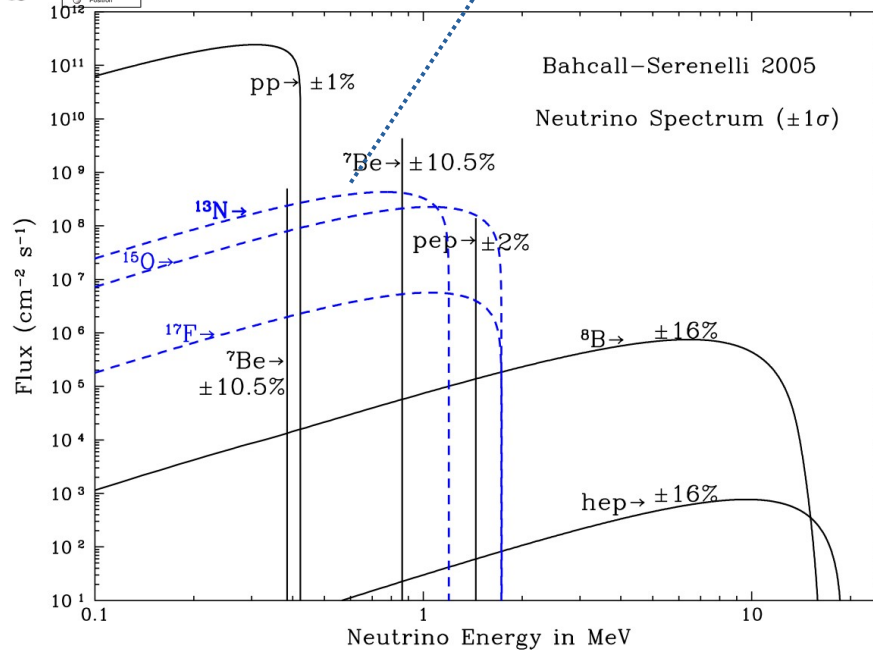
# Les neutrinos solaires



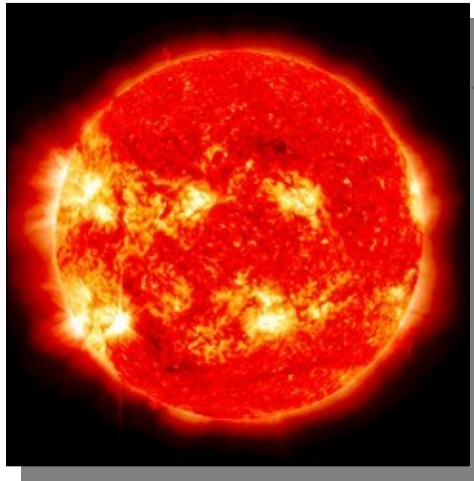
CNO - ?  
Indication de la  
métallicité!



$$\frac{dP}{dr} = -\frac{Gm(r)\rho}{r^2}$$



# Les neutrinos solaires



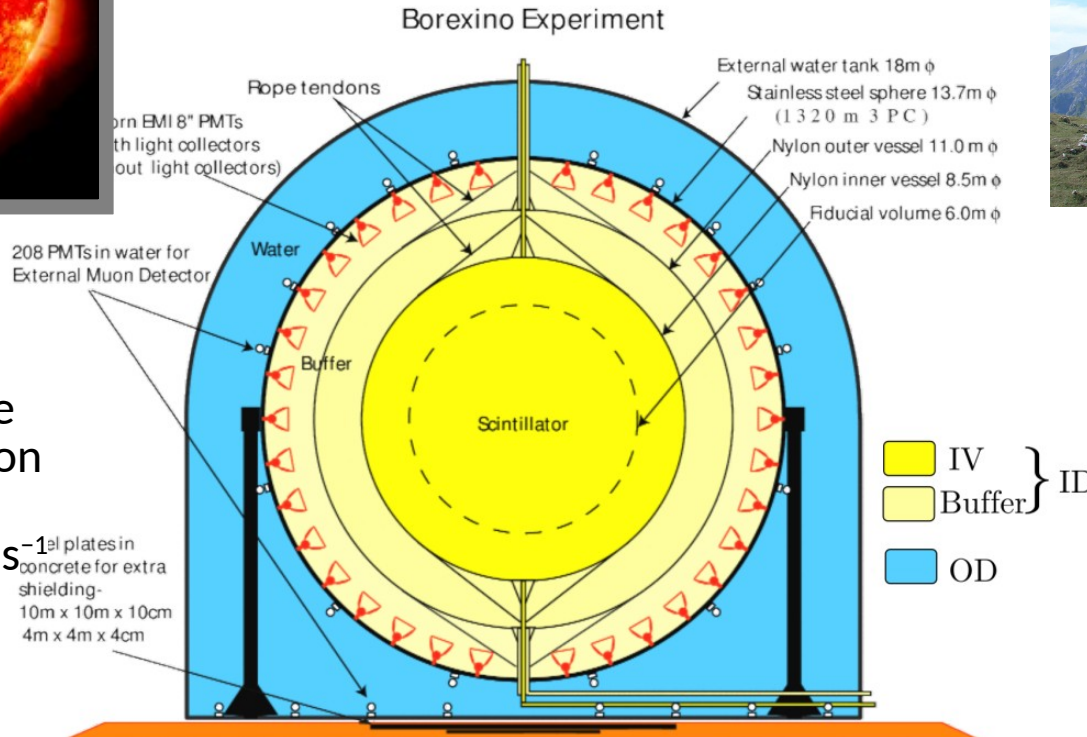
$1,5 \times 10^8$  km



**Borexino**  
Gran Sasso

Un astre très brillant

- 2 % de l'énergie issue de la fusion
- Neutrino flux:  
 $6.3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

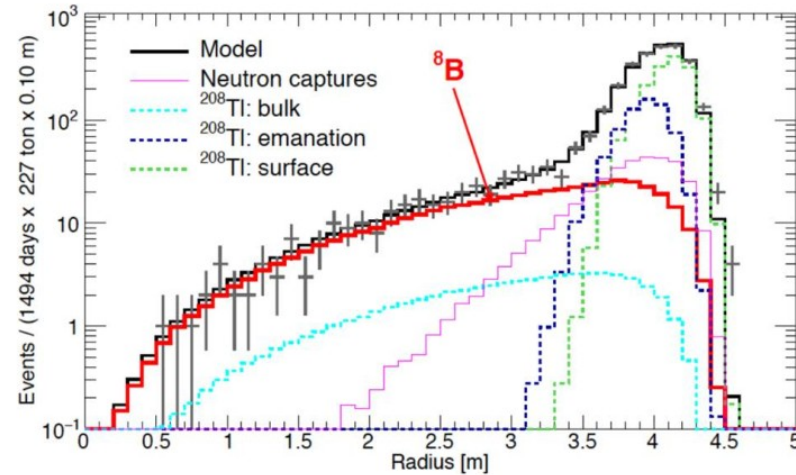
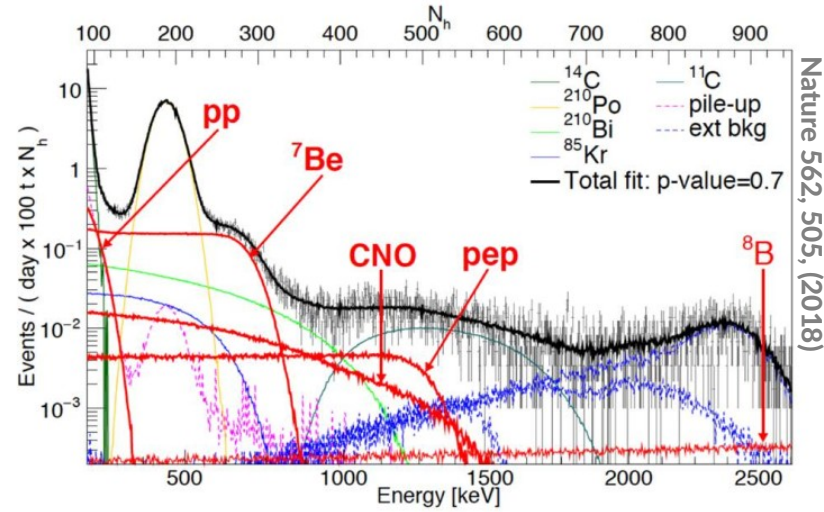


1st plates in concrete for extra shielding-  
10m x 10m x 10cm  
4m x 4m x 4cm

Un détecteur très sombre

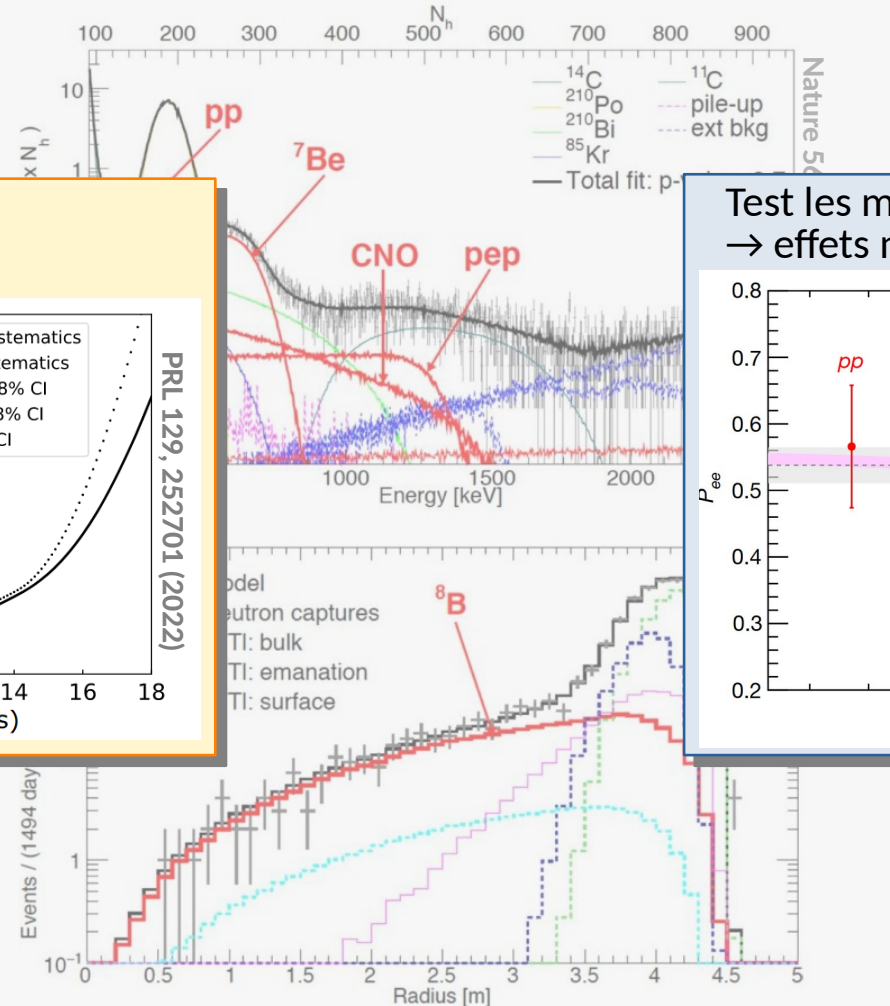
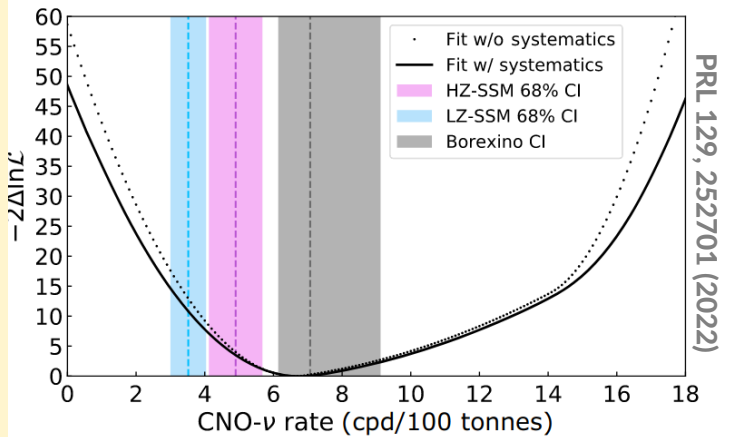
- Radiopure (record)
- Souterrain (1400 m)
- Blindage et véto (1 couche active, 1 couche passive)

# Les neutrinos solaires

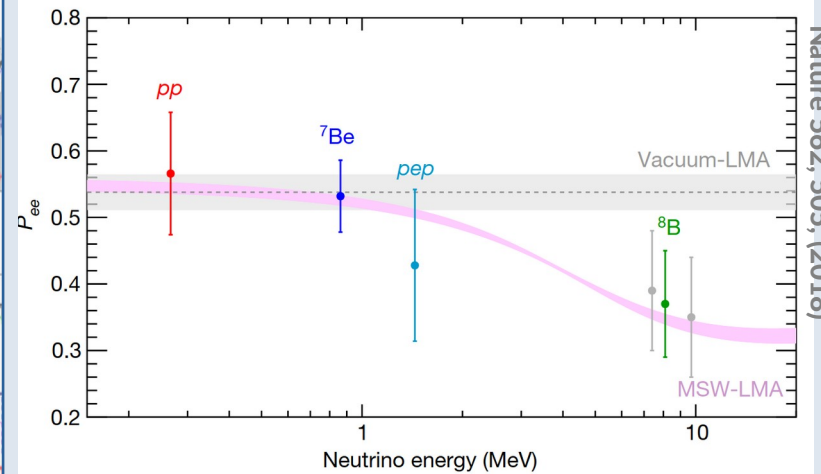


# Les neutrinos solaires

Test les modèles solaires  
→ haute ou basse métallicité

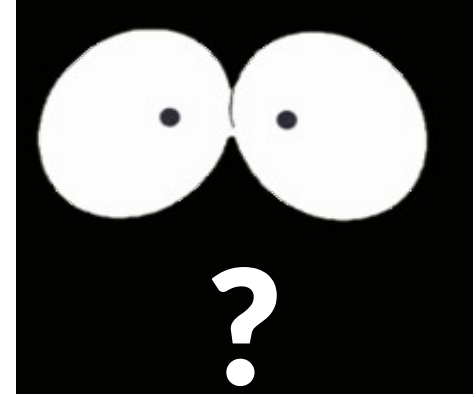
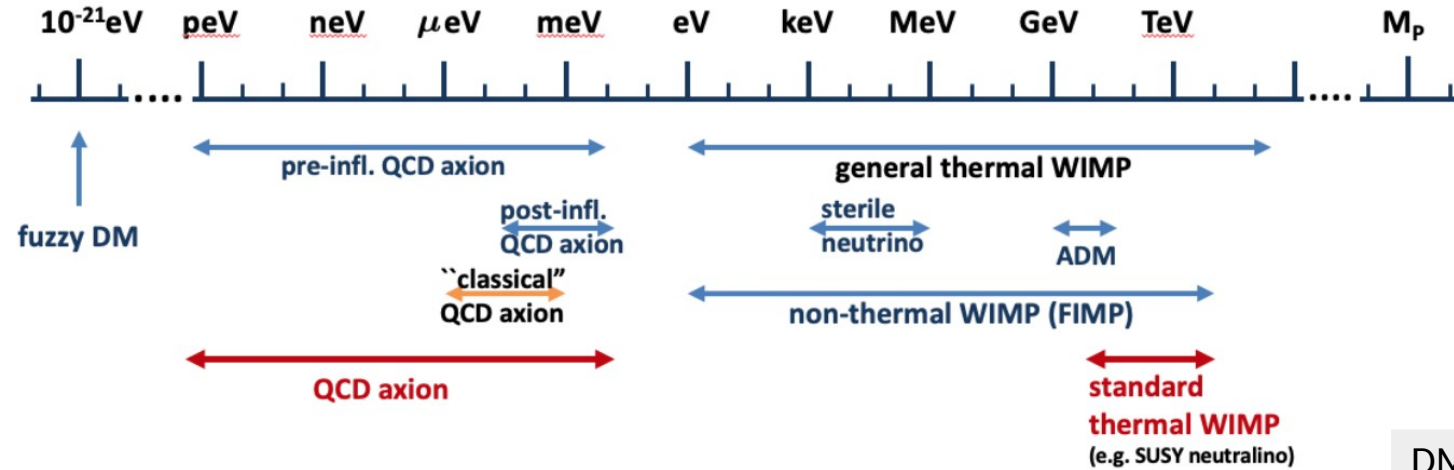


Test les modèles d'oscillations  
→ effets matières et non-standard



# La matière noire

JAMAIS OBSERVE DIRECTEMENT

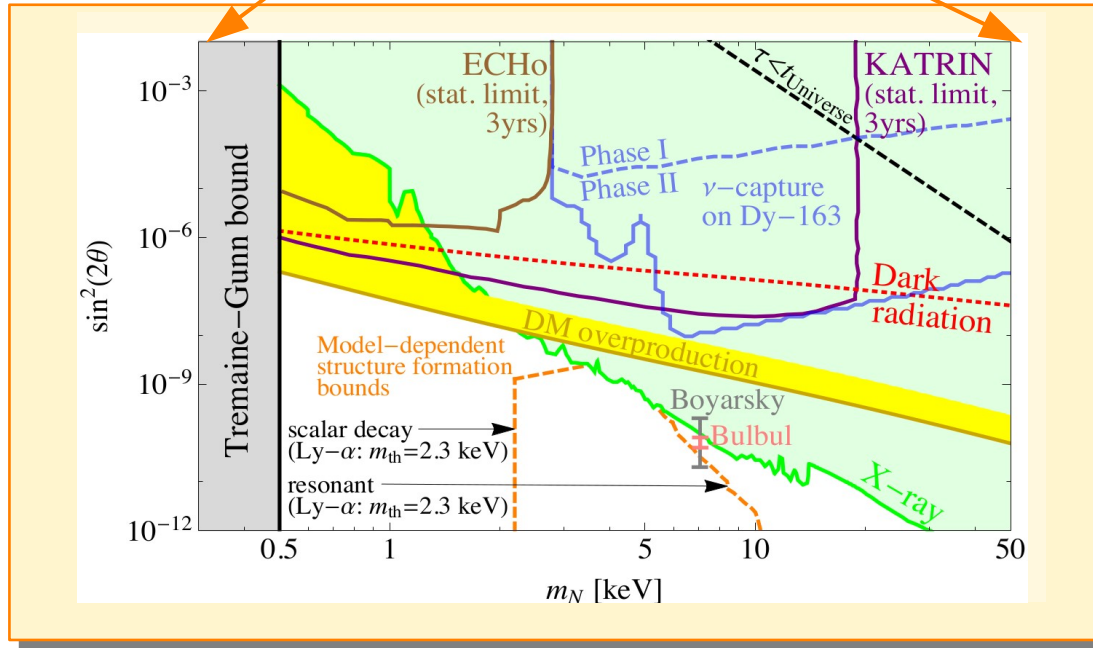
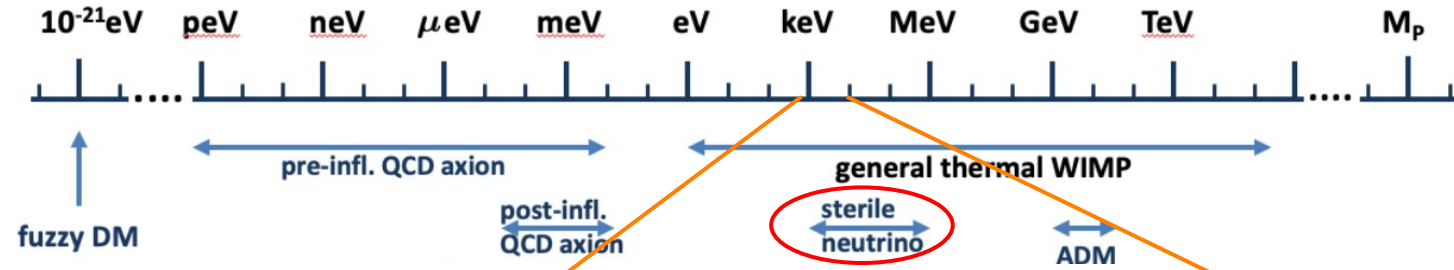
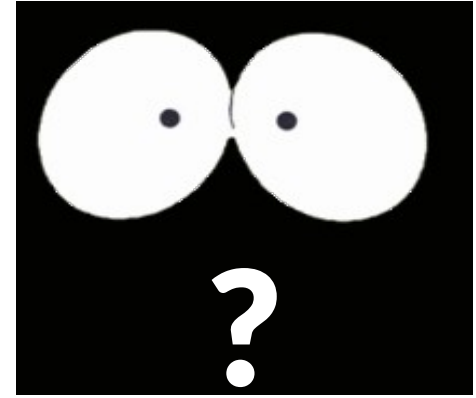


DM candidate nature :

- Massive, neutre pour EM et force forte
- Pas dans le modèle standard
- Stable ( $\tau_{DM} > 10^{17}$  s),
- Abondante (82 % matière existante),
- Intéragissant faiblement,
- Froide ou pas trop chaude

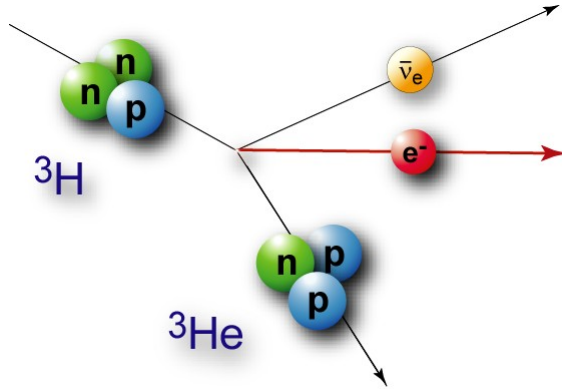
# La matière noire

JAMAIS OBSERVE DIRECTEMENT

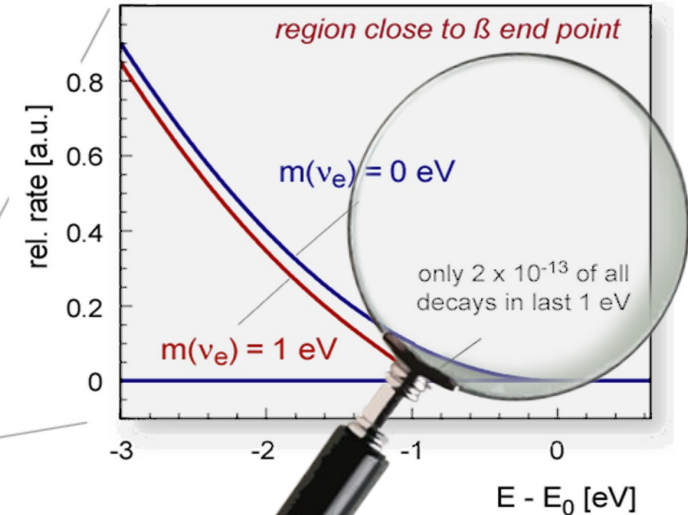
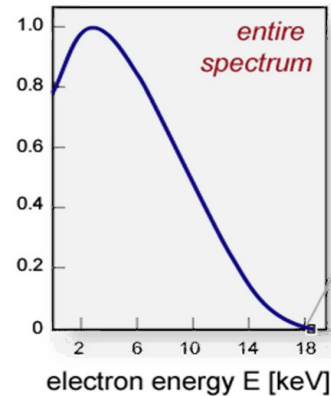


# Cinématique $\beta$ : KATRIN

## Idée générale



- Source  $\beta$  très intense  $10^{11}$  désint/s
- Bas bruit de fond  $< 0,1$  cps
- Excellente résolution énergie  $\sim 1$  eV
- Description précise du spectre





# Karlsruhe TRitium Neutrino Experiment : KATRIN



- Expérience : Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
- Collaboration internationale (150 membres)
- Sensibilité prévue : 0.2 eV (90% CL)



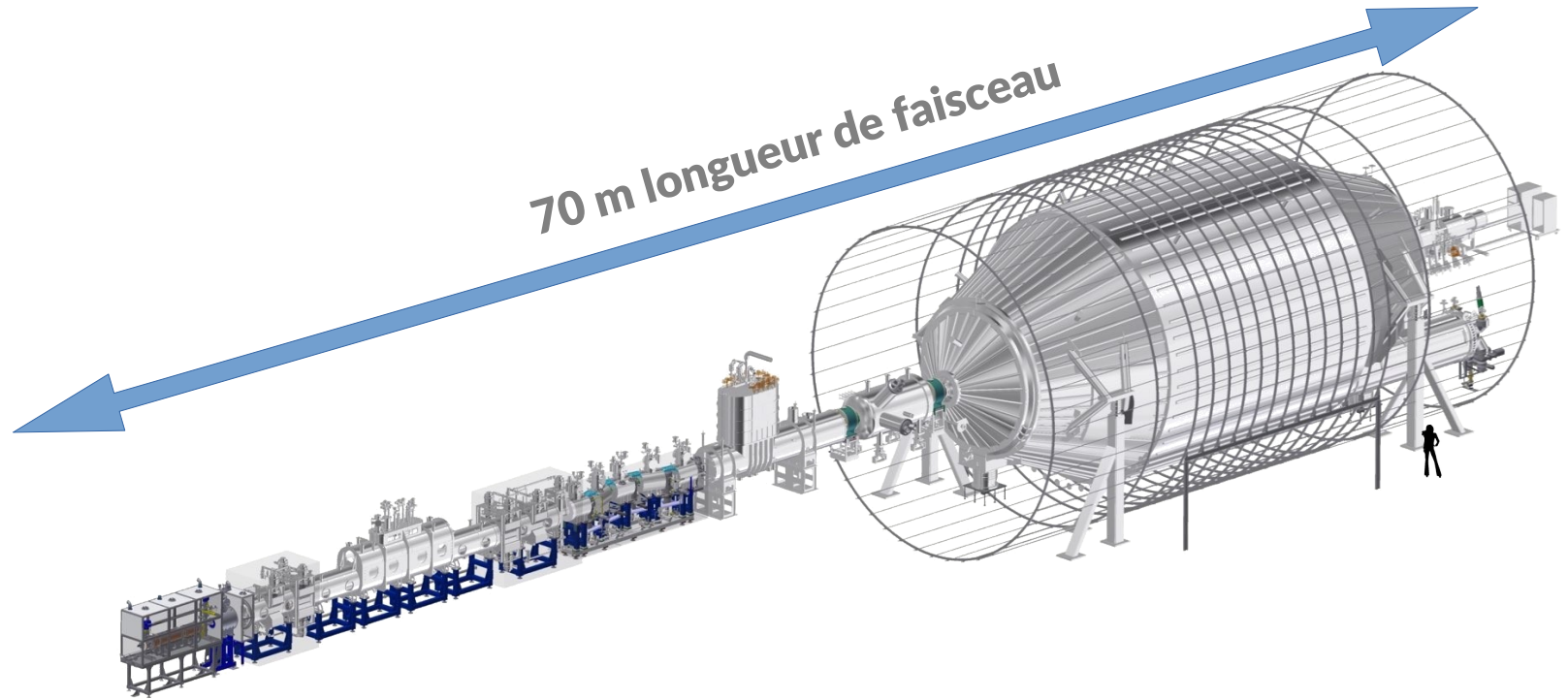
# Karlsruhe TRitium Neutrino Experiment : KATRIN



- Expérience
- Collabora
- Sensibilité prévue : 0.2 eV (90% CL)



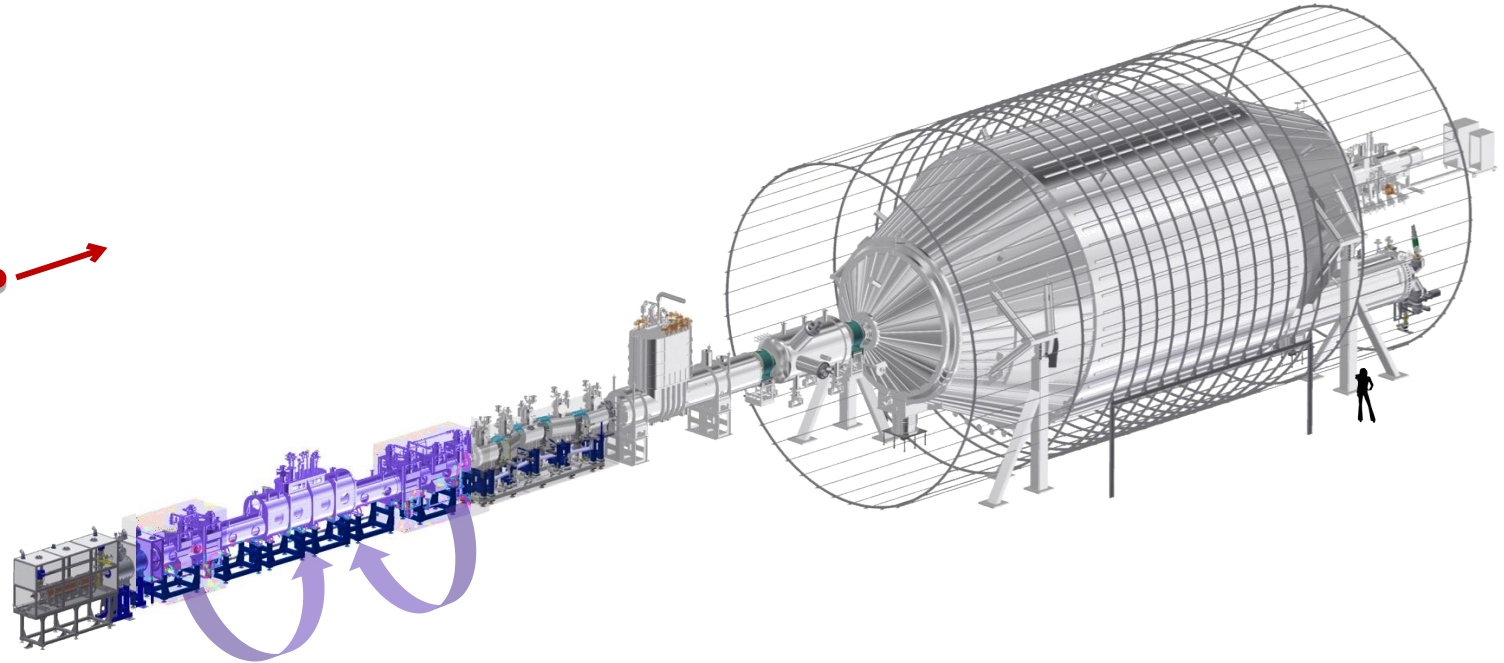
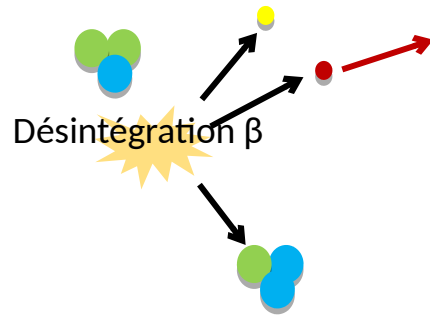
# Fonctionnement de KATRIN



# Fonctionnement de KATRIN

## Source de tritium gazeux libre

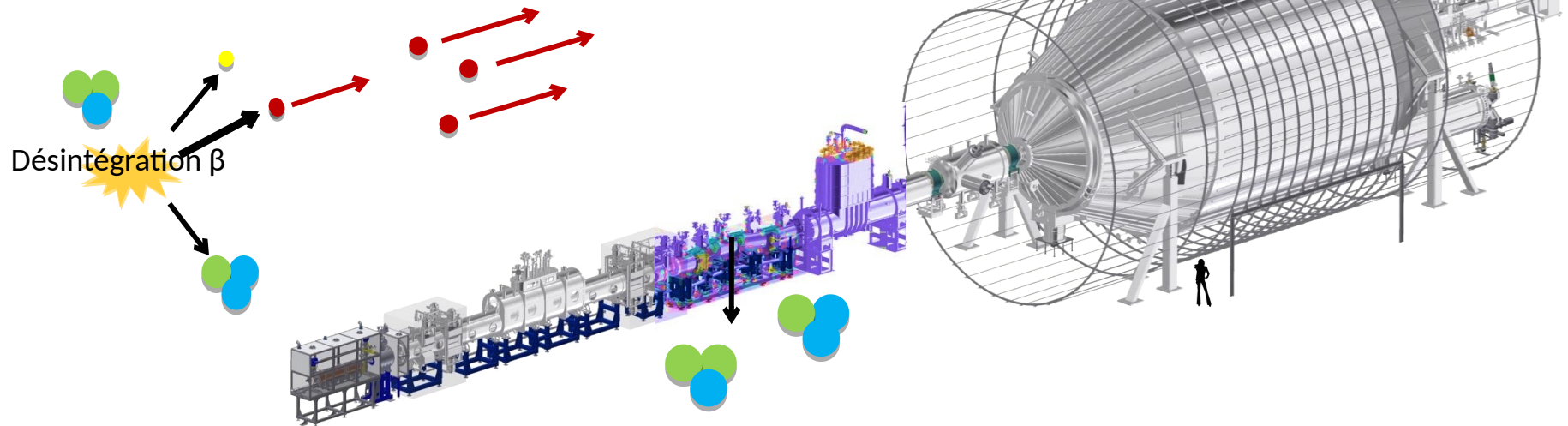
- Tritium moléculaire en circuit fermé
- $10^{11}$  désintégration/s



# Fonctionnement de KATRIN

## Section de transport

- Confinement magnétique des électrons (@ 4 T)
- Réduction du flux de tritium par  $> 10^{14}$  + extraction des ions tritium

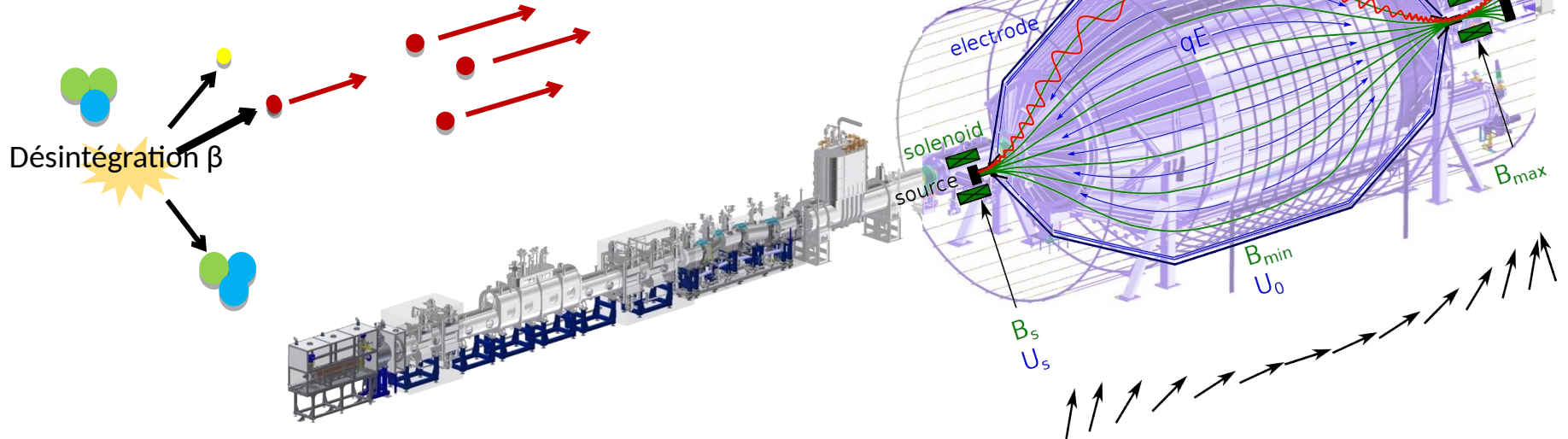


# Fonctionnement de KATRIN

## Section spectrométrique

- Haute résolution  $\sim 1$  eV
- Haute acceptation angulaire  $0 - 51^\circ$

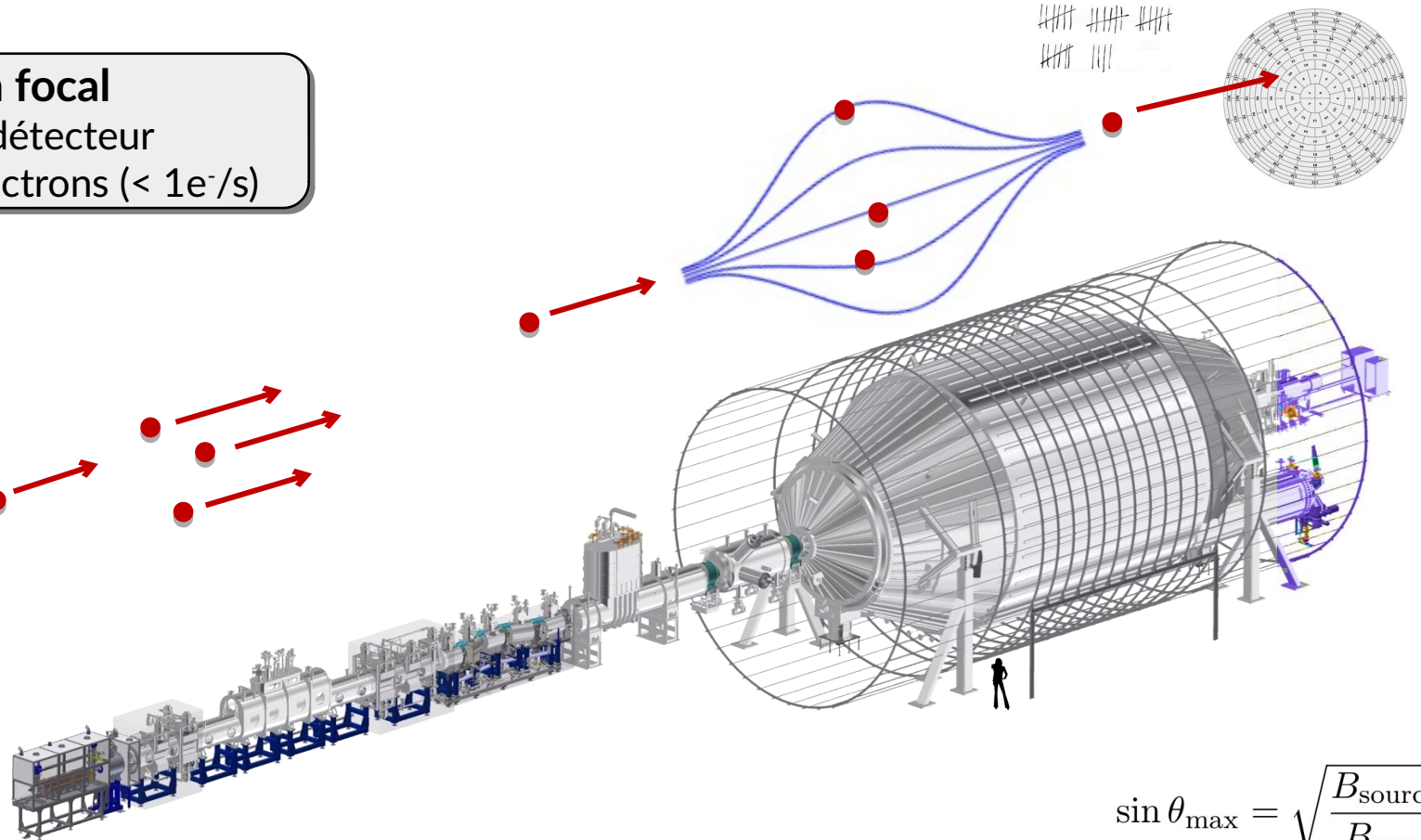
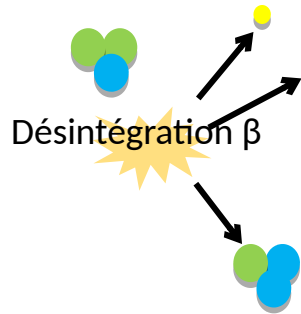
$$\Delta E = E \cdot \frac{B_{\min}}{B_{\max}}$$



# Fonctionnement de KATRIN

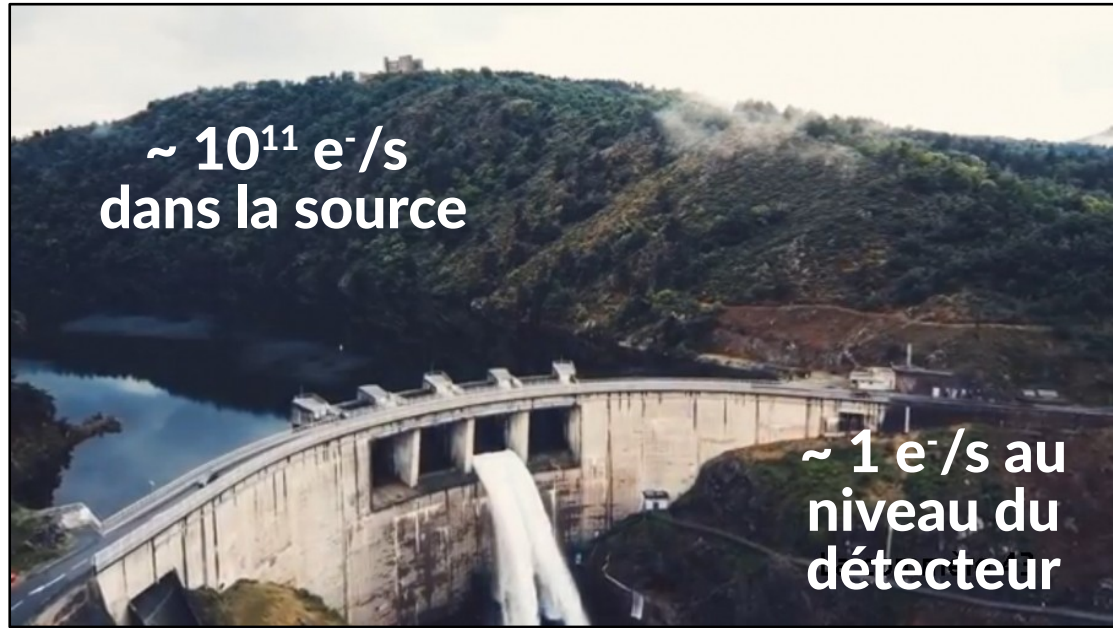
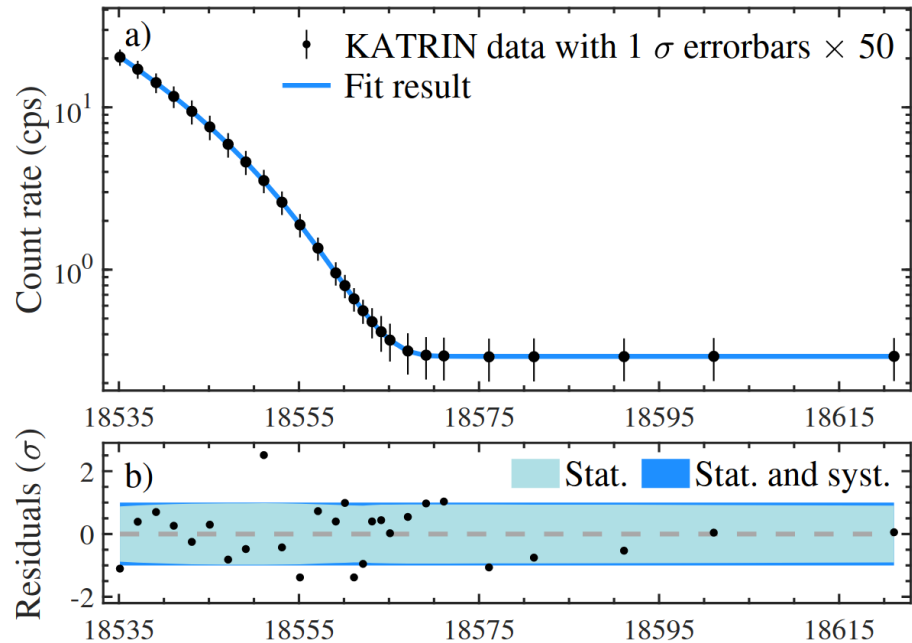
## Detecteur au plan focal

- 148-pixel Si-PIN détecteur
- Comptage des électrons ( $< 1e^-/s$ )



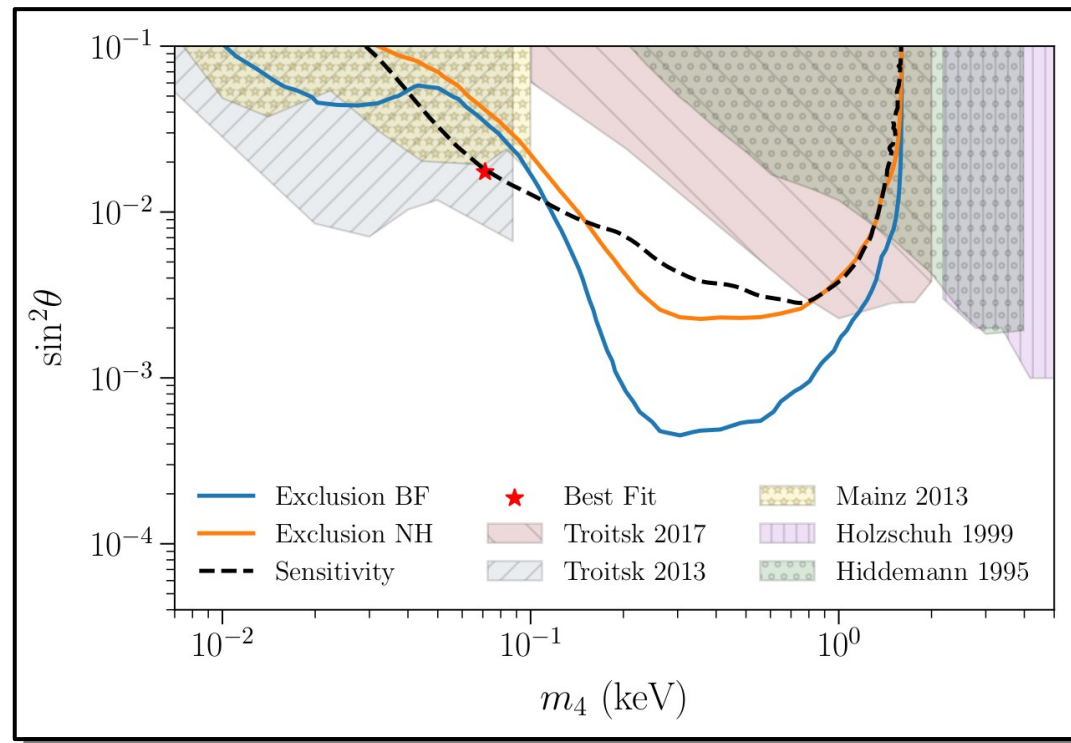
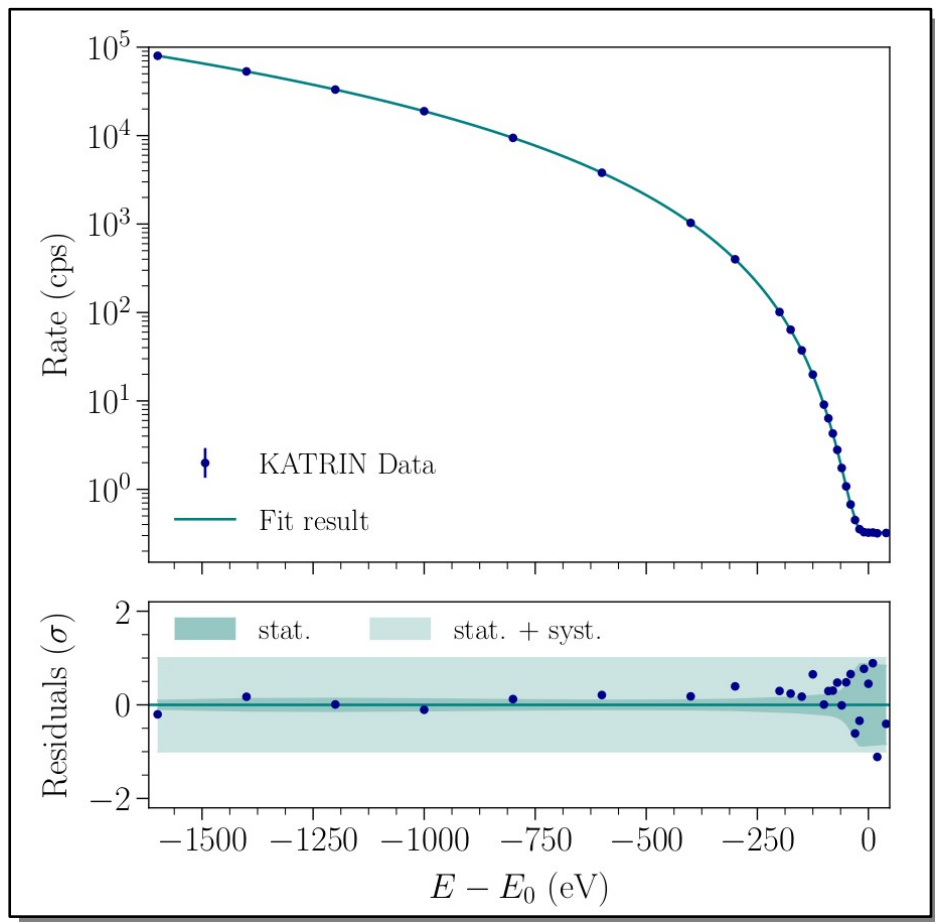
$$\sin \theta_{\max} = \sqrt{\frac{B_{\text{source}}}{B_{\max}}}$$

# KATRIN

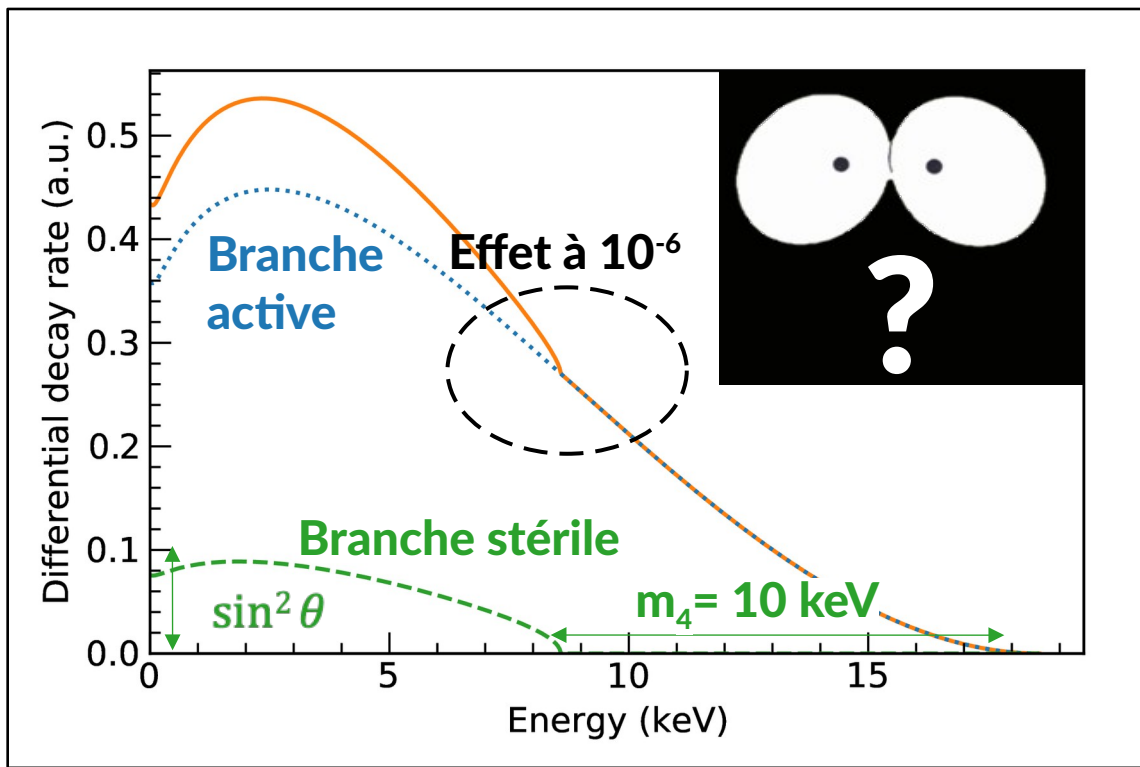




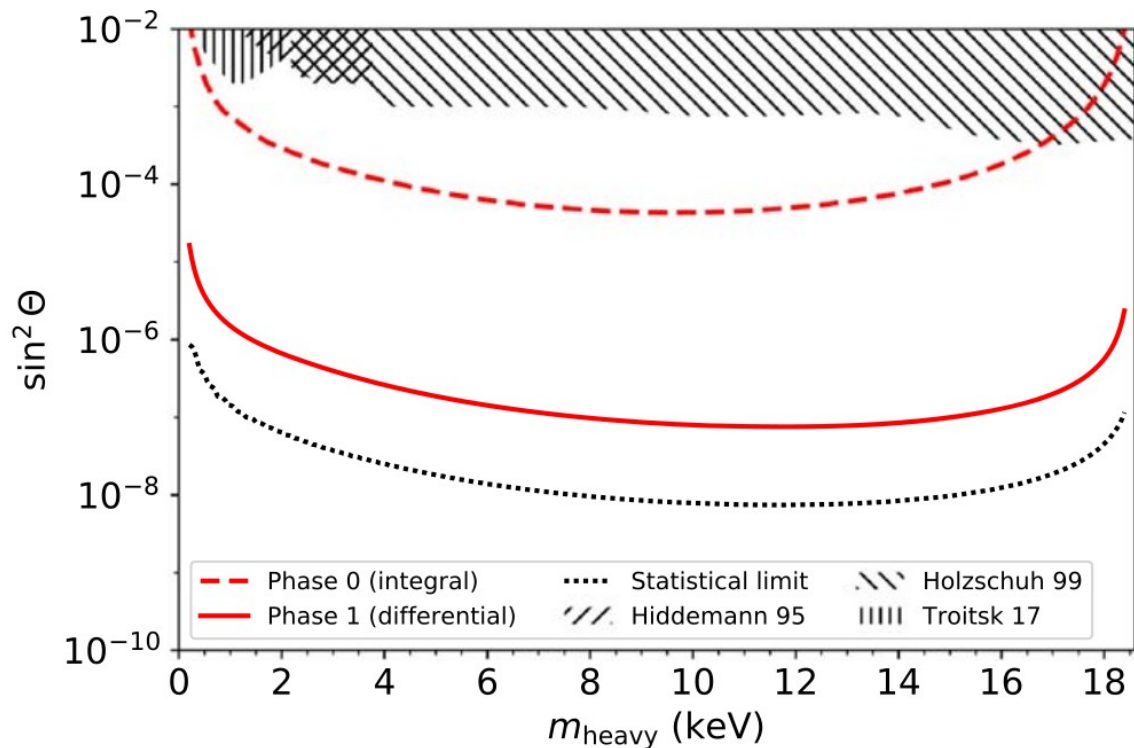
# KATRIN et matière noire



# KATRIN et matière noire

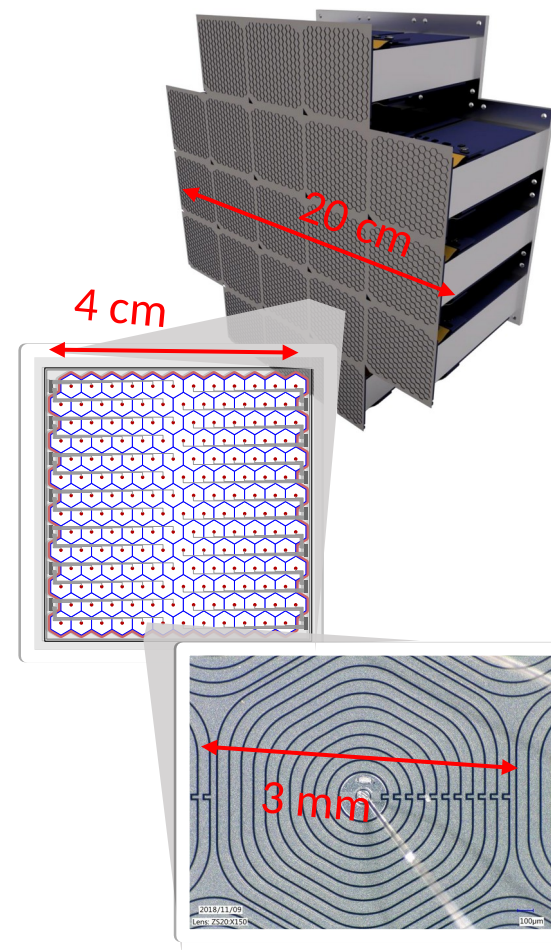


# KATRIN et matière noire



Current KATRIN  
KATRIN with TRISTAN

J.Phys. G46 (2019) no.6, 065203



# Conclusions

L'étude des neutrinos nous apprend beaucoup de choses sur les symétries de l'Univers et sur les objets qui les émettent.

Les neutrinos solaires:

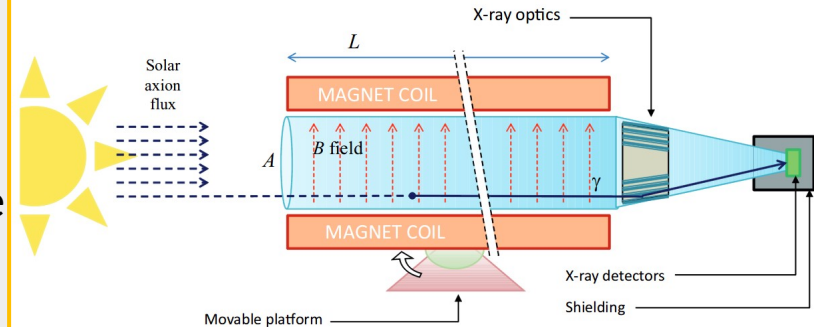
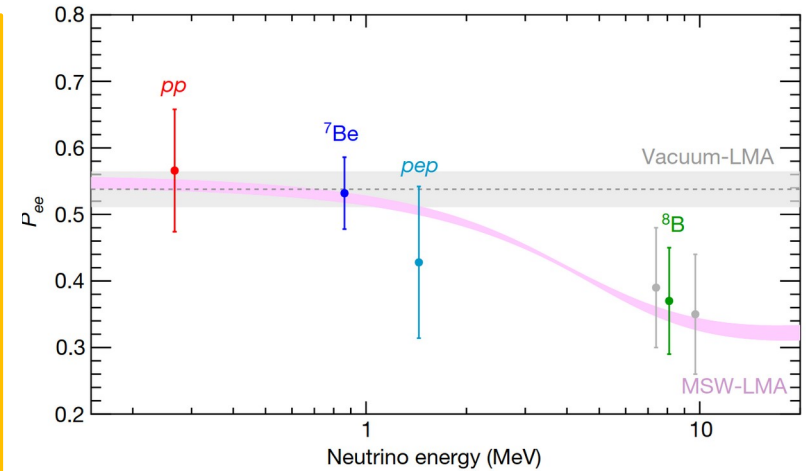
- confirment le modèle d'oscillation des neutrinos
- confirment le modèle standard solaire
- distinguent différents types de métallicité

Cependant une grande partie de la masse de l'Univers reste mystérieuse:

→ quelle est la masse des neutrinos?

La recherche de matière noire est un domaine très dynamique

- un candidat dominant toujours introuvable: le WIMP
- recherche de neutrinos stériles au keV avec KATRIN
- recherche d'axions solaires avec IAXO



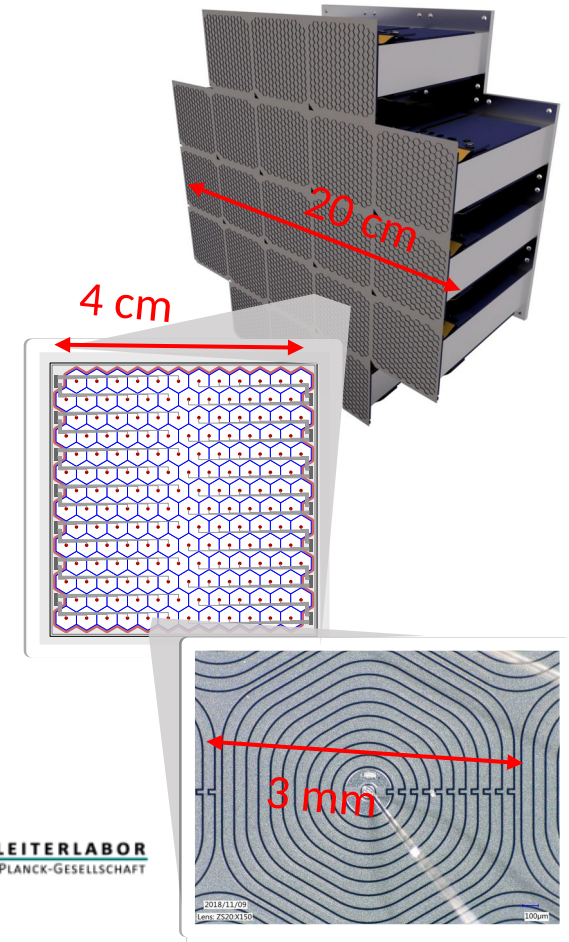
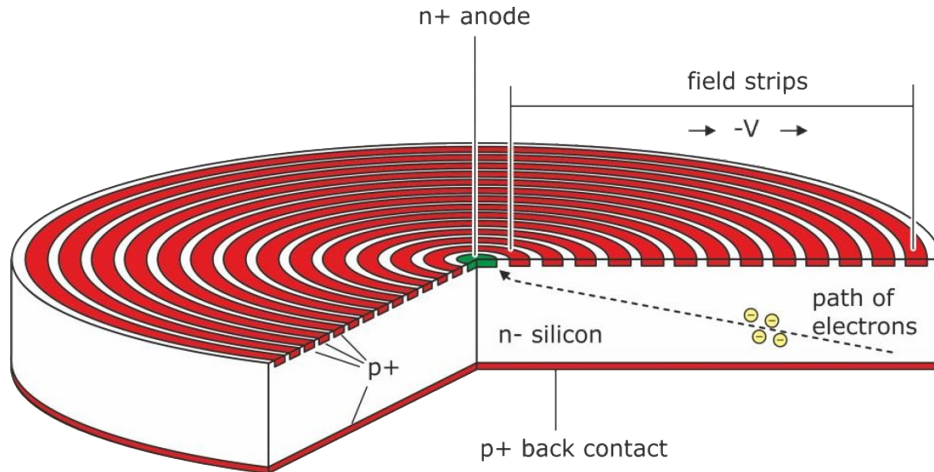
**Back-up slides**

# Perspectives

## Existe-t-il un neutrino stérile au keV?

Capability of handling high rates ( $> 3 \times 10^8$  cps)  
+ Excellent energy resolution (300 eV @ 20 keV)

- Silicon Drift Detector (SDD) Technology
- Novelty: large number of pixels (about 3500)
- Novelty: application to high-precision  $\beta$ -spectroscopy



## KATRIN 2021: first direct neutrino-mass experiment to reach sub-eV sensitivity and limit

- 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> campaign combined result:

$$0.1 \pm 0.3 \text{ eV}^2$$

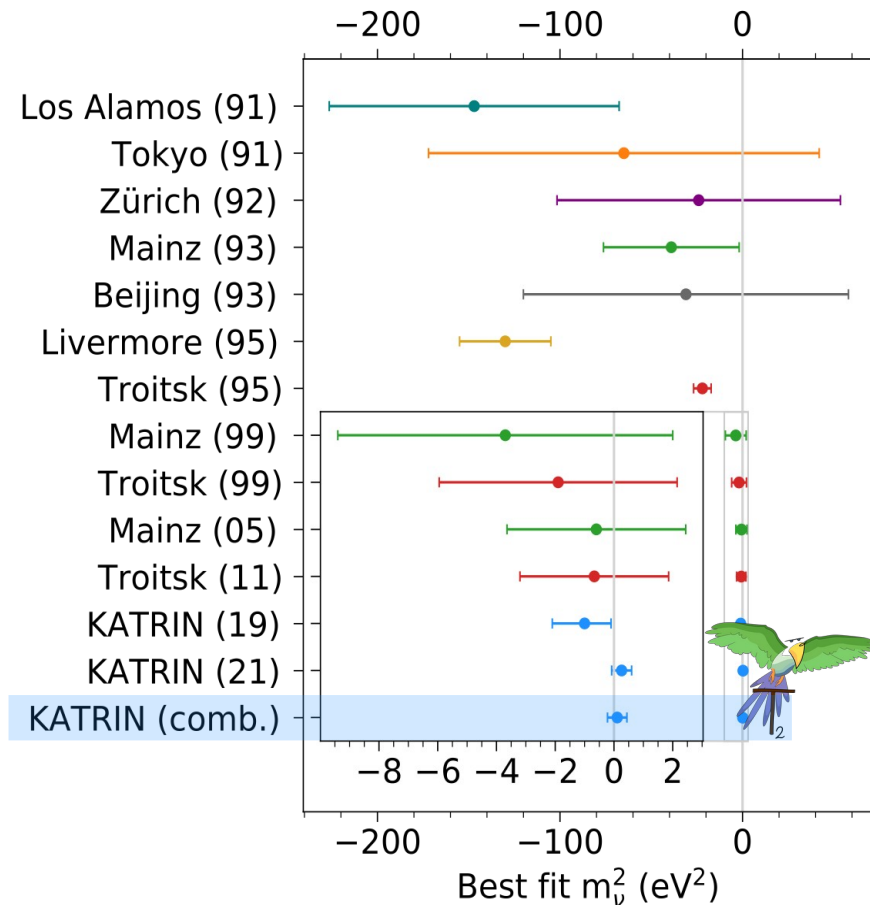
- 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> campaign combined limit:

$$< 0.8 \text{ eV (90\% CL)}$$

Nature Phys. 18, 160-166 (2022)

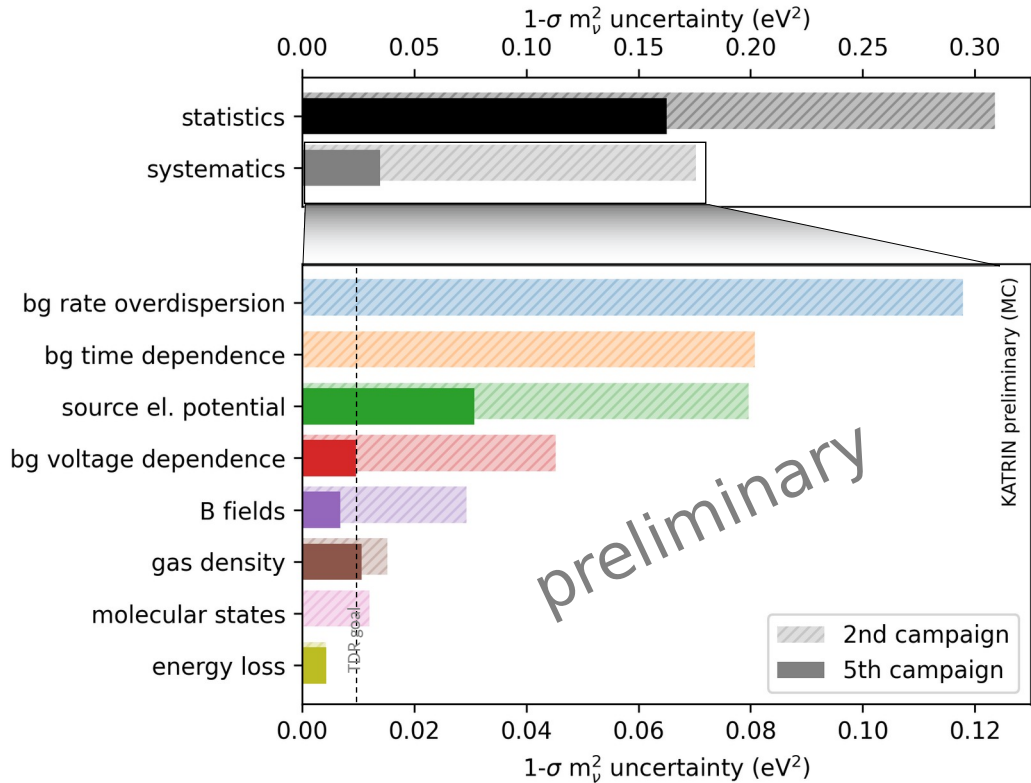
### Future:

- Reduced background and systematics
- 1000 days of data: 50 x more statistics
- Final goal:  $< 0.3 \text{ eV (90\% CL)}$



# Perspectives

## Masse du neutrino avec KATRIN en 2022



### Major improvements:

- ✓ background reduction (2) via new EM field layout A. Lokhov et al, EPJC 82, 258 (2022)
- ✓ 10 GBq  $^{83}\text{Rb}/^{83\text{m}}\text{Kr}$  calibration (mass scan conditions) J. Sentkerestiova et al, PRD 105, 012001 (2022)

