



Détermination de la masse des neutrinos légers

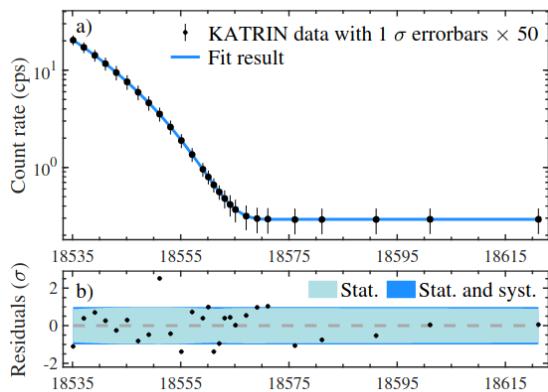
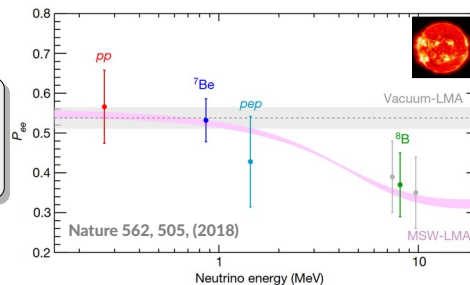
Ecole de Gif 2022
La physique des neutrinos
Thibaut Houdy

5 septembre 2022

Qui suis-je?

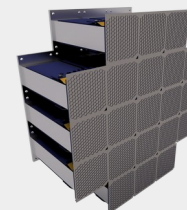
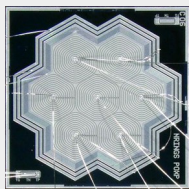
Doctorat, APC/Irfu, Université Paris-Diderot (2014 - 2017)

- Etude des neutrinos solaires (8B) et stériles (eV) dans Borexino



Postdoc au Max-Planck Physique, Munich, (2018 - 2021)

- Rejoins **KATRIN** (masse du neutrino)

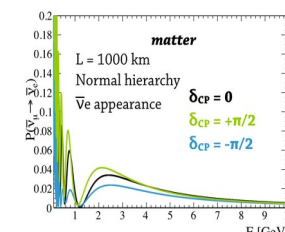
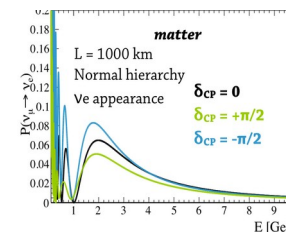


- Recherche de **neutrinos stériles au keV** avec **KATRIN**



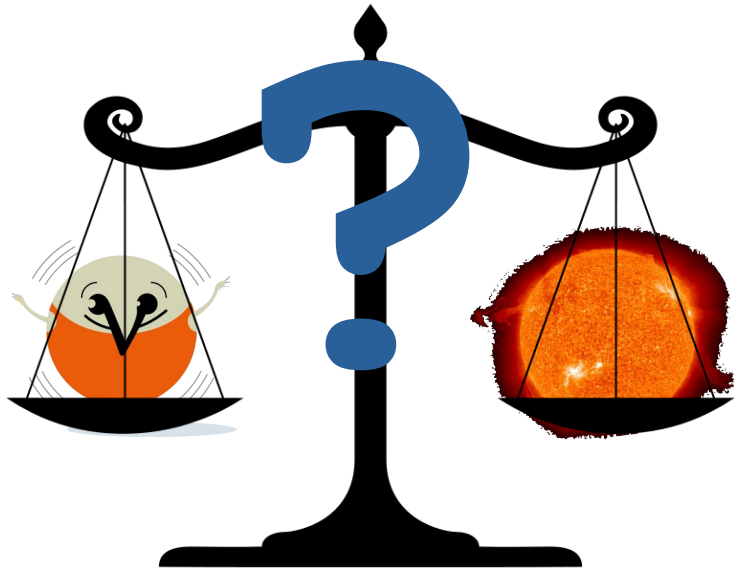
Enseignant-Chercheur à l'Université Paris-Saclay, IJCLab (depuis 2021)

- Cours en Electromagnétisme, Instrumentations et Nucléaire & Particules
- Rejoins DUNE (hiérarchie de masse, phase CP, unitarité de la matrice PMNS)



TOWARDS THE FUTURE OF LBN EXPERIMENTS, LZambelli (LAPP)

Pourquoi s'y intéresser?



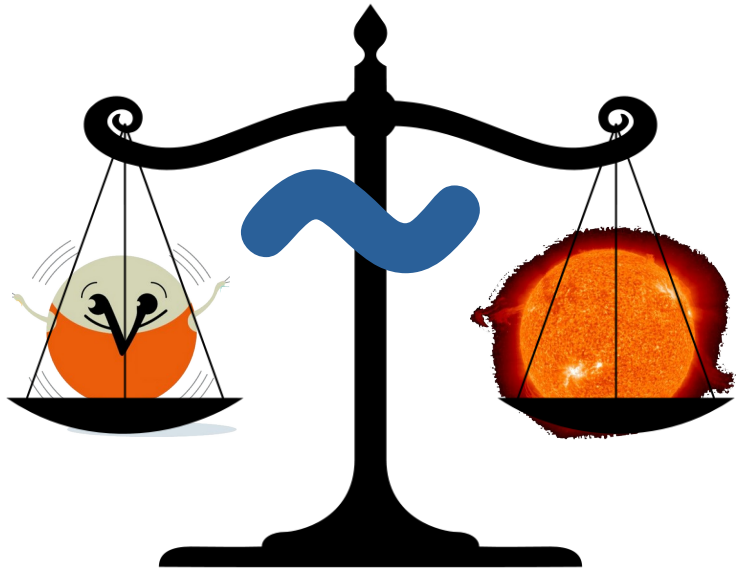
Combien de neutrinos traversent votre ongle par seconde?

- A. 65 ?
- B. 65 000 ?
- C. 65 000 000 ?
- D. 65 000 000 000 ?
- E. Une infinité (trop nombreux pour compter)

Combien pèse l'ensemble des neutrinos par rapport à l'ensemble des étoiles de l'Univers?

- A. c'est négligeable
- B. entre 0,08% - 0,12%
- C. entre 8% - 12%
- D. entre 80% - 120%
- E. On ne sait pas

Pourquoi s'y intéresser?



Combien de neutrinos traversent votre ongle par seconde?

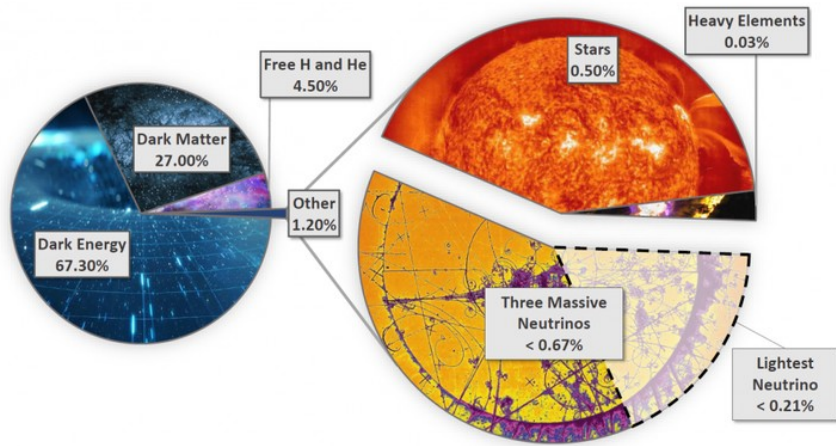
- A. 65 ?
- B. 65 000 ?
- C. 65 000 000 ?
- D. 65 000 000 000 ?**
- E. Une infinité (trop nombreux pour compter)

Combien pèse l'ensemble des neutrinos par rapport à l'ensemble des étoiles de l'Univers?

- A. c'est négligeable
- B. entre 0,08% - 0,12%
- C. entre 8% - 12%
- D. entre 80% - 120%**
- E. On ne sait pas

Pourquoi s'y intéresser?

Neutrinos in the Universe



- Particule **ultra abondante** dans l'univers (chaque cm^3 contient 300 neutrinos, 10^9 fois plus que des nucléons!)
- Même légers, une grande partie de la matière dans l'univers est faite de neutrinos → **influence la formation des structures**.
- Certaines propriétés du neutrino ne sont pas prédites par le Modèle Standard → indication pour aller **au delà du MS?**

Combien de neutrinos traversent votre ongle par seconde?

- A. 65 ?
- B. 65 000 ?
- C. 65 000 000 ?
- D. 65 000 000 000 ?**
- E. Une infinité (trop nombreux pour compter)


Combien pèse l'ensemble des neutrinos par rapport à l'ensemble des étoiles de l'Univers?

- A. c'est négligeable
- B. entre 0,08% - 0,12%
- C. entre 8% - 12%
- D. entre 80% - 120%**
- E. On ne sait pas

Neutrinos : l'histoire courte




1930 : Pauli **prédit** l'existence d'une particule neutre (hypothétique)

1956 : **1^{ère} observation** d'un ν_e par Cowan et Reines → existence des neutrinos  1995

1957 : Observation par Wu de la **violation de la Parité** dans une réaction β

1962 : Découverte d'un **nouveau type de neutrinos** → ν_μ  1988

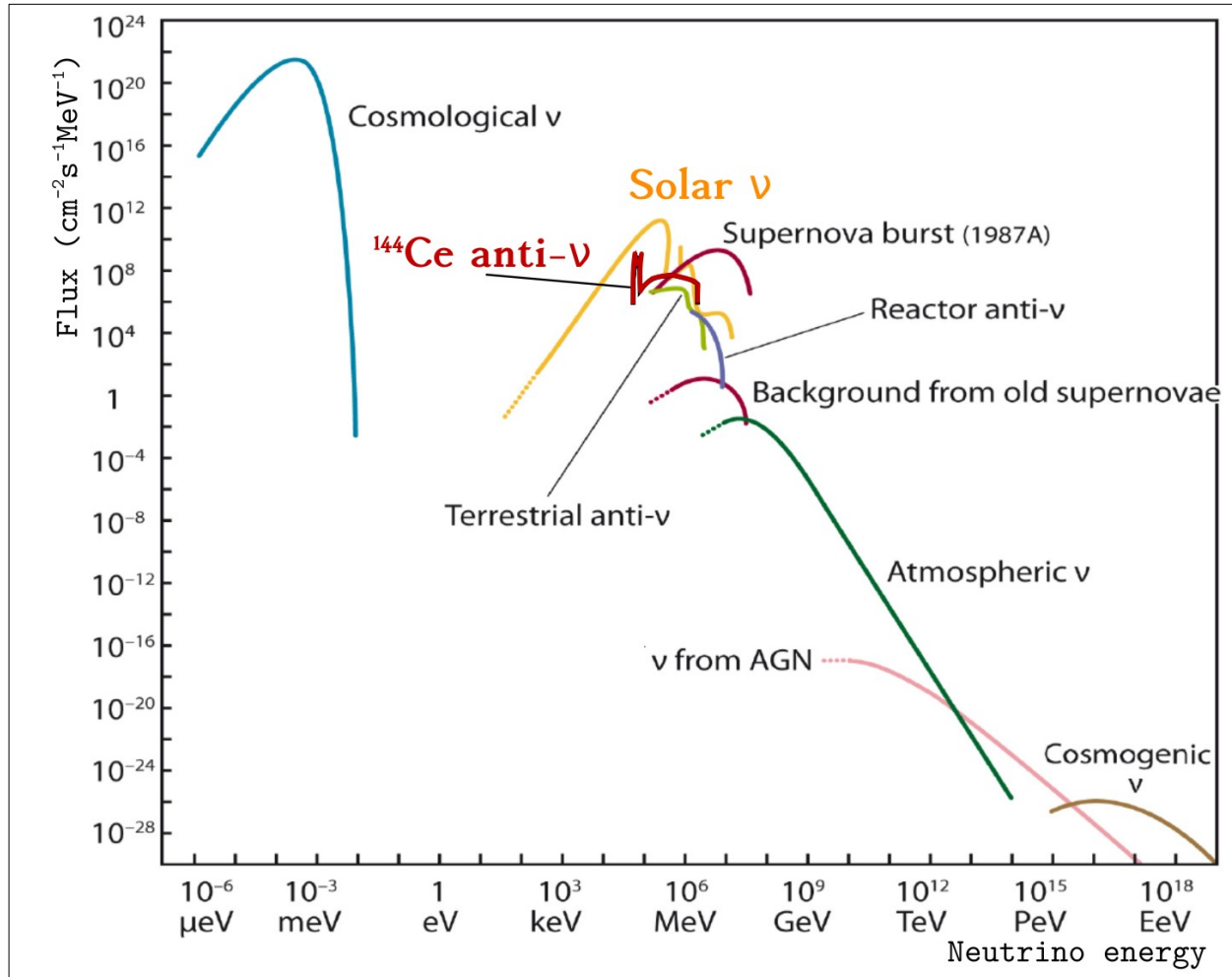
1979 : Glashow, Salam & Weinberg postulent l'existence du **courant neutre** (Z)  1979

1980 : **1^{ère} détection** de ν cosmique : Homestake (solaire) et Kamiokande (SN 1987A)  2002

1998 : **Oscillations des neutrinos** solaires et atmosphériques → neutrinos massifs  2015

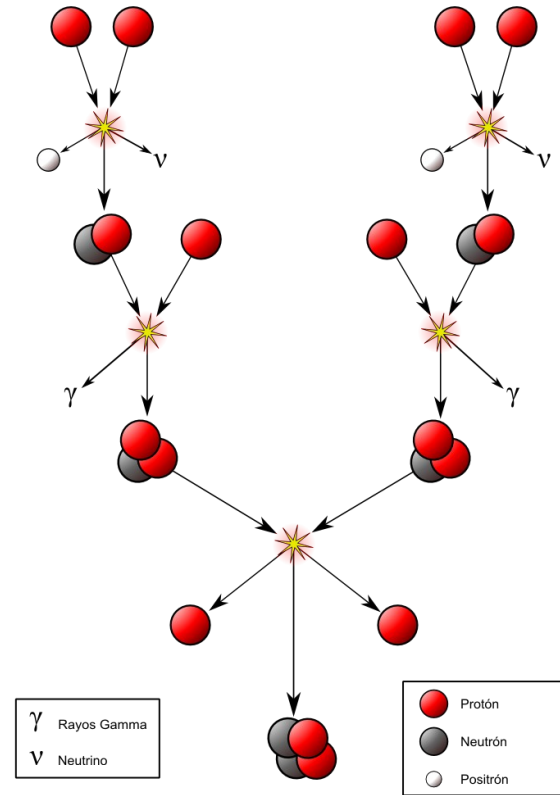
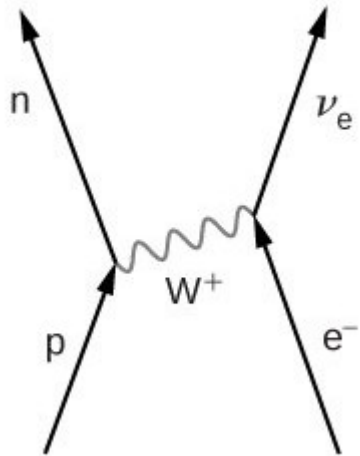
2000 : Observation de la dernière saveur ν_τ

Fluxs de neutrinos



Neutrinos solaires

Anomalie dans les mesures de flux de neutrinos solaires



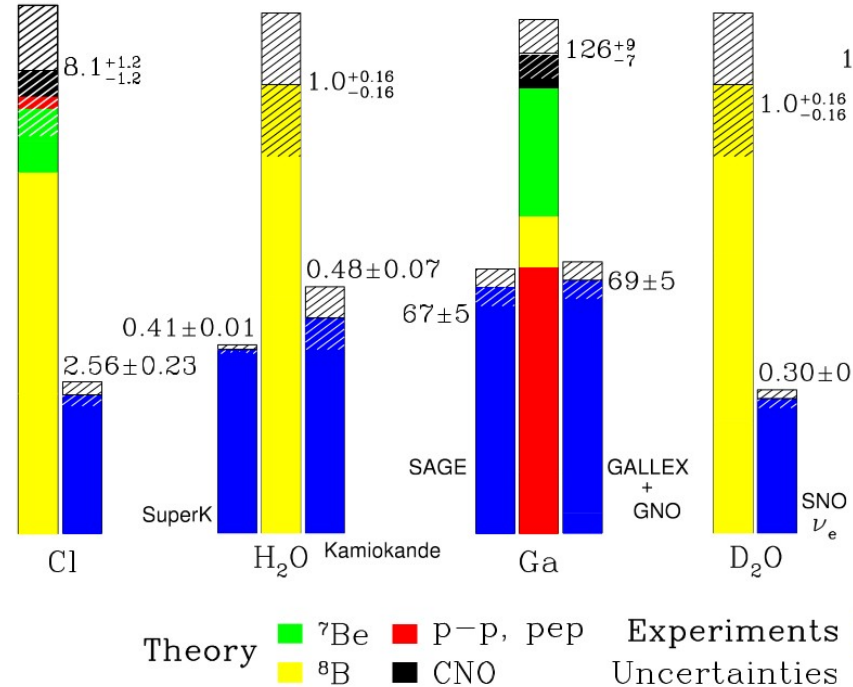
Principalement $p \rightarrow n$ donc emission of ν_e !
Flux proportionnel à la luminosité \rightarrow solide estimation

Neutrinos solaires

Anomalie dans les mesures de flux de neutrinos solaires → **seulement 1/3 des neutrinos prédits** sont mesurés sur Terre

Pb avec le modèle solaire standard ou avec les neutrinos?

Total Rates: Standard Model vs. Experiment
Bahcall–Serenelli 2005 [BS05(OP)]

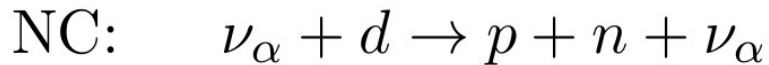
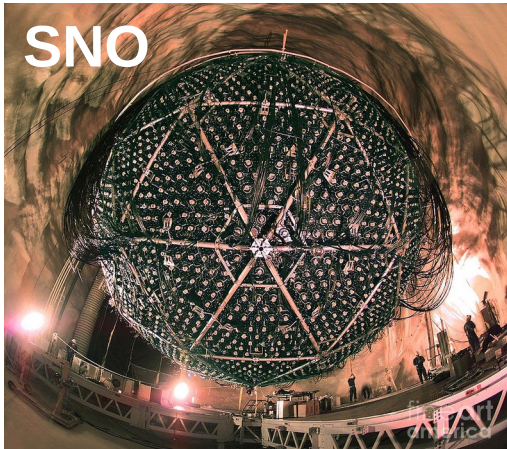


Voir Davide Franco
demain à 9h

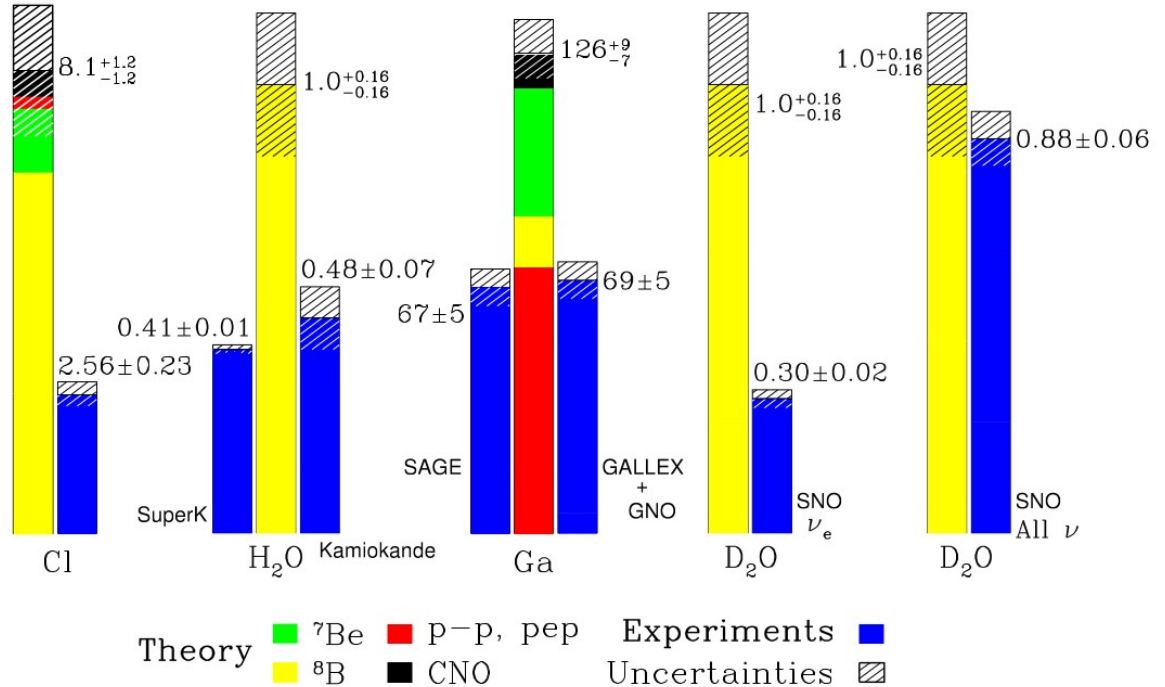
Neutrinos solaires

Anomalie dans les mesures de flux de neutrinos solaires → **seulement 1/3 des neutrinos prédits** sont mesurés sur Terre

Pb avec le modèle solaire standard ou avec les neutrinos?



Total Rates: Standard Model vs. Experiment
Bahcall–Serenelli 2005 [BS05(OP)]



Voir Davide Franco
demain à 9h

Neutrinos atmosphériques

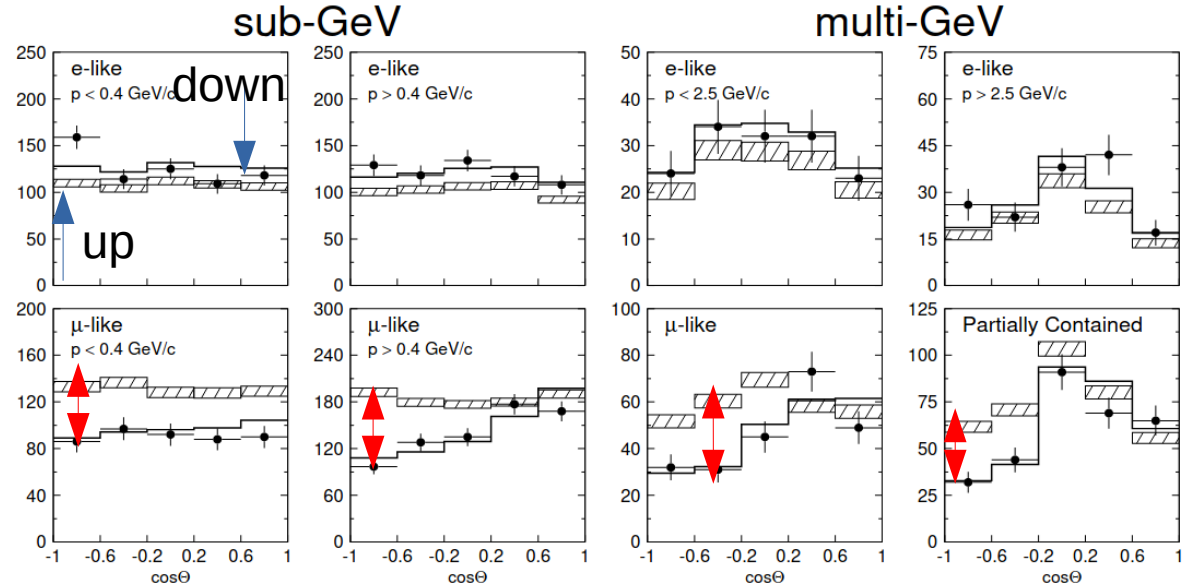
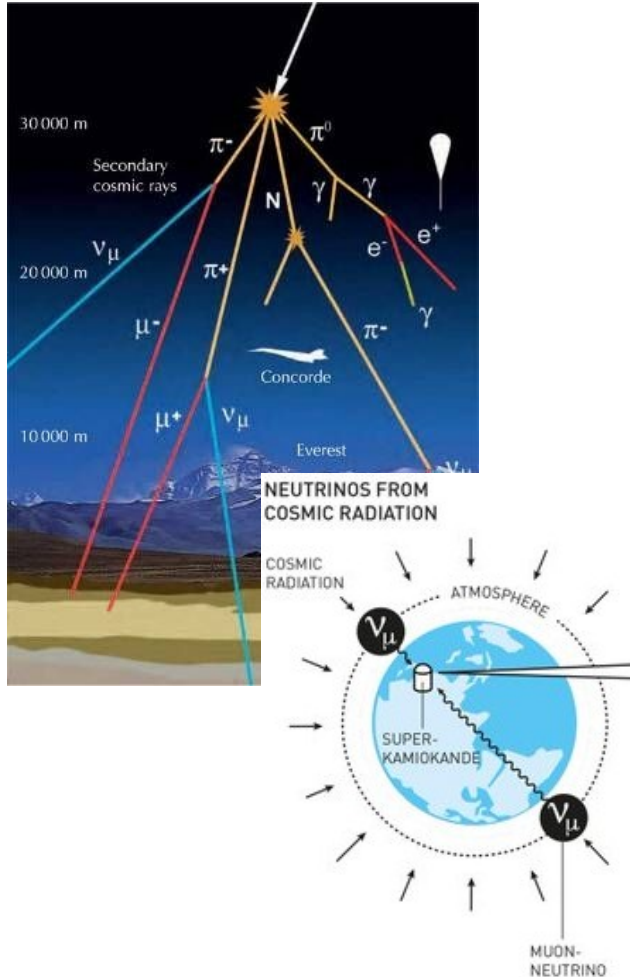
VOLUME 81, NUMBER 8

PHYSICAL REVIEW LETTERS

24 AUGUST 1998

Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos

Y. Fukuda,¹ T. Hayakawa,¹ E. Ichihara,¹ K. Inoue,¹ K. Ishihara,¹ H. Ishino,¹ Y. Itow,¹ T. Kajita,¹ J. Kameda,¹



Voir Thomas Mueller
mercredi à 14h

Le modèle d'oscillation

Depuis SNO et SK, on sait que les **neutrinos changent de saveurs durant leurs propagations!**
Cela n'est pas dû à une interaction mais c'est un effet quantique classique
→ décalage entre les états propres de la propagation (les valeurs diagonales de l'Hamiltonien: l'énergie) et les états propres d'interactions (la saveur leptonique).
Description: la matrice **PMNS!**

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

Cette non-correspondance entre les états propres de masse et d'interaction implique:

→ Il existe au moins **3 états propres de masse différents**

→ Deux sont forcément **non-nulles**

→ La valeur de la masse n'intervient pas directement dans l'oscillation : seulement la différence de masse au carré.

Cette propriété n'étant **pas prédite par le modèle standard** (pas en contradiction non plus).
C'est une indication de l'incomplétude du Modèle Standard

Le modèle d'oscillation

Depuis SNO et SK, on sait que les **neutrinos changent de saveurs durant leurs propagations!**
Cela n'est pas dû à une interaction mais c'est un effet quantique classique
→ décalage entre les états propres de la propagation (les valeurs diagonales de l'Hamiltonien: l'énergie) et les états propres d'interactions (la saveur leptonique).
Description: la matrice **PMNS!**

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

Cette non-correspondance entre les états propres de masse et d'interaction implique:

→ Il existe au moins **3 états propres de masse différents**

→ Deux sont forcément **non-nulles**

→ La valeur de la masse n'intervient pas directement dans l'oscillation : seulement la différence de masse au carré.

Cette propriété n'étant **pas prédite par le modèle standard** (C'est une indication de l'incomplétude du Modèle Standard

Voir Stéphane Lavignac
toute la semaine

Le modèle d'oscillation

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

L'oscillation implique toutes les saveurs en même temps → fit global (ici NuFIT 5.1 2021)

	Normal Ordering (best fit)		Inverted Ordering ($\Delta\chi^2 = 2.6$)	
	bfp $\pm 1\sigma$	3σ range	bfp $\pm 1\sigma$	3σ range
$\sin^2 \theta_{12}$	$0.304^{+0.013}_{-0.012}$	0.269 → 0.343	$0.304^{+0.012}_{-0.012}$	0.269 → 0.343
$\theta_{12}/^\circ$	$33.44^{+0.77}_{-0.74}$	31.27 → 35.86	$33.45^{+0.77}_{-0.74}$	31.27 → 35.87
$\sin^2 \theta_{23}$	$0.573^{+0.018}_{-0.023}$	0.405 → 0.620	$0.578^{+0.017}_{-0.021}$	0.410 → 0.623
$\theta_{23}/^\circ$	$49.2^{+1.0}_{-1.3}$	39.5 → 52.0	$49.5^{+1.0}_{-1.2}$	39.8 → 52.1
$\sin^2 \theta_{13}$	$0.02220^{+0.00068}_{-0.00062}$	0.02034 → 0.02430	$0.02238^{+0.00064}_{-0.00062}$	0.02053 → 0.02434
$\theta_{13}/^\circ$	$8.57^{+0.13}_{-0.12}$	8.20 → 8.97	$8.60^{+0.12}_{-0.12}$	8.24 → 8.98
$\delta_{\text{CP}}/^\circ$	194^{+52}_{-25}	105 → 405	287^{+27}_{-32}	192 → 361
$\frac{\Delta m_{21}^2}{10^{-5} \text{ eV}^2}$	$7.42^{+0.21}_{-0.20}$	6.82 → 8.04	$7.42^{+0.21}_{-0.20}$	6.82 → 8.04
$\frac{\Delta m_{3\ell}^2}{10^{-3} \text{ eV}^2}$	$+2.515^{+0.028}_{-0.028}$	+2.431 → +2.599	$-2.498^{+0.028}_{-0.029}$	-2.584 → -2.413

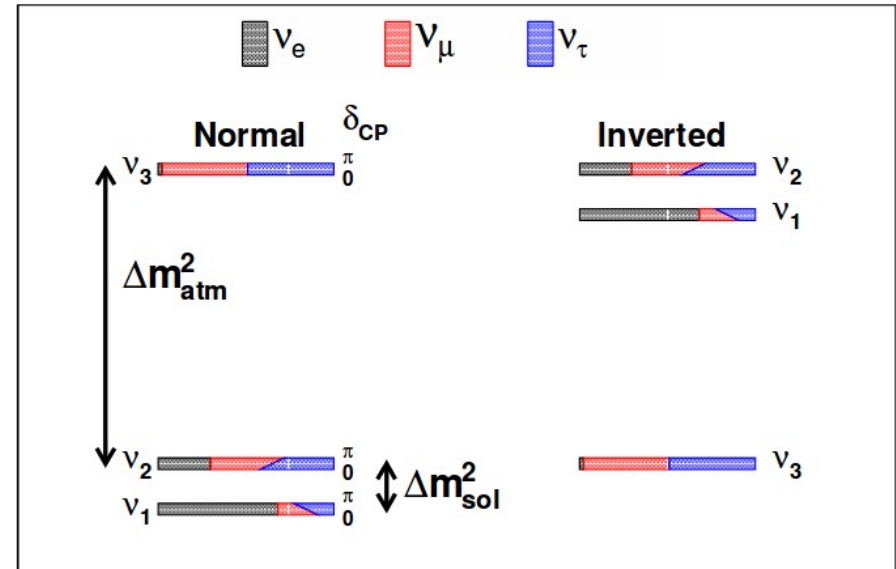
Le modèle d'oscillation

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

L'oscillation implique toutes les saveurs en même temps → fit global (ici NuFIT 5.1 2021)

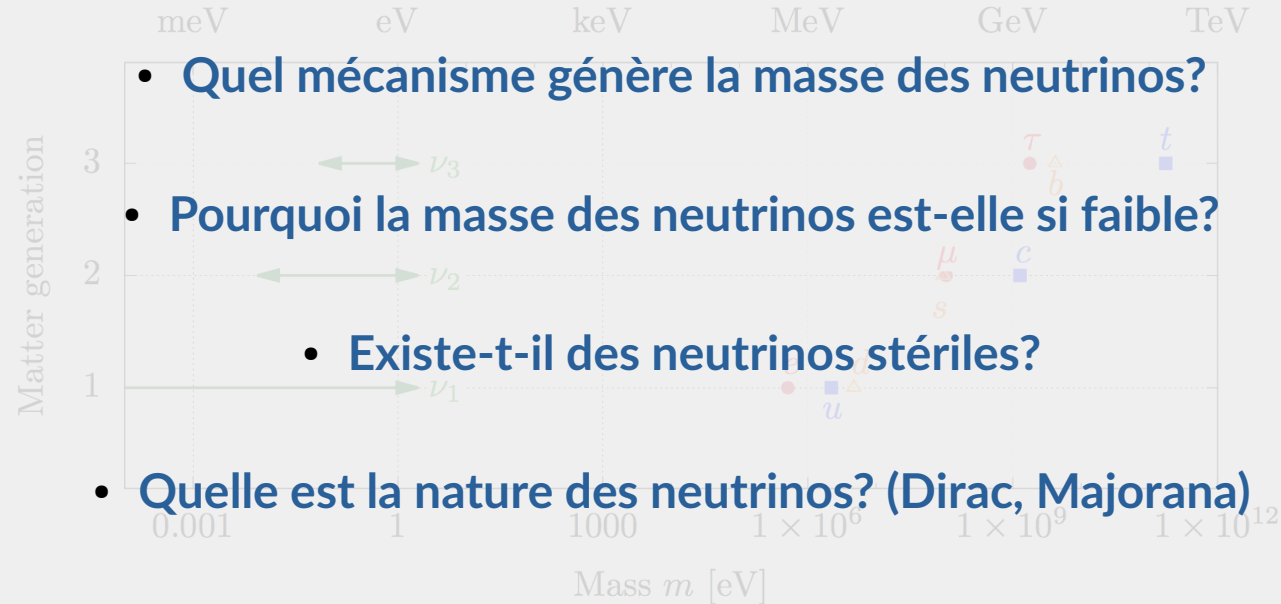
La hiérarchie des masses est toujours inconnue

	Normal Ordering (best fit)		Inverted Ordering ($\Delta\chi^2 = 2.6$)	
	bfp $\pm 1\sigma$	3σ range	bfp $\pm 1\sigma$	3σ range
$\sin^2 \theta_{12}$	$0.304^{+0.013}_{-0.012}$	0.269 → 0.343	$0.304^{+0.012}_{-0.012}$	0.269 → 0.343
$\theta_{12}/^\circ$	$33.44^{+0.77}_{-0.74}$	31.27 → 35.86	$33.45^{+0.77}_{-0.74}$	31.27 → 35.87
$\sin^2 \theta_{23}$	$0.573^{+0.018}_{-0.023}$	0.405 → 0.620	$0.578^{+0.017}_{-0.021}$	0.410 → 0.623
$\theta_{23}/^\circ$	$49.2^{+1.0}_{-1.3}$	39.5 → 52.0	$49.5^{+1.0}_{-1.2}$	39.8 → 52.1
$\sin^2 \theta_{13}$	$0.02220^{+0.00068}_{-0.00062}$	0.02034 → 0.02430	$0.02238^{+0.00064}_{-0.00062}$	0.02053 → 0.02434
$\theta_{13}/^\circ$	$8.57^{+0.13}_{-0.12}$	8.20 → 8.97	$8.60^{+0.12}_{-0.12}$	8.24 → 8.98
$\delta_{\text{CP}}/^\circ$	194^{+52}_{-25}	105 → 405	287^{+27}_{-32}	192 → 361
$\frac{\Delta m_{21}^2}{10^{-5} \text{ eV}^2}$	$7.42^{+0.21}_{-0.20}$	6.82 → 8.04	$7.42^{+0.21}_{-0.20}$	6.82 → 8.04
$\frac{\Delta m_{3\ell}^2}{10^{-3} \text{ eV}^2}$	$+2.515^{+0.028}_{-0.028}$	+2.431 → +2.599	$-2.498^{+0.028}_{-0.029}$	-2.584 → -2.413



Questions ouvertes ?

- Quelles sont les états propres de masse du neutrino?



- Quel mécanisme génère la masse des neutrinos?

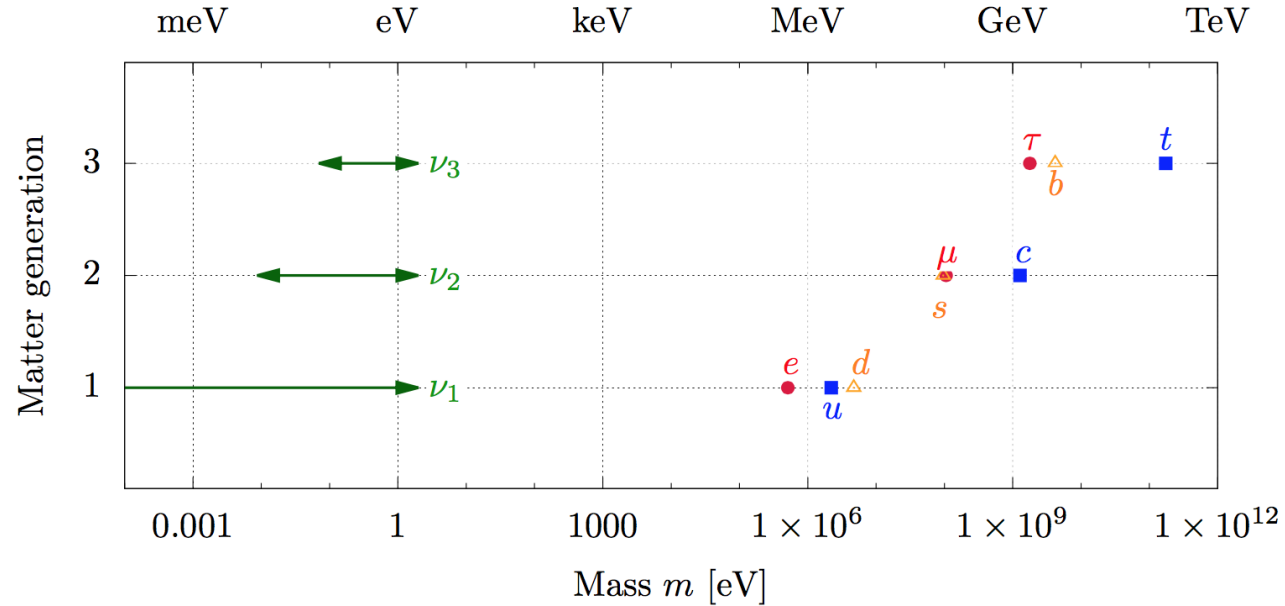
- Pourquoi la masse des neutrinos est-elle si faible?

- Existe-t-il des neutrinos stériles?

- Quelle est la nature des neutrinos? (Dirac, Majorana)

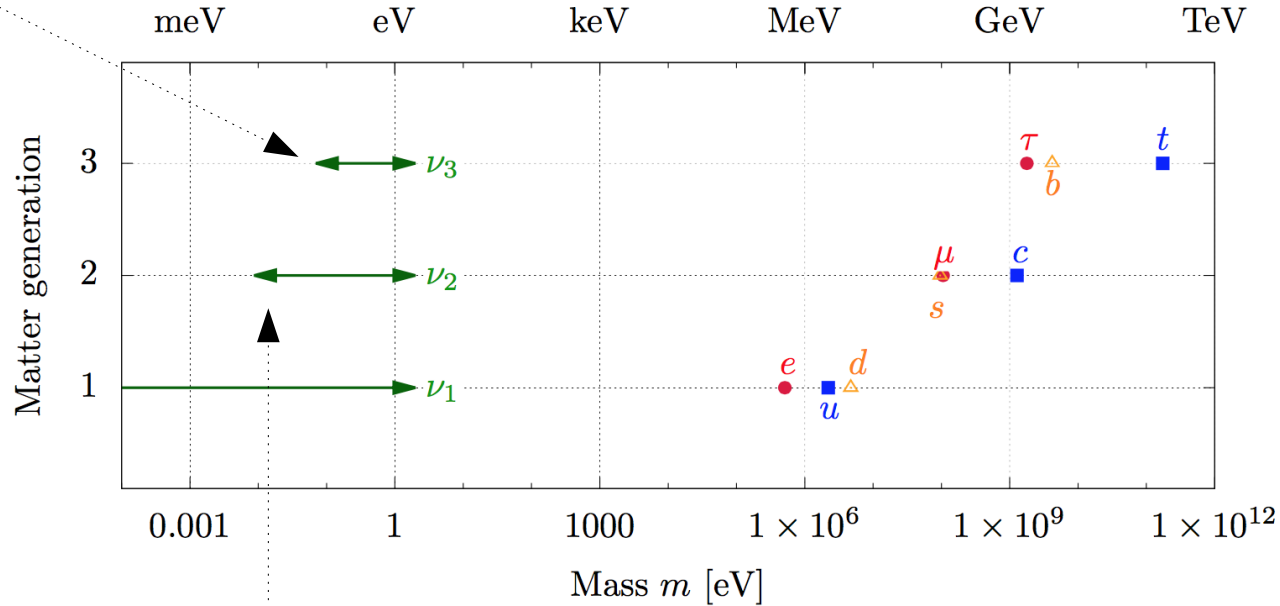
- Quelle est la hiérarchie de masse des neutrinos?

Questions ouvertes ?



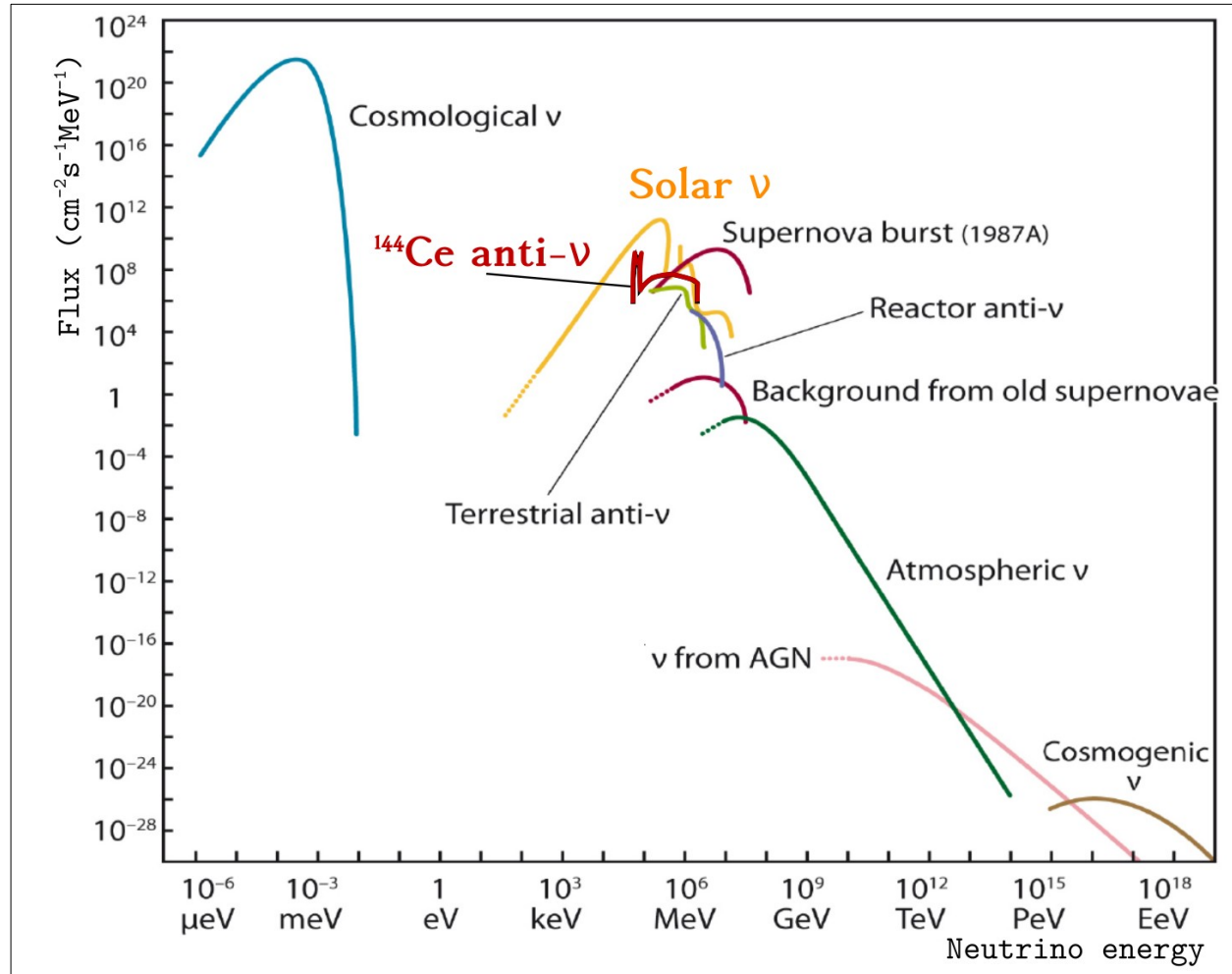
Limites sur la masse

$$\frac{\Delta m_{3\ell}^2}{10^{-3} \text{ eV}^2} \left| +2.515^{+0.028}_{-0.028} \right.$$



$$\frac{\Delta m_{21}^2}{10^{-5} \text{ eV}^2} \left| 7.42^{+0.21}_{-0.20} \right.$$

Fluxs de neutrinos



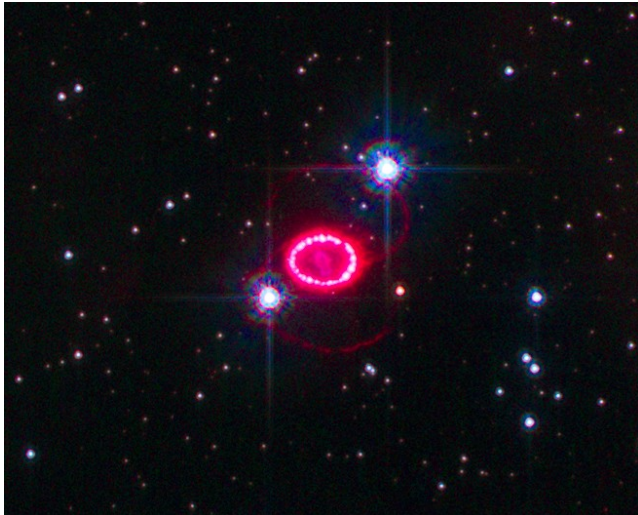
Neutrinos de supernovae

Quand le noyau de l'étoile atteint la densité de la matière, les protons et les neutrons sont libérés. Les protons capturent rapidement les électrons du milieu afin de produire des neutrons, émettant des neutrinos. Ces derniers s'échappent et on a la neutronisation rapide du noyau

→ émission de ν_e

→ création d'une étoile à neutron

Visible observation by Hubble telescope of the Magelanic cloud



SN1987A

23 février 1987 :
Galactic supernova
reaches Earth

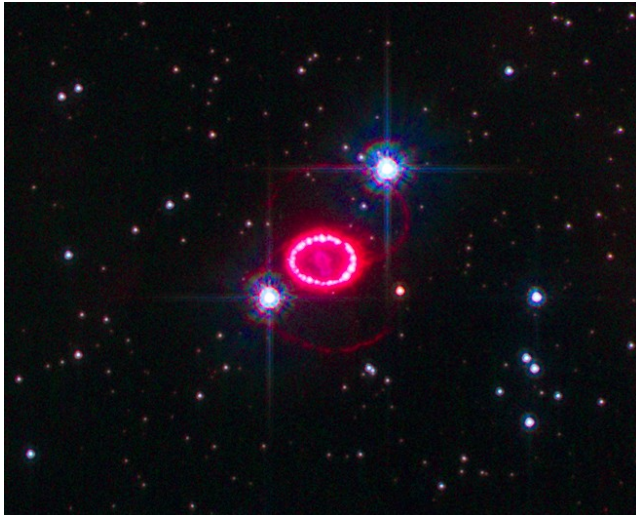
Neutrinos de supernovae

Quand le noyau de l'étoile atteint la densité de la matière, les protons et les neutrons sont libérés. Les protons capturent rapidement les électrons du milieu afin de produire des neutrons, émettant des neutrinos. Ces derniers s'échappent et on a la neutronisation rapide du noyau

→ émission de ν_e

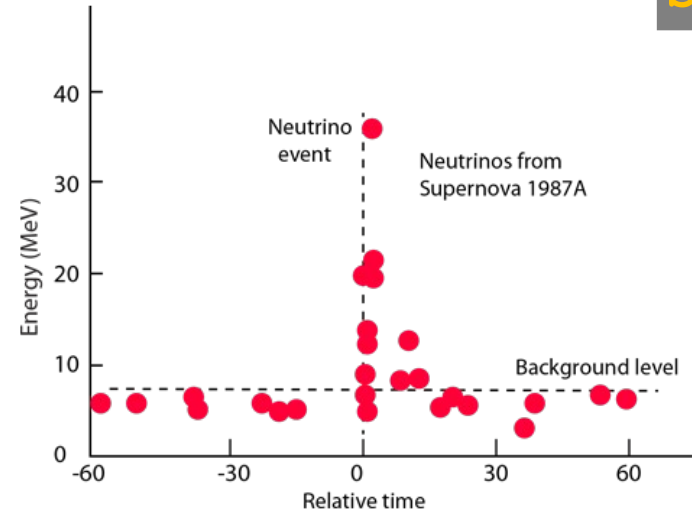
→ création d'une étoile à neutron

Visible observation by Hubble telescope of the Magelanic cloud



Neutrinos observation by Kamiokande-II

SN1987A



Neutrinos de supernovae

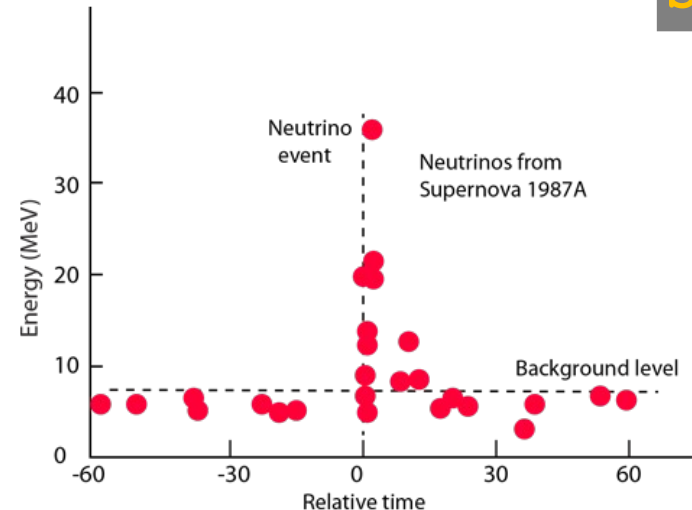
Quand le noyau de l'étoile atteint la densité de la matière, les protons et les neutrons sont libérés. Les protons capturent rapidement les électrons du milieu afin de produire des neutrons, émettant des neutrinos. Ces derniers s'échappent et on a la neutronisation rapide du noyau

- émission de ν_e
- création d'une étoile à neutron

- 10^{58} neutrinos émis il y a 150 000 ans
- $4,5 \times 10^{17}$ traversent Kamiokande quelques heures avant la contrepartie lumineuse
- 11 événements sont observés

Neutrinos observation by Kamiokande-II

SN1987A



Neutrinos de supernovae

Quand le noyau de l'étoile atteint la densité de la matière, les protons et les neutrons sont libérés. Les protons capturent rapidement les électrons du milieu afin de produire des neutrons, émettant des neutrinos. Ces derniers s'échappent et on a la neutronisation rapide du noyau

→ émission de ν_e

→ création d'une étoile à neutron

Neutrinos observation by Brookhaven

TABLE III. Characteristics of the contained neutrino events recorded on 23 February.

Event No. ^a	Time (UT)	No. of PMT's	Energy ^b (MeV)	Angular distribution ^c (degrees)
33162	7:35:41.37	47	38	74
33164	7:35:41.79	61	37	52
33167	7:35:42.02	49	40	56
33168	7:35:42.52	60	35	63
33170	7:35:42.94	52	29	40
33173	7:35:44.06	61	37	52
33179	7:35:46.38	44	20	39
33184	7:35:46.96	45	24	102

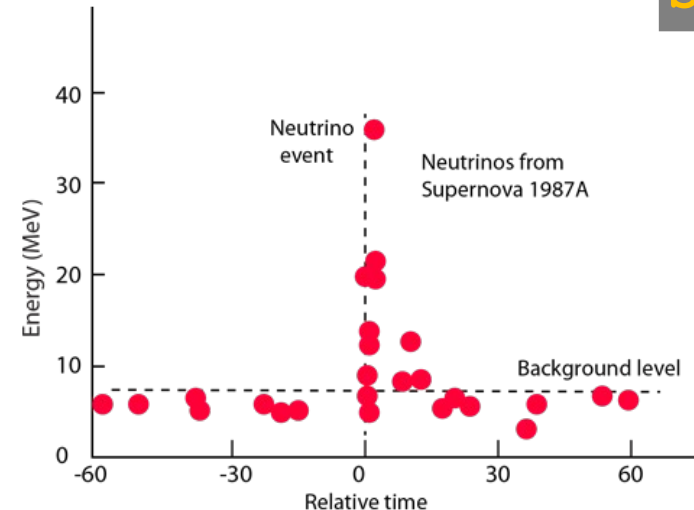
^aThe event numbers are not sequential. Interspersed with the contained neutrino events are fifteen entering cosmic-ray muons.

^bError in energy determination is $\pm 25\%$ (systematic plus statistical).

^cIndividual track reconstruction uncertainty is 15° . Note that this angular distribution will be systematically biased toward the source because of the location of the inoperative PMT's.

Neutrinos observation by Kamiokande-II

SN1987A



Neutrinos de supernovae

Données :

SN1987A

- Évènement A : 38 MeV
- Évènement B: 22 MeV
- Retard A-B : 5 secondes
- Grand Nuage de Magellan: 50 kpcs

Hypothèses supplémentaires:

- Les neutrinos sont tous émis au même moment
- La distance est connue

Neutrinos de supernovae

Données :

SN1987A

- Évènement A : 38 MeV
- Évènement B: 22 MeV
- Retard A-B : 5 secondes
- Grand Nuage de Magellan: 50 kpcs

Si on comparait les γ ?

Neutrinos de supernovae

Données :

SN1987A

- Évènement A : 38 MeV
- Évènement B: 22 MeV
- Retard A-B : 5 secondes
- Grand Nuage de Magellan: 50 kpcs

Si on comparait les γ ?

On a :

$$E_A = \gamma_A mc^2$$

$$E_B = \gamma_B mc^2$$

Soit :

$$\gamma_A = \frac{E_A}{mc^2}$$

$$\gamma_B = \frac{E_B}{mc^2}$$

Donc :

$$\frac{\gamma_A}{\gamma_B} = \frac{E_A}{E_B} \approx 1,72$$

Neutrinos de supernovae

Données :

SN1987A

- Évènement A : 38 MeV
- Évènement B: 22 MeV
- Retard A-B : 5 secondes
- Grand Nuage de Magellan: 50 kpcs

$$1) \frac{\gamma_A}{\gamma_B} = \frac{E_A}{E_B} \approx 1,72$$

t_i en fonction de γ_i ?

Neutrinos de supernovae

Données :

- Évènement A : 38 MeV
- Évènement B: 22 MeV
- Retard A-B : 5 secondes
- Grand Nuage de Magellan: 50 kpcs

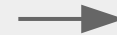
SN1987A

Par définition:

$$t_i = \frac{D}{v_i}$$

De même:

$$\gamma_i = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v_i^2}{c^2}}}$$



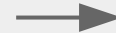
$$v_i = c \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma_i^2}}$$

1) $\frac{\gamma_A}{\gamma_B} = \frac{E_A}{E_B} \approx 1,72$

t_i en fonction de γ_i ?

Donc:

$$t_i = \frac{D}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{\gamma_i^2}}}$$



$$t_i \simeq \frac{D}{c} \left(1 + \frac{1}{2\gamma_i^2}\right)$$

Neutrinos de supernovae

Données :

SN1987A

- Évènement A : 38 MeV
- Évènement B: 22 MeV
- Retard A-B : 5 secondes
- Grand Nuage de Magellan: 50 kpcs

$$1) \frac{\gamma_A}{\gamma_B} = \frac{E_A}{E_B} \approx 1,72$$

$$2) t_i \simeq \frac{D}{c} \left(1 + \frac{1}{2\gamma_i^2} \right)$$

→ $(t_B - t_A) ?$

Neutrinos de supernovae

Données :

SN1987A

- Évènement A : 38 MeV
- Évènement B: 22 MeV
- Retard A-B : 5 secondes
- Grand Nuage de Magellan: 50 kpcs

$$1) \frac{\gamma_A}{\gamma_B} = \frac{E_A}{E_B} \approx 1,72$$

$$2) t_i \simeq \frac{D}{c} \left(1 + \frac{1}{2\gamma_i^2}\right)$$

→ $(t_B - t_A) ? \gamma_i ?$

D = 164 000 années lumières

$$t_B - t_A \simeq \frac{D}{2c} \left(\frac{1}{\gamma_B^2} - \frac{1}{\gamma_A^2} \right)$$

$$t_B - t_A \simeq \frac{D}{2c\gamma_A^2} \times (1,72^2 - 1)$$

Neutrinos de supernovae

Données :

SN1987A

- Évènement A : 38 MeV
- Évènement B: 22 MeV
- Retard A-B : 5 secondes
- Grand Nuage de Magellan: 50 kpcs

$$1) \frac{\gamma_A}{\gamma_B} = \frac{E_A}{E_B} \approx 1,72$$

$$2) t_i \simeq \frac{D}{c} \left(1 + \frac{1}{2\gamma_i^2}\right)$$

m_ν ?

$$t_B - t_A \simeq \frac{D}{2c} \left(\frac{1}{\gamma_B^2} - \frac{1}{\gamma_A^2} \right)$$

$$t_B - t_A \simeq \frac{D}{2c\gamma_A^2} \times (1,72^2 - 1)$$

$$\gamma_A \simeq 1,01 \times 10^6$$

Neutrinos de supernovae

Données :

SN1987A

- Évènement A : 38 MeV
- Évènement B: 22 MeV
- Retard A-B : 5 secondes
- Grand Nuage de Magellan: 50 kpcs

$$1) \frac{\gamma_A}{\gamma_B} = \frac{E_A}{E_B} \approx 1,72$$

$$2) t_i \simeq \frac{D}{c} \left(1 + \frac{1}{2\gamma_i^2}\right)$$

$$t_B - t_A \simeq \frac{D}{2c} \left(\frac{1}{\gamma_B^2} - \frac{1}{\gamma_A^2}\right)$$

$$t_B - t_A \simeq \frac{D}{2c\gamma_A^2} \times (1,72^2 - 1)$$

$$\gamma_A \simeq 1,01 \times 10^6$$

$$m < \frac{E_A}{\gamma_A c^2}$$

Neutrinos de supernovae

Données :

SN1987A

- Évènement A : 38 MeV
- Évènement B: 22 MeV
- Retard A-B : 5 secondes
- Grand Nuage de Magellan: 50 kpcs

$$1) \frac{\gamma_A}{\gamma_B} = \frac{E_A}{E_B} \approx 1,72$$

$$2) t_i \simeq \frac{D}{c} \left(1 + \frac{1}{2\gamma_i^2} \right)$$

→ $(t_B - t_A) ?$

$$t_B - t_A \simeq \frac{D}{2c} \left(\frac{1}{\gamma_B^2} - \frac{1}{\gamma_A^2} \right)$$

$$t_B - t_A \simeq \frac{D}{2c\gamma_A^2} \times (1,72^2 - 1)$$

$$\gamma_A \simeq 1,01 \times 10^6$$

$$m < \frac{E_A}{\gamma_A c^2}$$

→ $m_\nu < 37 \text{ eV} \cdot \text{c}^{-2}$

Neutrinos de supernovae

Données :

SN1987A

- Évènement A : 38 MeV
- Évènement B: 22 MeV
- Retard A-B : 5 secondes
- Grand Nuage de Magellan: 50 kpcs

NEUTRINO MASS, LUMINOSITY VARIATION, AND SPECTRUM OF SN1987A*

GANG ZHAO, YONGGHENG ZHAO, JIASHENG HUANG, LONLONG FENG, KELIANG HUANG, QIUHE PENG, and TAN LU

Department of Astronomy, Nanjing University, Nanjing, China

(Received 29 October, 1987)

Abstract. In this paper, the neutrino mass has been determined from SN1987a observation in a manner that the simultaneity of neutrino emission is not regarded as the starting point, but is itself defined through the analysis by Monte-Carlo simulation. The result is that the neutrino mass lies in 3–4 eV, possibly $m_\nu \approx 3.6$ eV. Neutrino luminosity variation and neutrino spectrum are also obtained. Comparison with theories gives further support to the mass determination, and also predicts the mass of progenitor star of SN1987a to be in the range of 12–25 M_\odot .

REVIEW D

VOLUME 35, NUMBER 12

15 JUNE 1987

How reliable are neutrino mass limits derived from SN1987A?

Edward W. Kolb, Albert J. Stebbins, and Michael S. Turner
*National Aeronautics and Space Administration/Fermilab Astrophysics Center,
Fermi National Accelerator Laboratory, Batavia, Illinois 60510-0500*
(Received 4 May 1987; revised manuscript received 12 May 1987)

We examine in detail the so-called *model-independent* limits on the electron-neutrino mass which follow from a dispersion analysis of the 2-sec neutrino pulse from SN1987A detected by Kamiokande II (KII). When experimental realities are taken into account, we conclude that no reliable constraint better than the current laboratory limits (i.e., better than order 20 eV) can be obtained. In fact, when all 11 events in the 12.4-sec KII pulse and the 8 Irvine-Michigan-Brookhaven events are considered, a 20-eV or so neutrino mass might actually diminish the inferred duration of the burst at the source. In view of all the pitfalls inherent to a model-independent analysis, we conclude that elaborate model testing is necessary to seriously address the question of neutrino mass.

VOLUME 58, NUMBER 18

PHYSICAL REVIEW LETTERS

4 MAY 1987

Neutrino Mass Limits from SN1987A

W. David Arnett

*Enrico Fermi Institute and Departments of Astronomy and Physics,
University of Chicago, Chicago, Illinois 60637*

and

Jonathan L. Rosner

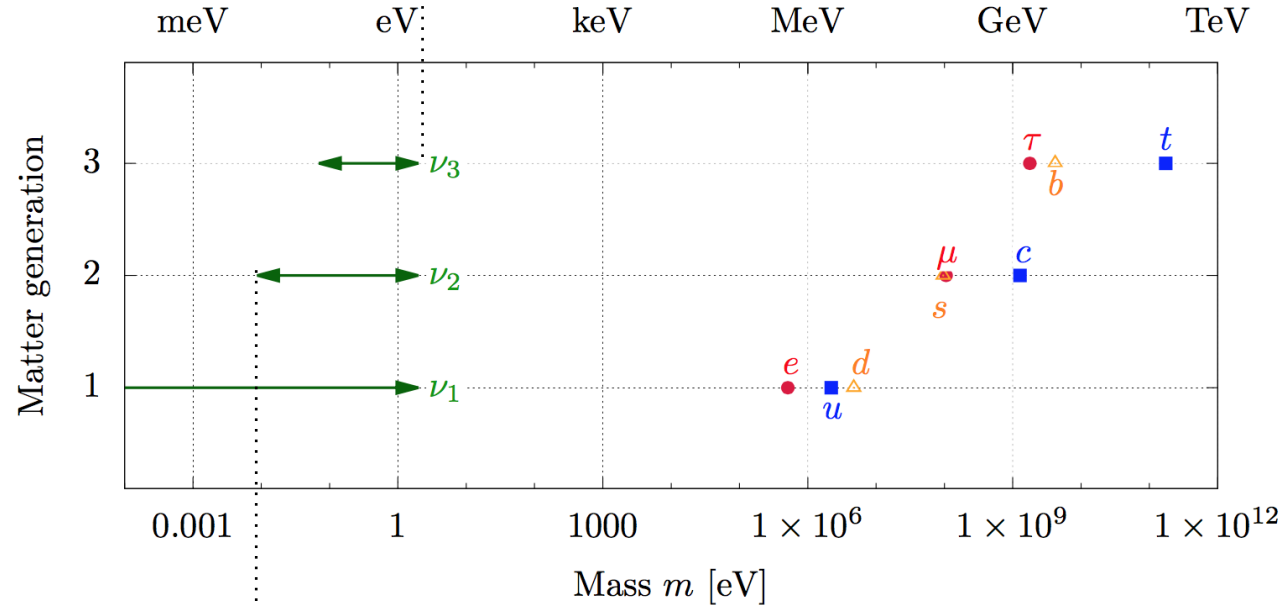
Enrico Fermi Institute and Department of Physics, University of Chicago, Chicago, Illinois 60637
(Received 16 March 1987; revised manuscript received 8 April 1987)

A neutrino signal from the supernova SN1987A is used to place an upper limit on the neutrino mass. If most of the neutrinos must have been emitted within several seconds, as suggested by astrophysical models, the last three of the eleven events observed by the Kamioka detector must correspond to noise or to the tail of a distribution in emission times. If the remaining eight events (which arrived within two seconds of one another) are due to neutrinos emitted within four seconds (a conservative upper limit), the bound $m_\nu \leq 12$ eV/c² is obtained. The Irvine-Michigan-Brookhaven data, with a higher energy threshold, primarily provide information regarding the total duration of the burst.

Limites sur la masse

Limite haute

Issue d'expérience en laboratoire



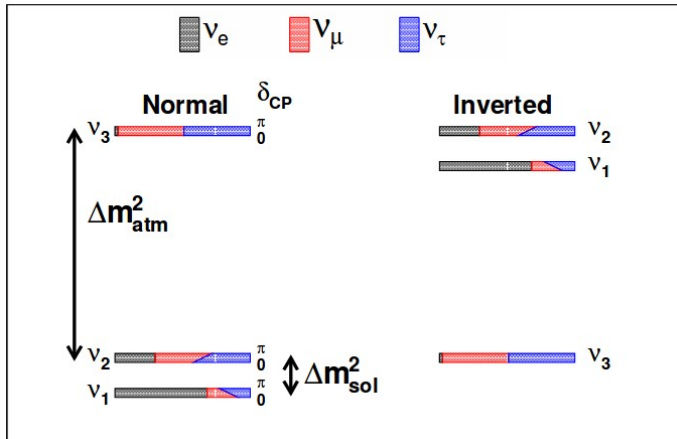
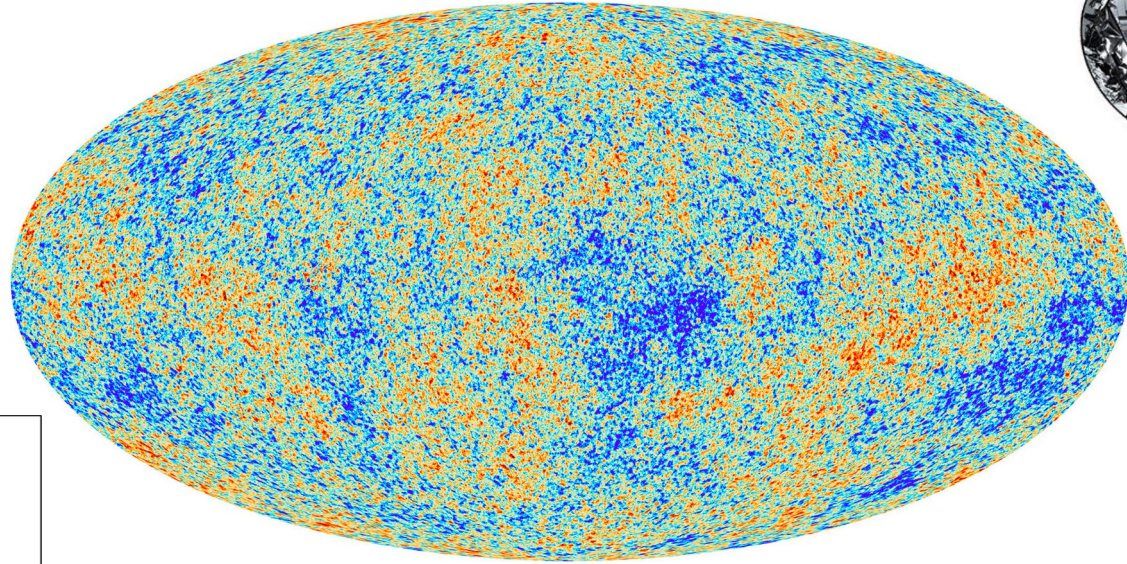
Limite basse

Issue d'expériences d'oscillation

Limites sur la masse

- **Cosmologie**

Fond diffus cosmologique (CMB)



Sensibilité à Σm_ν

- > 0.05 eV pour Hiérarchie Normale
- > 0.1 eV pour Hiérarchie Inversée

Limites sur la masse

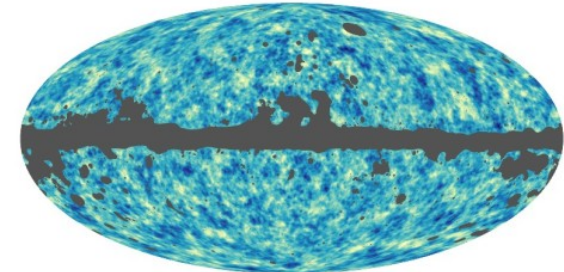
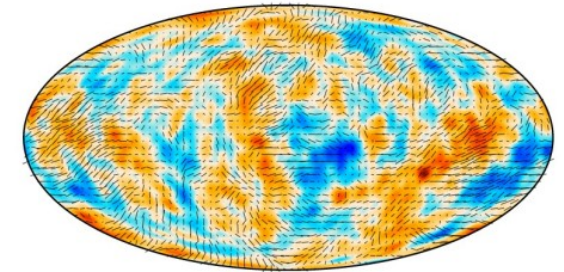
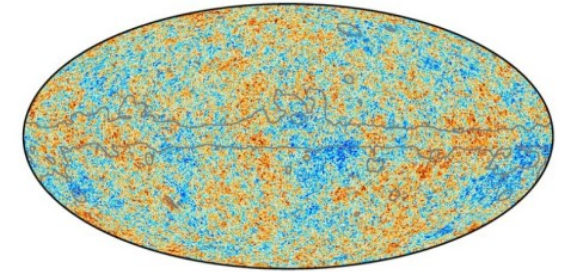
- **Cosmologie**

Détermination de la densité de matière par lentille gravitationnelle

Densité de la matière dans la ligne de vue reconstruite à partir du CMB et de l'effet de lentille gravitationnelle

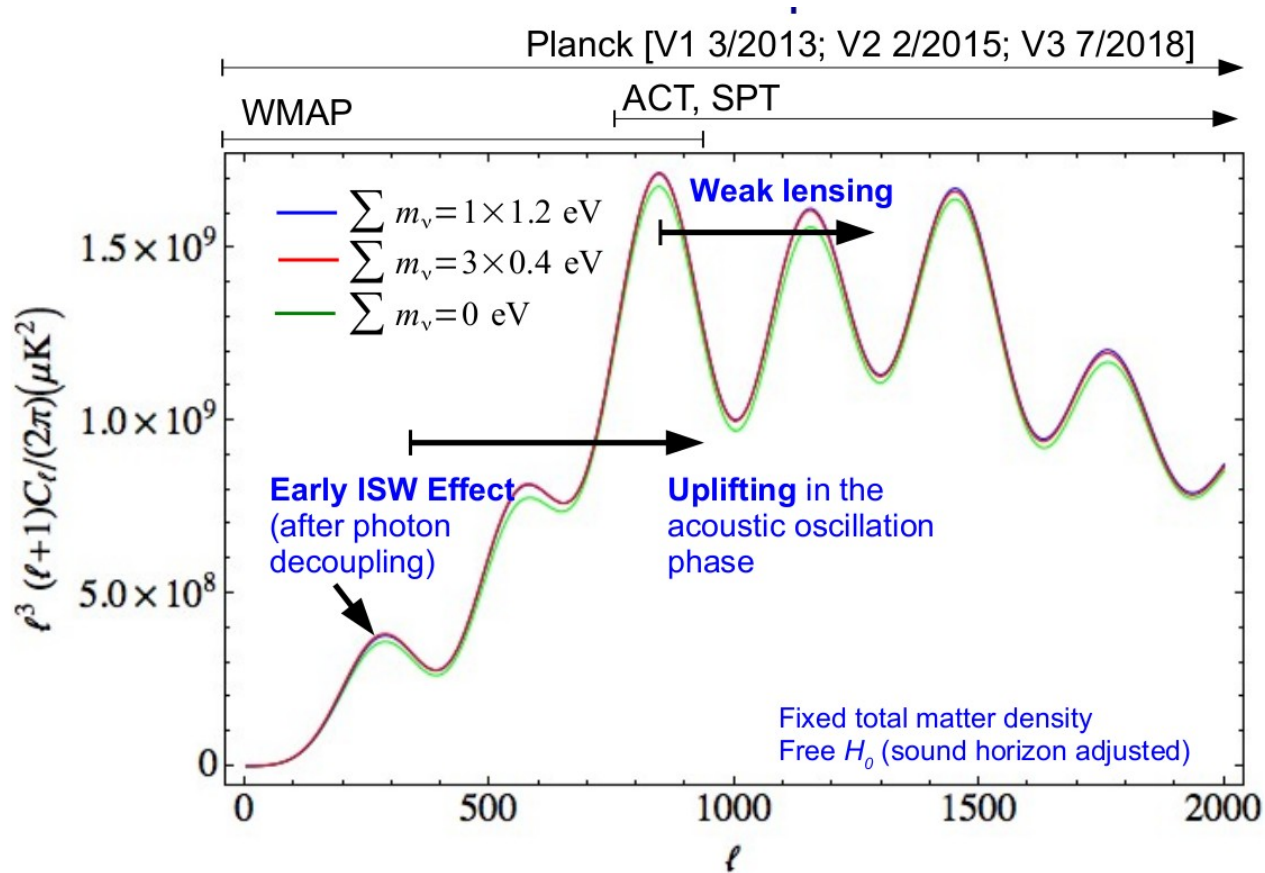
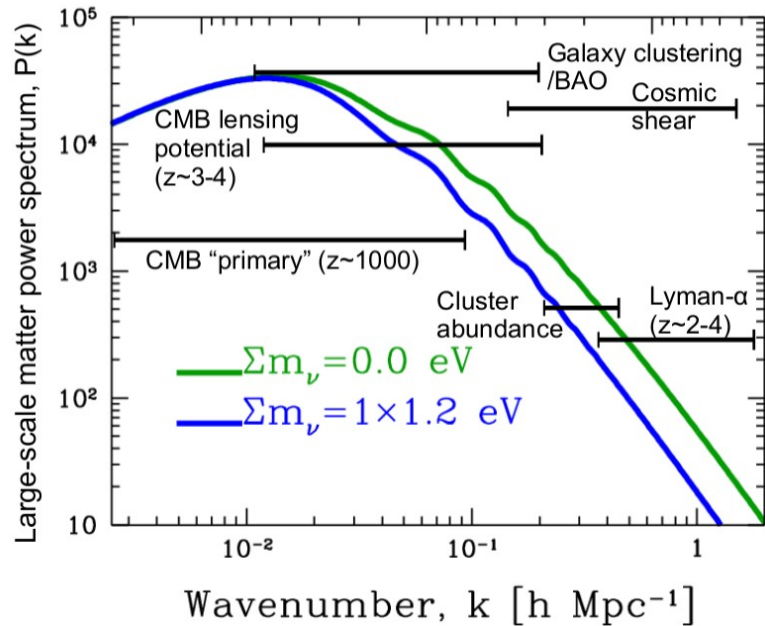
Spectre de puissance \rightarrow contraint la somme des masses des neutrinos

« **Lensing** »



Limites sur la masse

- **Cosmologie**
CMB corrigé de l'effet
lentille gravitationnelle
+BAO



D'après **Neutrino Cosmology**, Y.Y.Y. Wong

Limites sur la masse

- Cosmologie

Λ CDM+neutrino mass 7-parameter fit; 95% C.L. on $\sum m_\nu$ in [eV].

Low- ℓ polarisation only

		+Lensing	+BAO (non-CMB)	+Lensing+BAO
Planck2018 TT+lowE	0.54	0.44	0.16	0.13
2015 numbers	0.72	0.68	0.21	n/a

Plus high- ℓ polarisation

Planck2018 TT +lowE+TE+EE	0.26	0.24	0.13	0.12
2015 numbers	0.49	0.59	0.17	n/a

“Planck 2018 results”, A&A 641, A6 (2020)

Voir Julien Lesgourgues
Mardi à 14h

Limites sur la masse

- Cosmologie

Λ CDM+neutrino mass 7-parameter fit; 95% C.L. on Σm_ν in [eV].

Low- ℓ polarisation only

		+Lensing	+BAO (non-CMB)	+Lensing+BAO
Planck2018 TT+lowE	0.54	0.44	0.16	0.13
2015 numbers	0.72	0.68	0.21	n/a

Plus high- ℓ polarisation

Planck2018 TT +lowE+TE+EE	0.26	0.24	0.13	0.12
2015 numbers	0.49	0.59	0.17	n/a

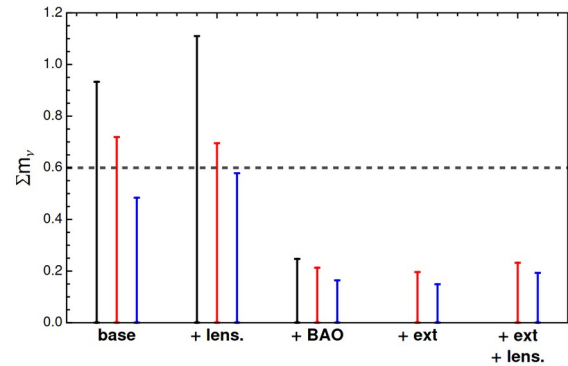
“Planck 2018 results”, A&A 641, A6 (2020)

Lyman- α + Planck : $\Sigma m_\nu < 0,11$ eV (95 % IC)
+BAO+Lensing : $\Sigma m_\nu < 0,09$ eV (95 % IC)

Limites sur la masse

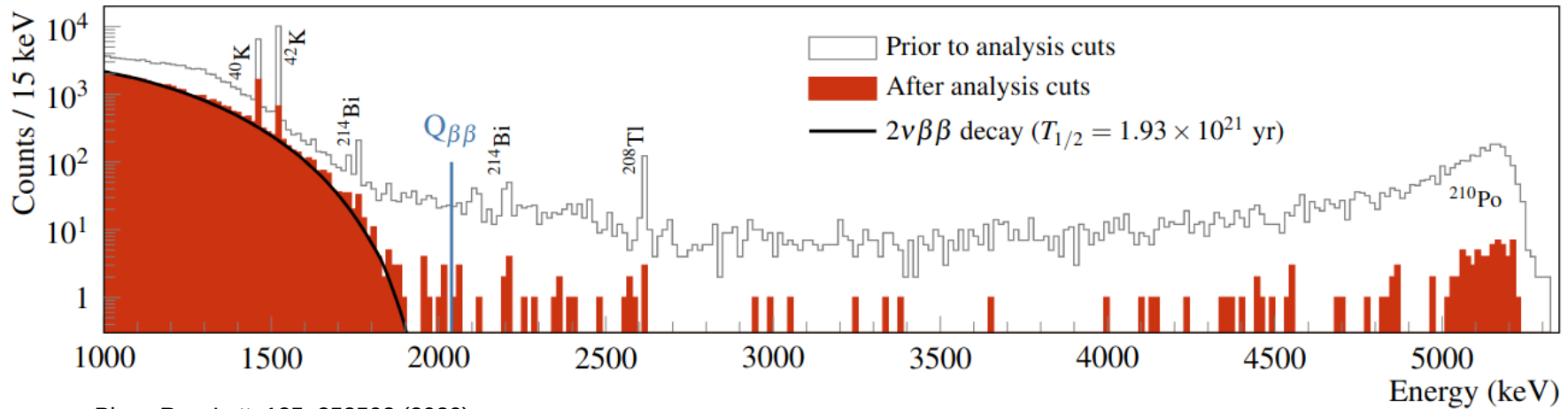
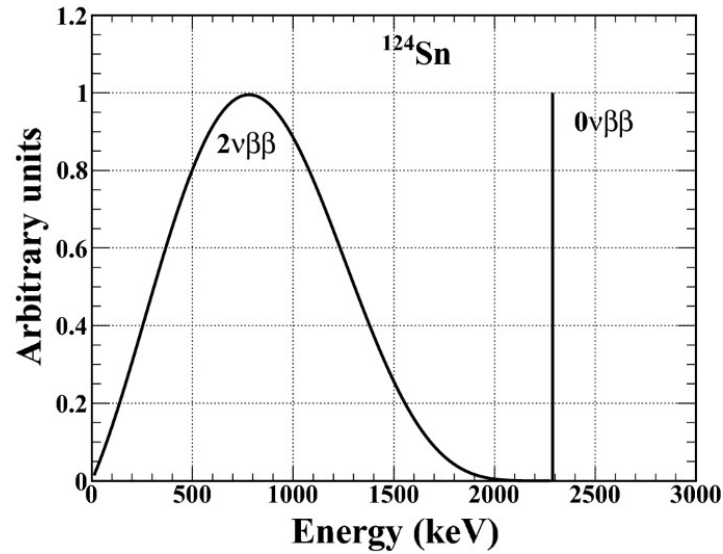
- **Cosmologie**
modèle dépendant
 $\Sigma m_\nu < 120 \text{ meV}$
Ex : Planck, eBOSS

- $0\nu\beta\beta$

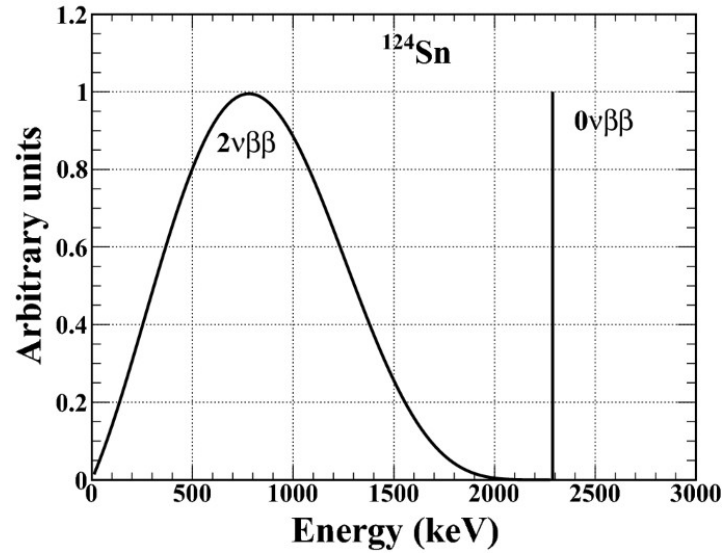


M.Lattanzi 2016 JP, Conf., Ser. 718 032008

$0\nu\beta\beta$



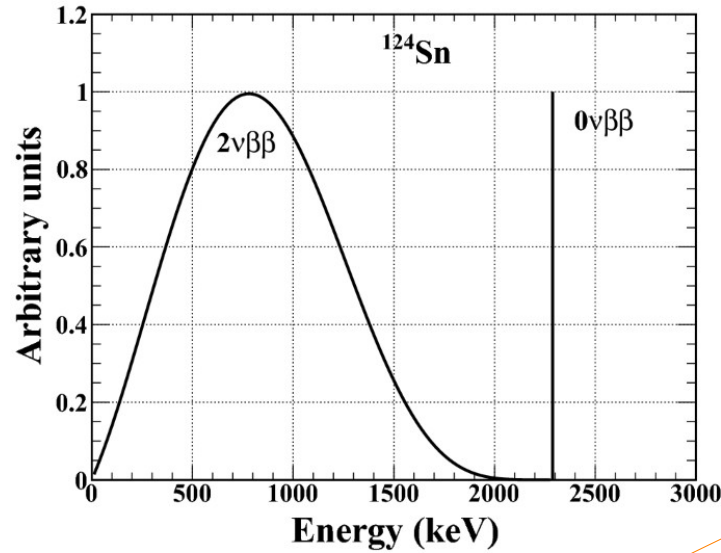
$0\nu\beta\beta$



$$({}^{0\nu}T_{1/2})^{-1} \propto |M^{0\nu}|^2 m_{\beta\beta}^2$$

$$m_{\beta\beta} = \left| \sum_{i=1}^3 U_{ei}^2 m_i \right|$$

$0\nu\beta\beta$



Element de matrice nucléaire
→ Mal connu
→ Dépend du noyau
→ Comparaison difficile

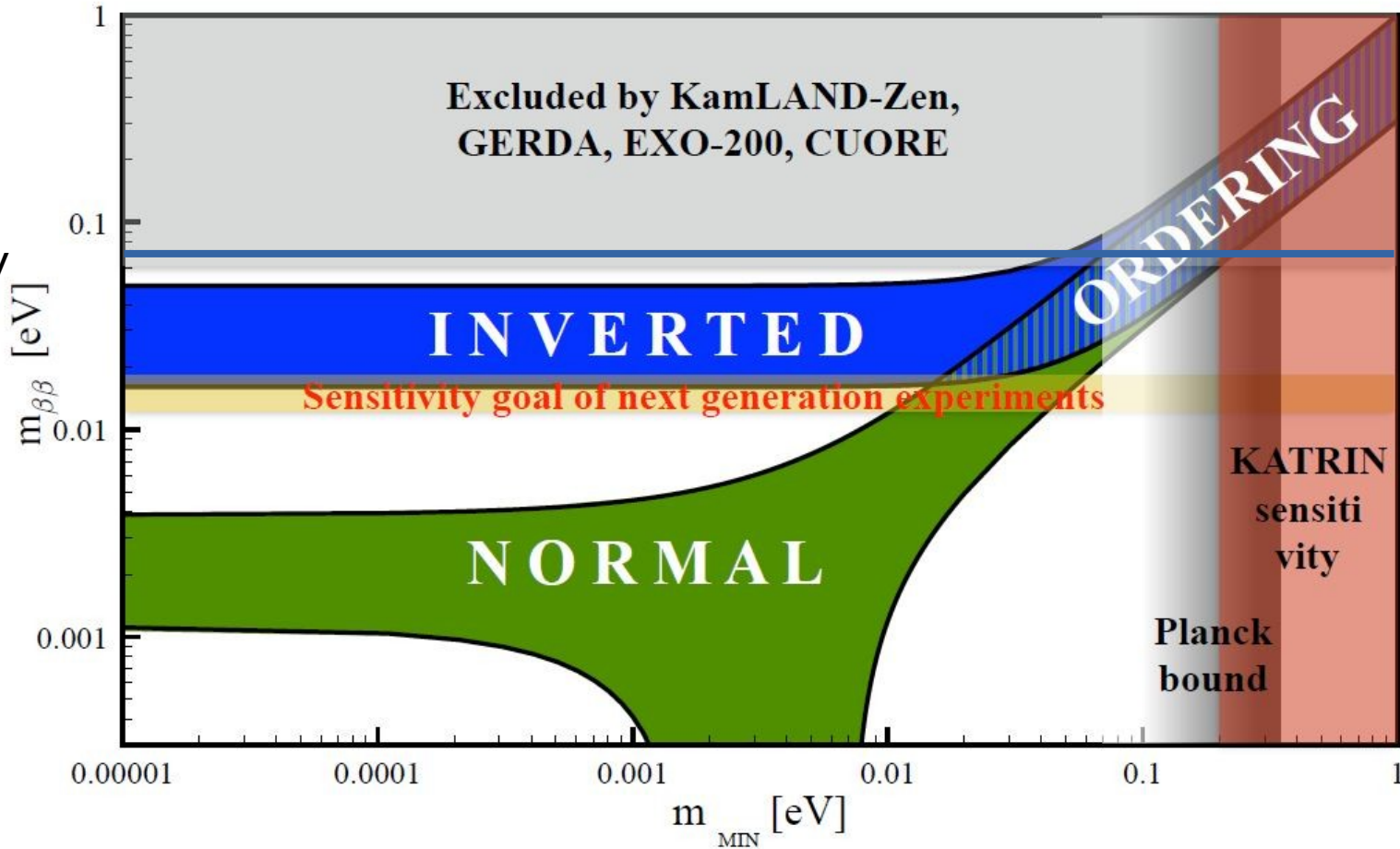
$$({}^{0\nu}T_{1/2})^{-1} \propto |M^{0\nu}|^2 m_{\beta\beta}^2$$

$$m_{\beta\beta} = \left| \sum_{i=1}^3 U_{ei}^2 m_i \right|$$

Non-nulle seulement si :
→ Neutrino de Majorana
→ Partenaire de Majorana léger
→ Phase de Majorana pas défavorable

$0\nu\beta\beta$

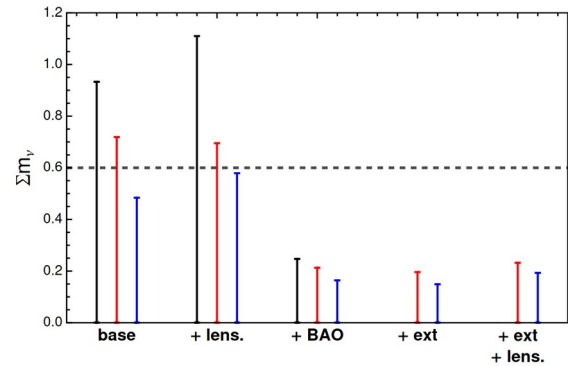
Final Gerda
(2020)
79-120 meV
90% IC



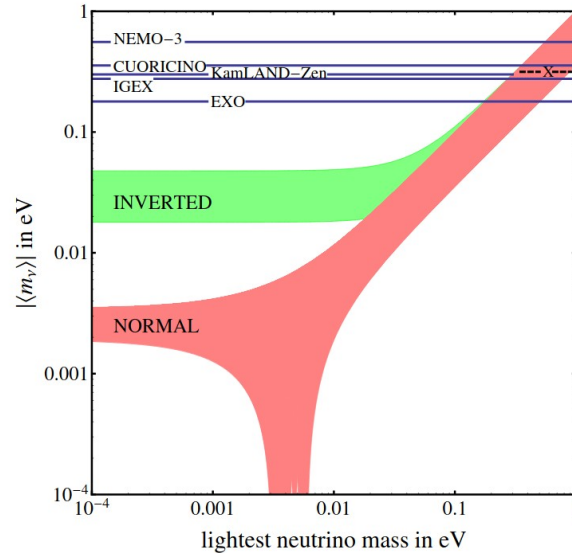
Limites sur la masse

- **Cosmologie**
modèle dépendant
 $\Sigma m_\nu < 120 \text{ meV}$
Ex : Planck, eBOSS

- **$0\nu\beta\beta$**
hypothèse forte (Majorana)
 $m_{\beta\beta} < 100 \text{ meV}$
Ex : CUPID, LEGEND, etc



M. Lattanzi 2016 JP Conf. Ser. 718 032008



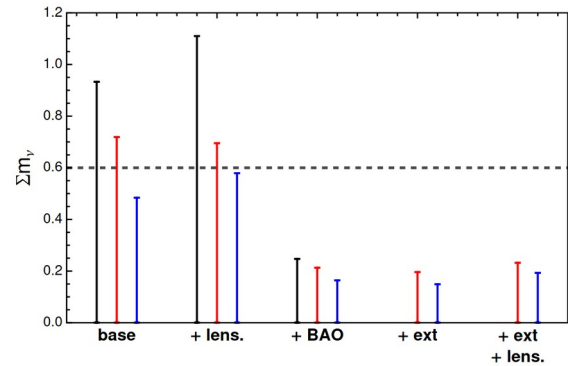
Voir Claudia Nones
Jeudi à 10h30

Limites sur la masse

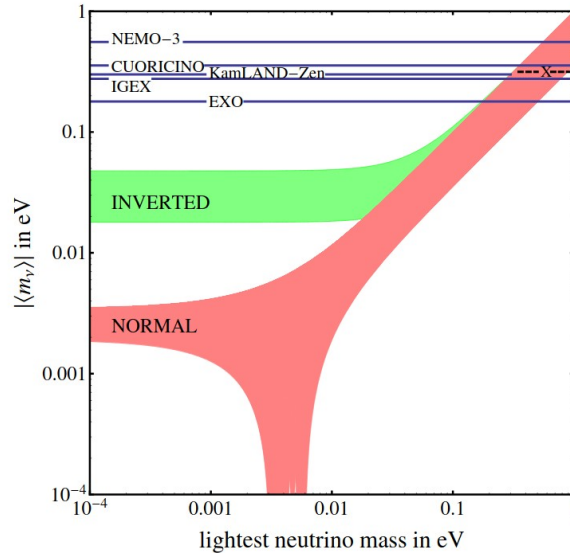
- **Cosmologie**
modèle dépendant
 $\Sigma m_\nu < 120 \text{ meV}$
Ex : Planck, eBOSS

- **$0\nu\beta\beta$**
en laboratoire
 $m_{\beta\beta} < 100 \text{ meV}$
Ex : CUPID, LEGEND, etc

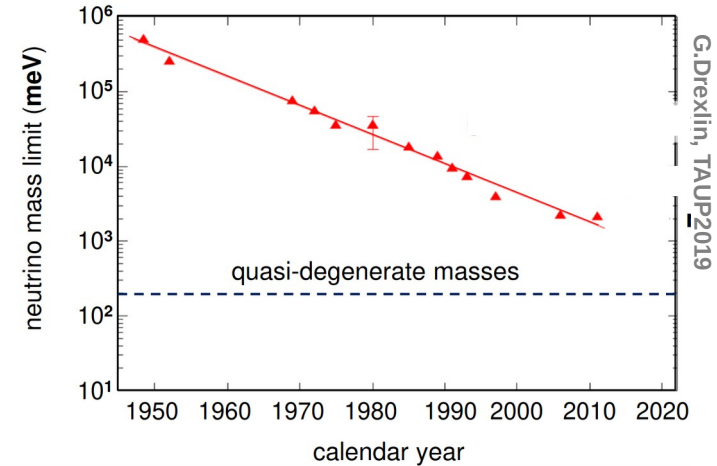
- **Cinématique β**
En laboratoire
 $m_{\nu_e} = 50\text{-}200 \text{ meV}$
Ex : ECHO, KATRIN, Project8



M. Lattanzi 2016 JP Conf. Ser. 718 032008

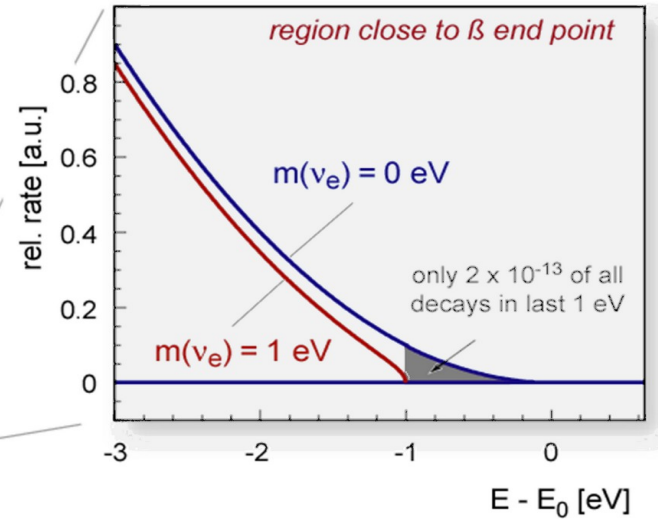
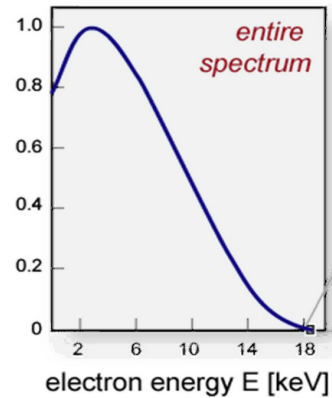
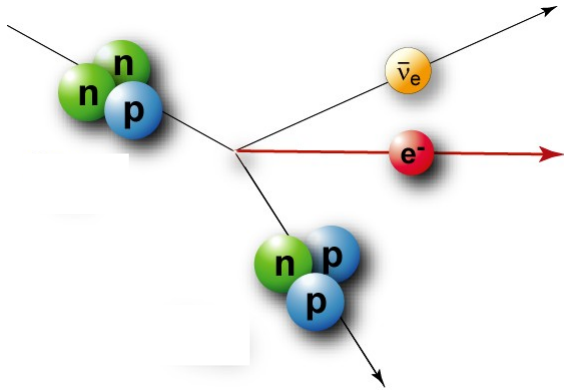


J. Barea et al. PRL 109, 042501 - (2012)



Cinématique β

Idée générale



Cinématique β

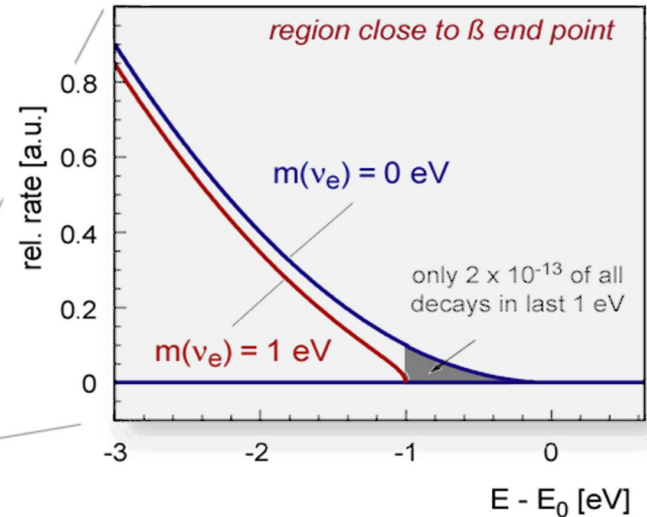
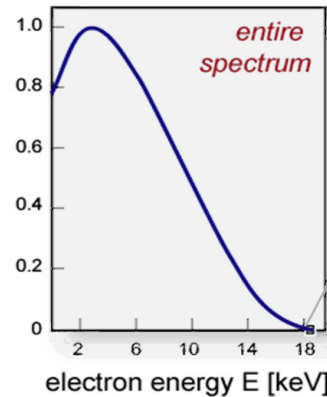
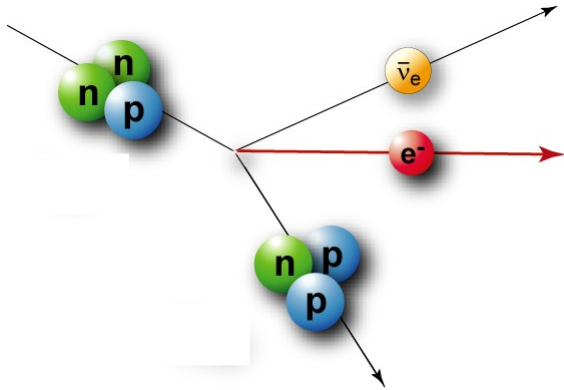
Idée générale

$$\frac{d\Gamma(E; m_\beta)}{dE} \propto C \cdot F(Z, E) \cdot (E + m_e) \cdot p \cdot (E_0 - E) \cdot \sqrt{(E_0 - E)^2 - m_\beta^2}$$

Fonction de Fermi
Moment de l'électron

$$C = \frac{G_f^2}{2\pi^3 \hbar^7 c^5} \cdot \cos^2 \theta_c \cdot |M_{\text{nuc}}|^2$$

$$m_\beta \equiv \sqrt{|U_{e1}|^2 m_1^2 + |U_{e2}|^2 m_2^2 + |U_{e3}|^2 m_3^2}$$

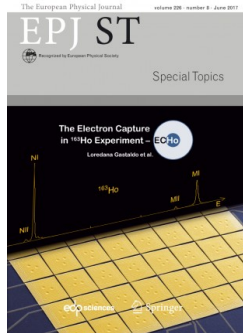


Cinématique β à l'Holmium

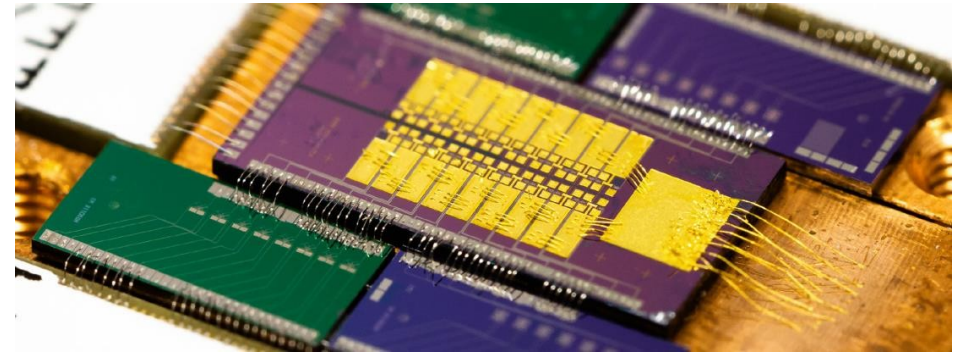
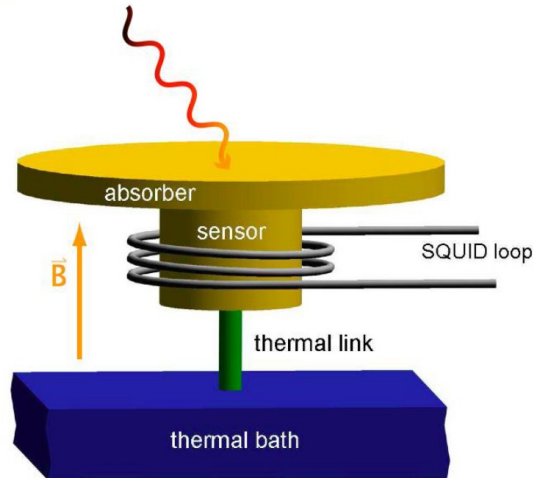
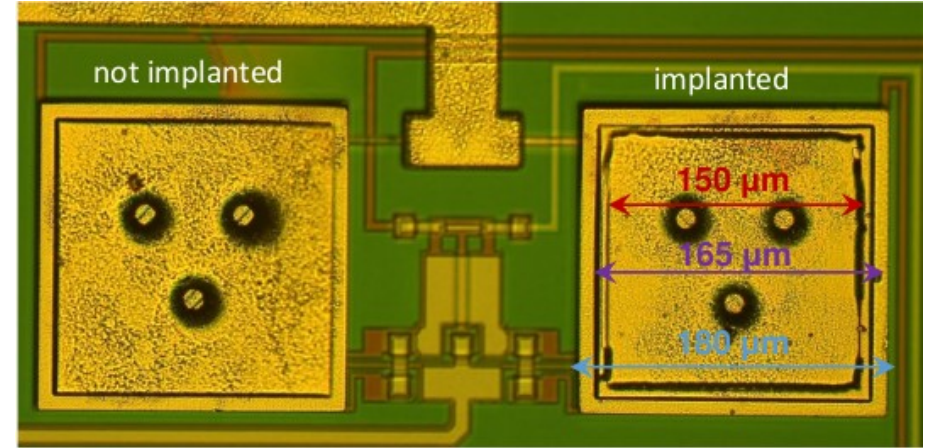


- Metallic Magnetic Calorimeter with SQUID multiplexing read-out
- 5 eV FWHM résolution
- 4 pixels à 0,18 Bq

Cinématique β à l'Holmium



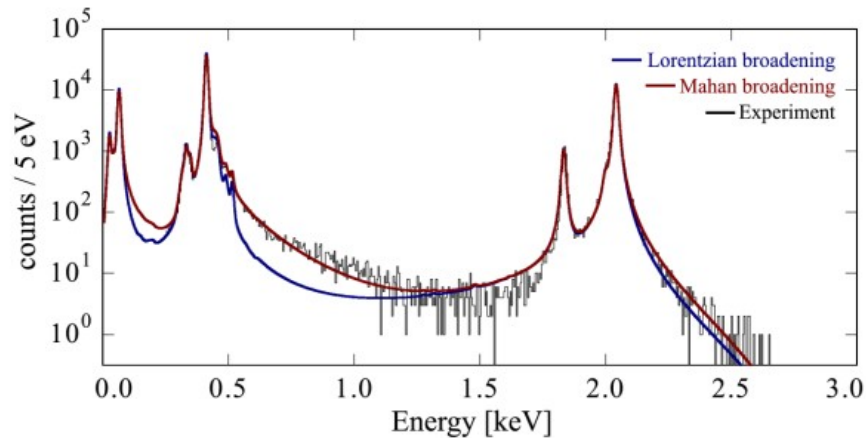
- Metallic Magnetic Calorimeter with SQUID multiplexing read-out
- Source produite par irradiation avec des neutrons sur du ^{162}Er
- Si commercial, beaucoup d'impuretés lanthanides peuvent polluer le spectre \rightarrow mesure du spectre γ pour caractérisation.



Cinématique β à l' Holmium



- Metallic Magnetic Calorimeter with SQUID multiplexing read-out
- 5 eV FWHM résolution
- 4 pixels à 0,18 Bq



C. Velte et al., EPJC **79** (2019) 1026

4 day measurement with 4 pixels loaded with ~ 0.2 Bq ^{163}Ho

Energy resolution

$$\Delta E_{\text{FWHM}} = 9.2 \text{ eV}$$

Background level

$$b < 1.6 \times 10^{-4} \text{ events/eV/pixel/day}$$

- $Q_{\text{EC}} = (2838 \pm 14) \text{ eV}$
- $m(\nu_e) < 150 \text{ eV (95\% C.L.)}$



Extrait de L.Gastoldo, Neutrino mass determination with ^{163}Ho – ECHO & HOLMES
Neutrino 2022 - Seoul

Cinématique β à l'Holmium



- Metallic Magnetic Calorimeter with SQUID multiplexing read-out
- 5 eV FWHM résolution
- 4 pixels à 0,18 Bq

Target of ECHO-1k

→ A ~ 1 kBq | $m_\nu < 10$ eV

Target of ECHO-100k

→ 12 000 détecteurs

→ A ~ 120 kBq | $m_\nu < 2$ eV

Challenges:

Calorimétrique → pile-up, technologique → multiplexing, activité → source production, bruit de fond, description théorique du spectre (ab initio calculs)



- Transition-Edge sensors (mesure calorimétrique)
- Multi-pixel read-out
- résolution 4 eV@5,9 keV pour rayon-x

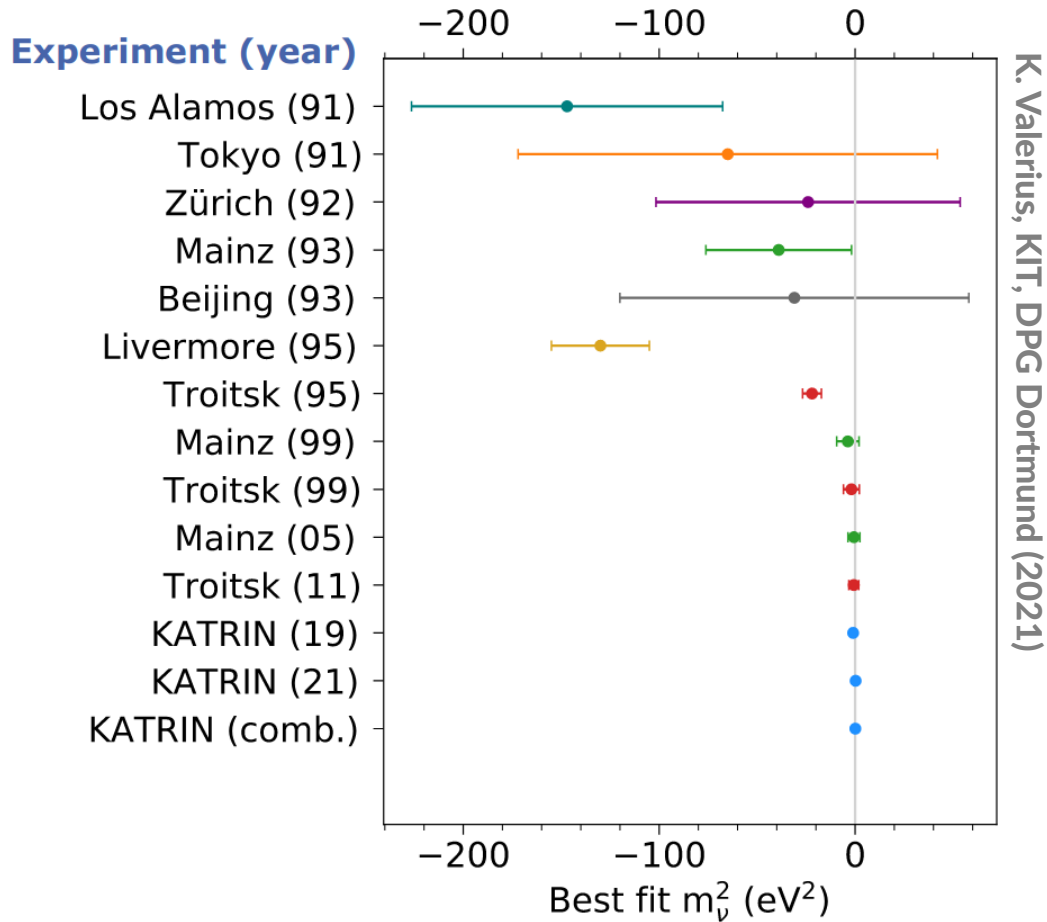
Target of HOLMES

→ 1000 détecteurs

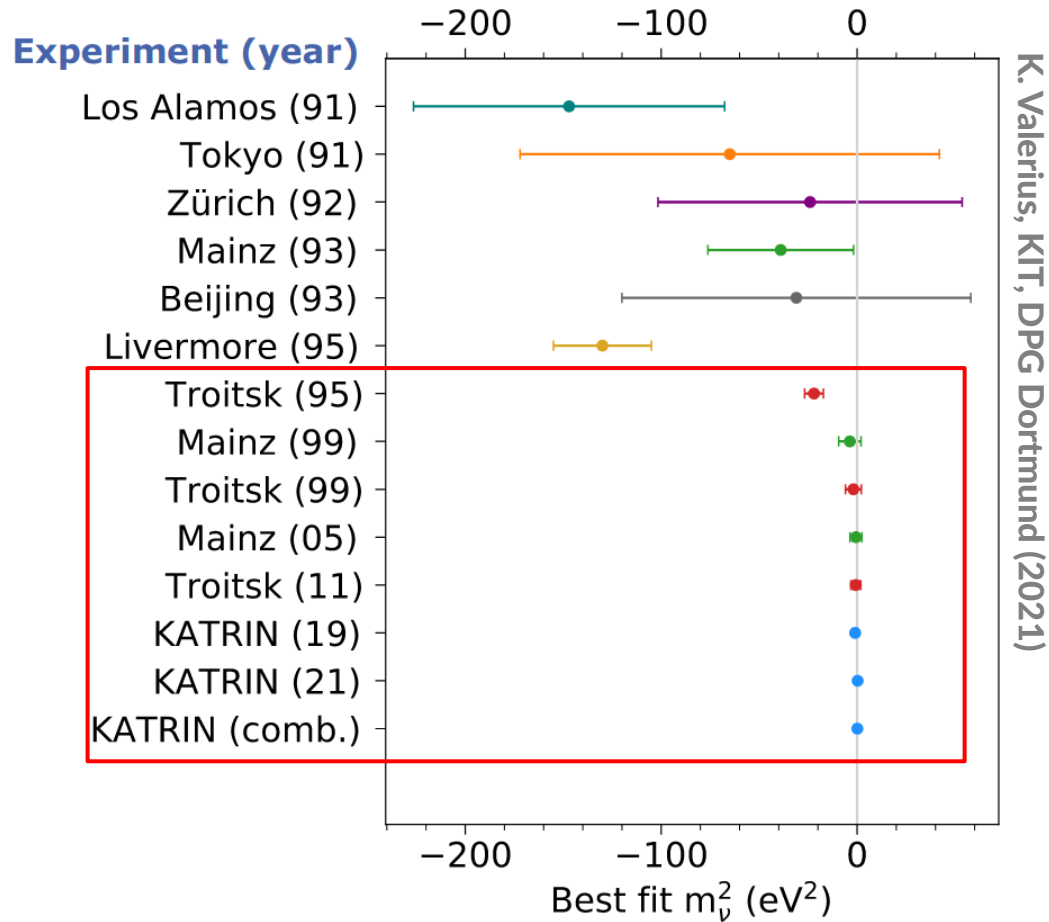
→ 300 kBq

→ $m_\nu < 1$ eV

Cinématique β



Cinématique β au tritium

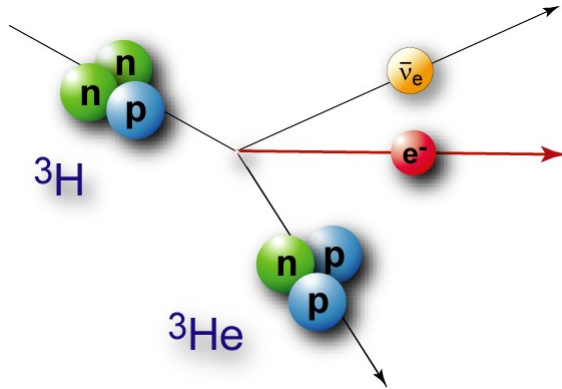


- Troitsk
- Mainz
- KATRIN

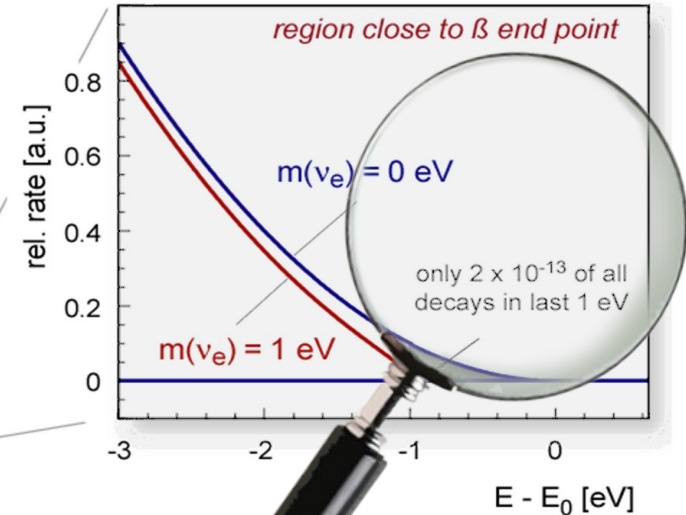
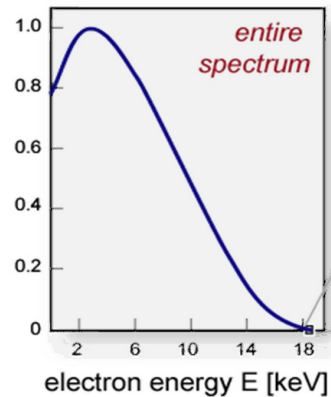
→ MAC-E filters with tritium source

Cinématique β : KATRIN

Idée générale



- Source β très intense 10^{11} désint/s
- Bas bruit de fond $< 0,1$ cps
- Excellente résolution énergie ~ 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

Hochschule Fulda
University of Applied Sciences



UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
MADRID

KIT
Karlsruher Institut für Technologie

MAX-PLANCK-INSTITUT
FÜR KERNPHYSIK
HEIDELBERG

Chula
Chulalongkorn University

SURANAREE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
University of Innovation

UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI MILANO
BICOCCA

DE LA RECHERCHE & L'ENSEIGNEMENT
cea

JG|U

JOHANNES GUTENBERG
UNIVERSITÄT MAINZ

TUM
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
MÜNCHEN

universität**bonn**



UNIVERSITÄT
HEIDELBERG
ZUM SEHEN
SETZEN

Russian Academy
of Sciences



THE UNIVERSITY
of NORTH CAROLINA
at CHAPEL HILL



UNIVERSITY OF
WASHINGTON

MIT
Massachusetts
Institute of
Technology

The Czech Academy
of Sciences



BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL



POLITECNICO
MILANO 1863



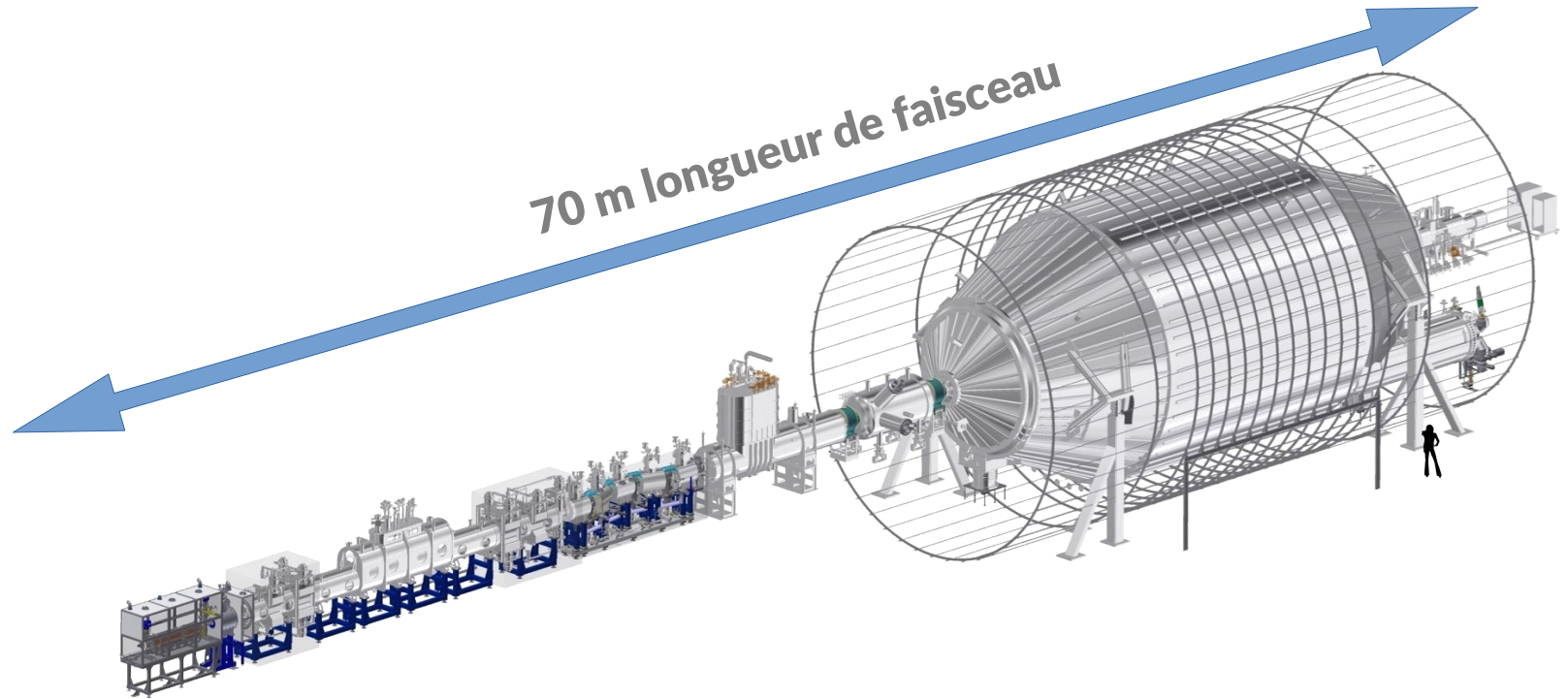
Karlsruhe TRitium Neutrino Experiment : KATRIN



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



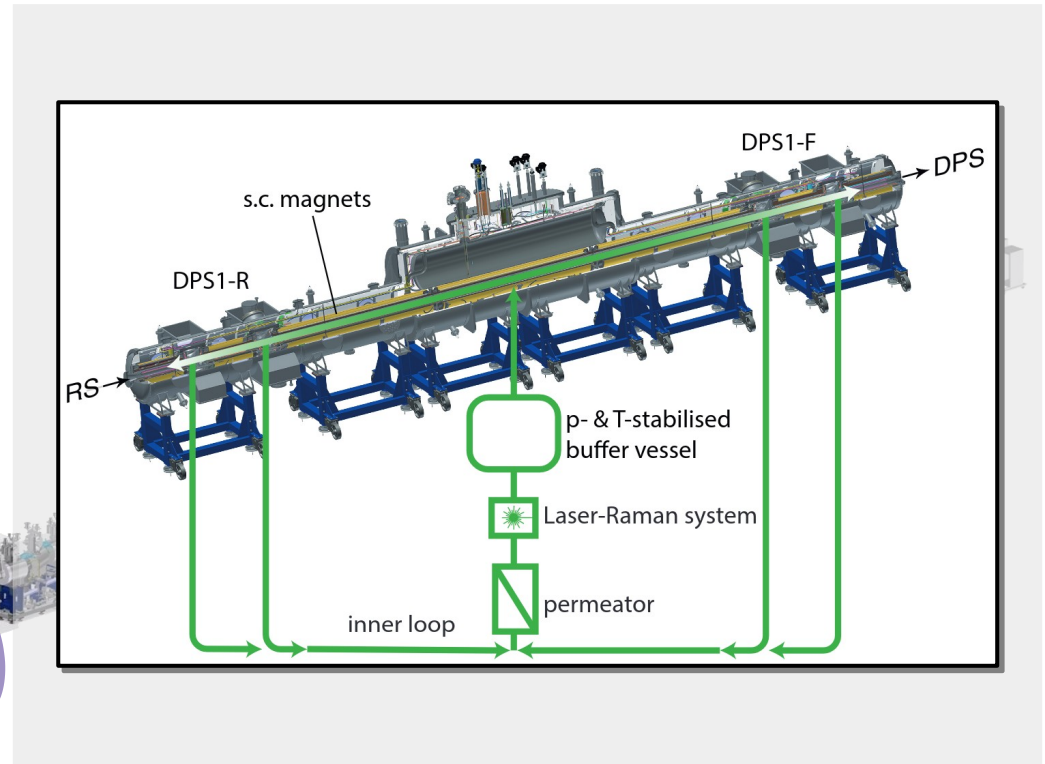
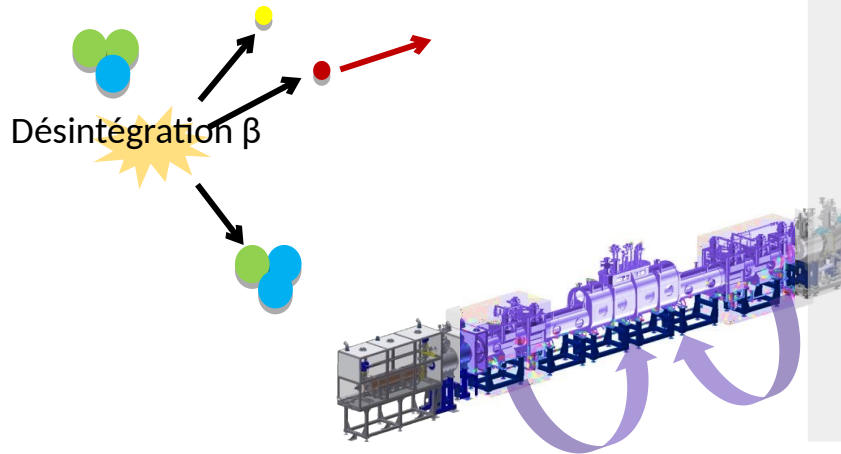
Fonctionnement de KATRIN



Fonctionnement de KATRIN

Source de tritium gazeux libre

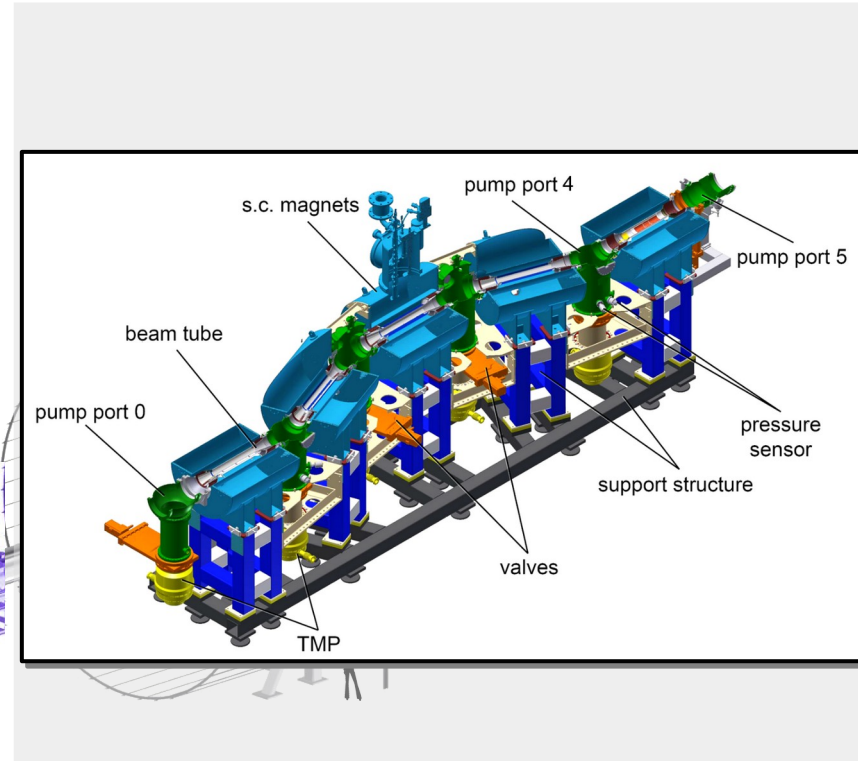
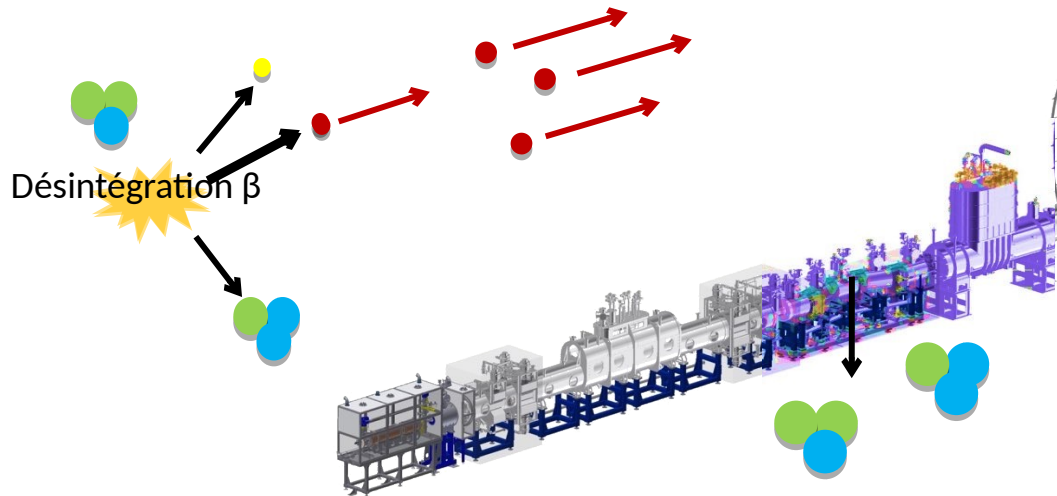
- Tritium moléculaire en circuit fermé
- 10^{11} désintégration/s



Fonctionnement de KATRIN

Section de transport

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

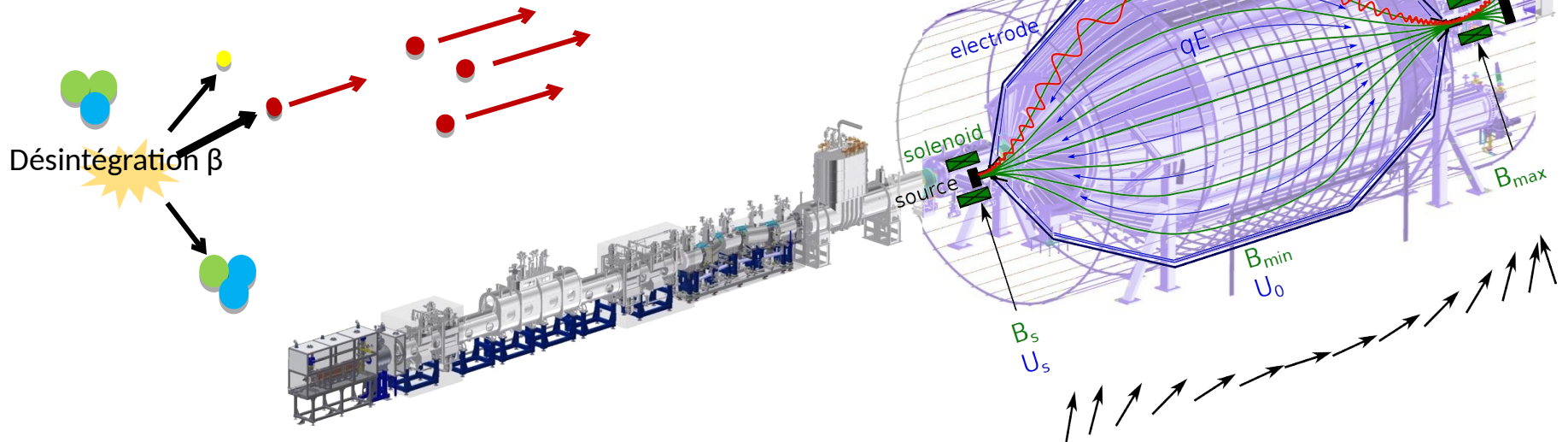


Fonctionnement de KATRIN

Section spectrométrique

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

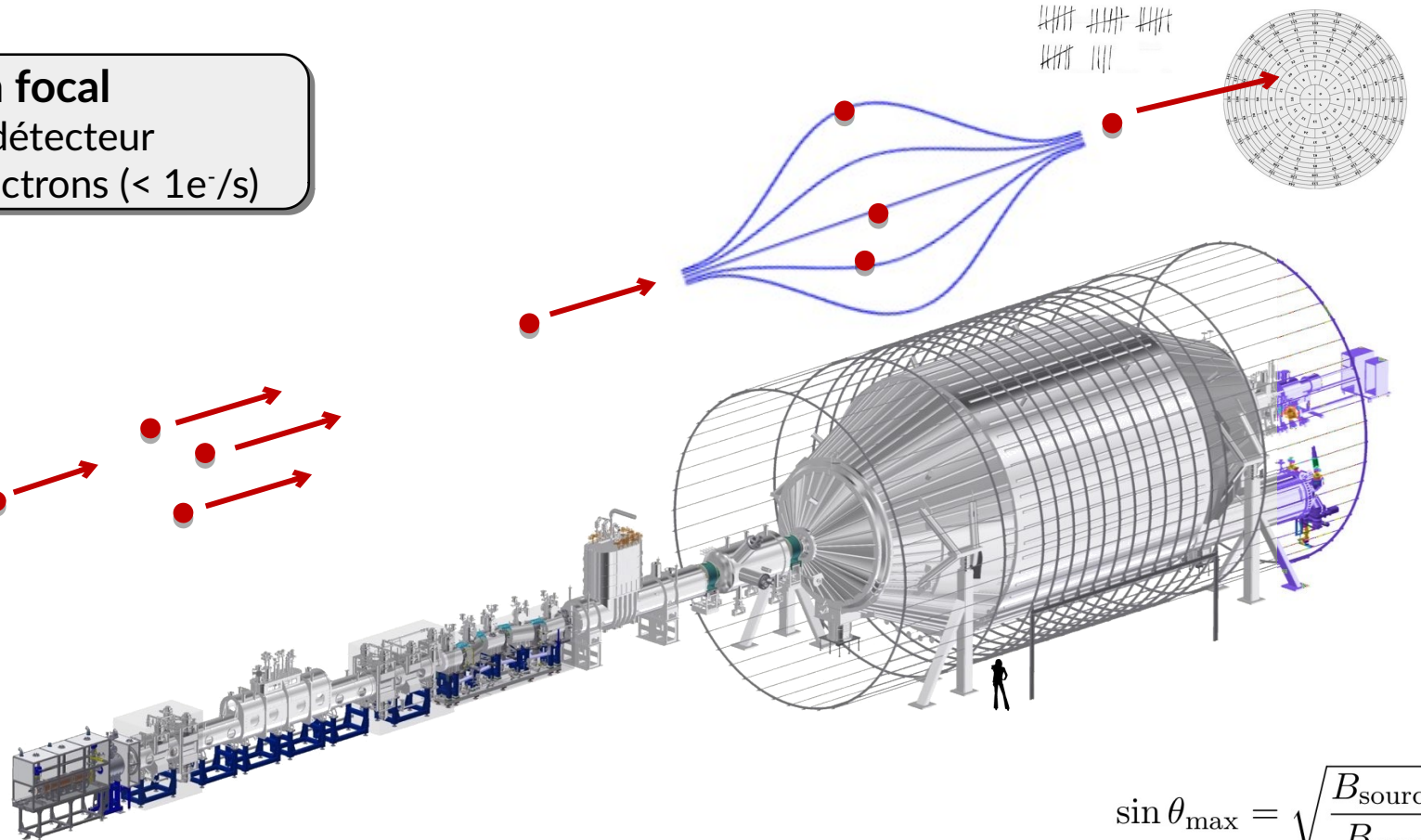
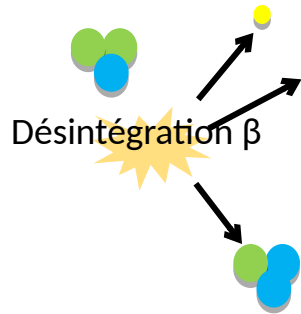
$$\Delta E = E \cdot \frac{B_{\min}}{B_{\max}}$$



Fonctionnement de KATRIN

Detecteur au plan focal

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

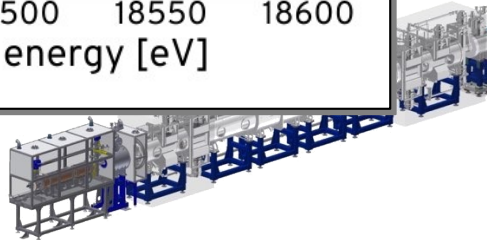
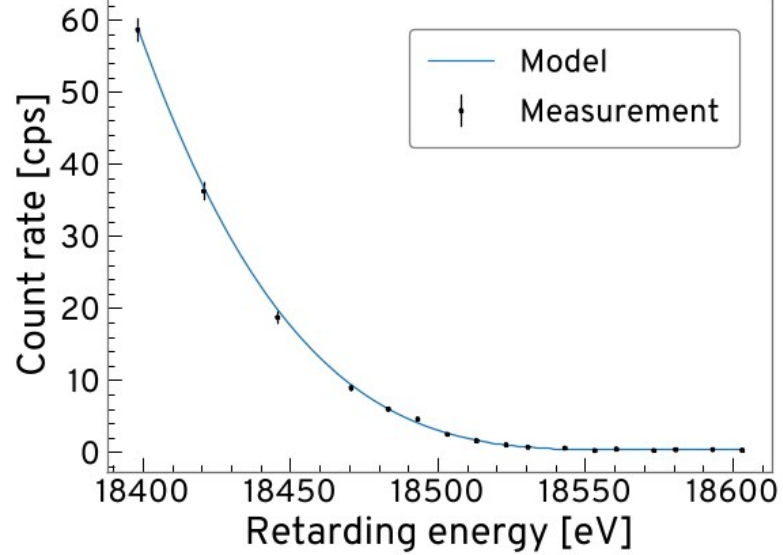


$$\sin \theta_{\max} = \sqrt{\frac{B_{\text{source}}}{B_{\max}}}$$

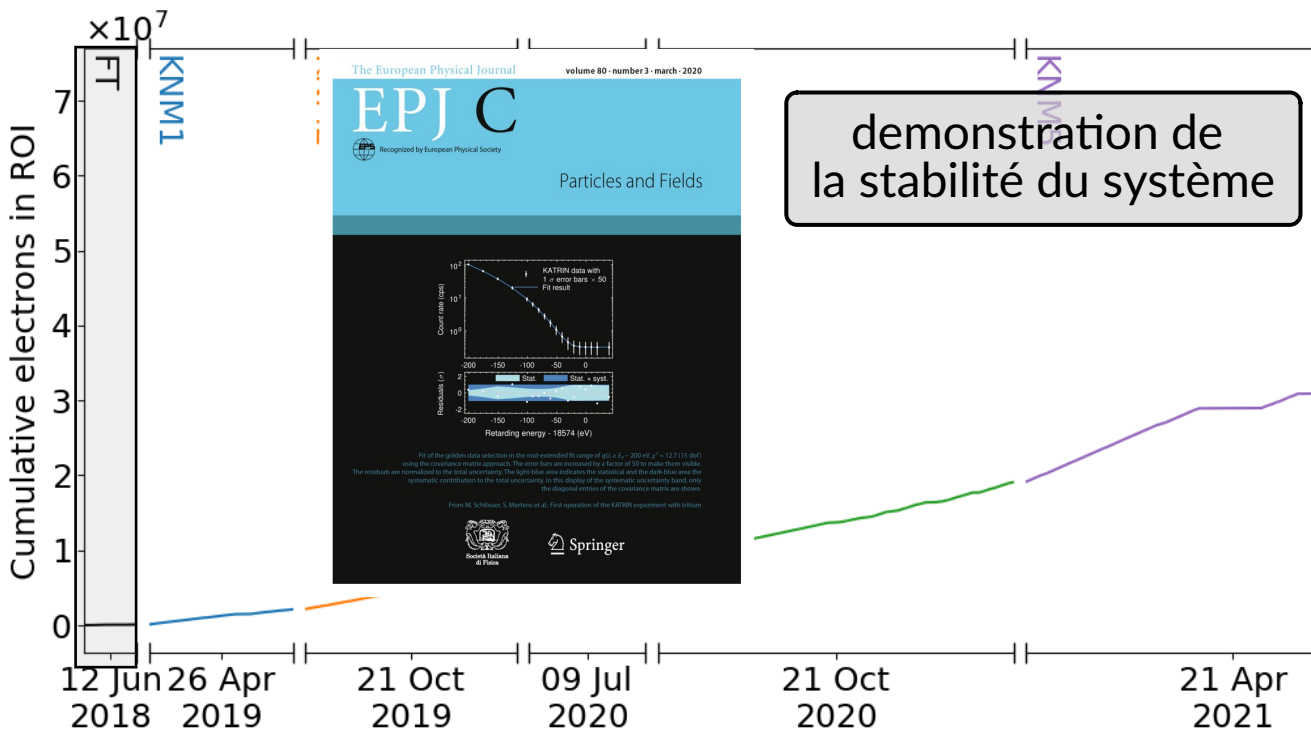
Fonctionnement de KATRIN

Detecteur au plan focal

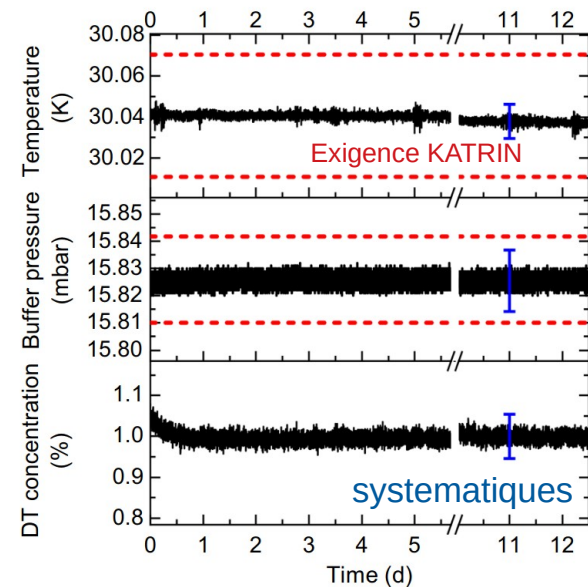
- 149 pixel Si-PIN détecteur



Campagne de rodage tritium

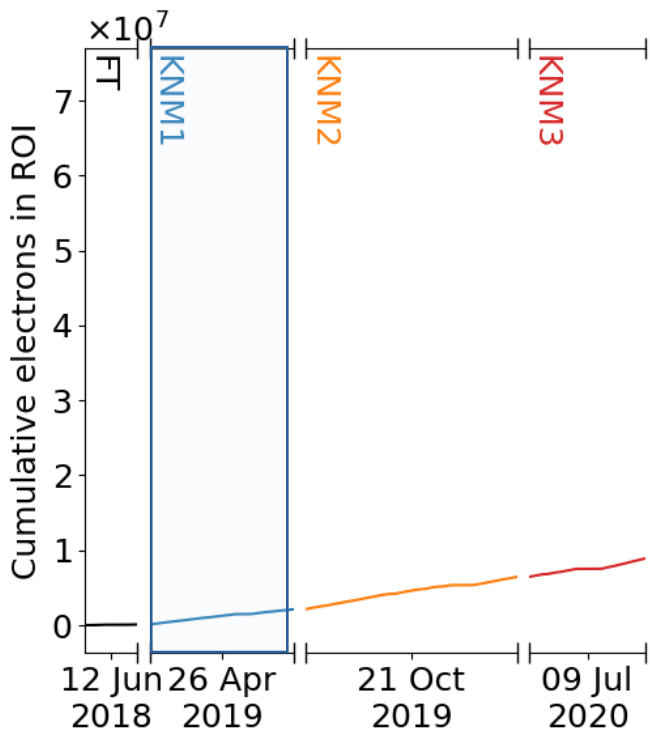


demonstration de la stabilité du système



- First operation of the KATRIN experiment with tritium. *Eur. Phys. J. C* 80, 264 (2020)

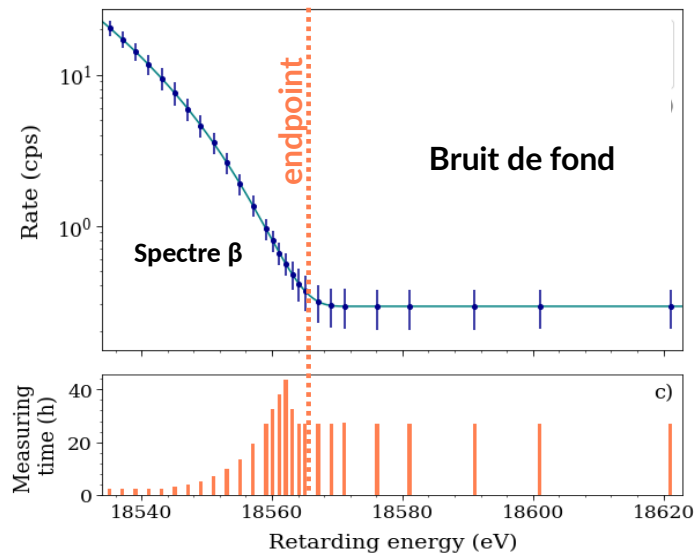
1st neutrino mass campaign



Neutrino Properties PDG !

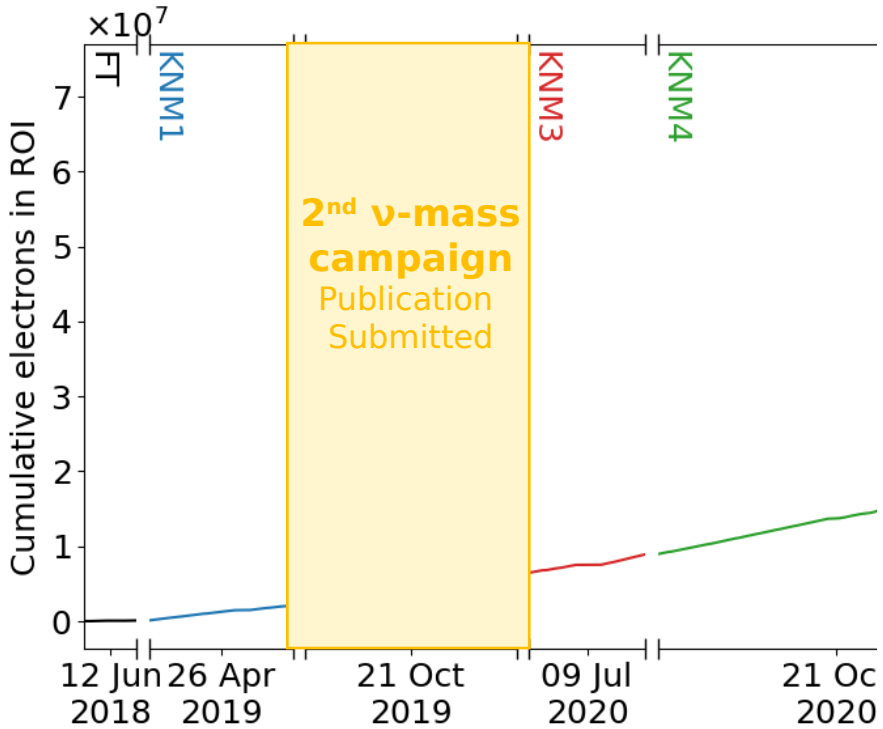
See the note on "Neutrino properties listings" in the Particle Mass $m < 1.1$ eV, CL = 90% (tritium decay) 2020 2021

- Durée campagne: **22 jours**
- Densité gaz: **22%**
- Pureté isotop.: **97.5% tritium**
- Activité source: **$2.45 \cdot 10^{10}$ Bq**
- Statistique: **$2 \cdot 10^6$ e's**

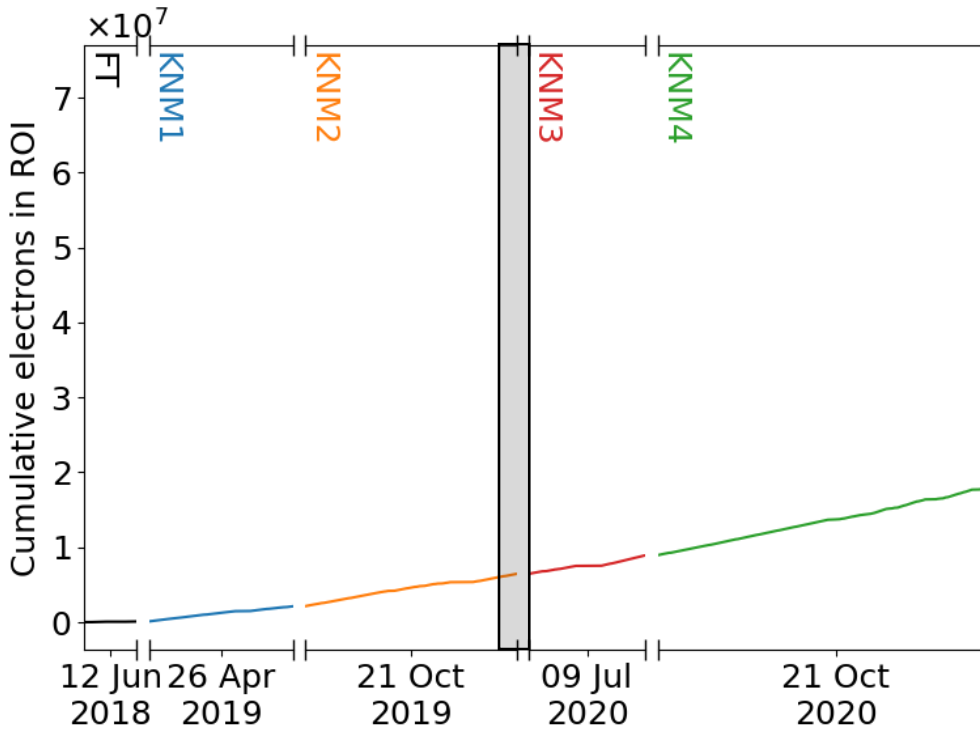


- Improved Upper Limit on the Neutrino Mass from a Direct Kinematic Method by KATRIN, KATRIN Collaboration, **Phys. Rev. Lett.** 123, 221802 (2019)

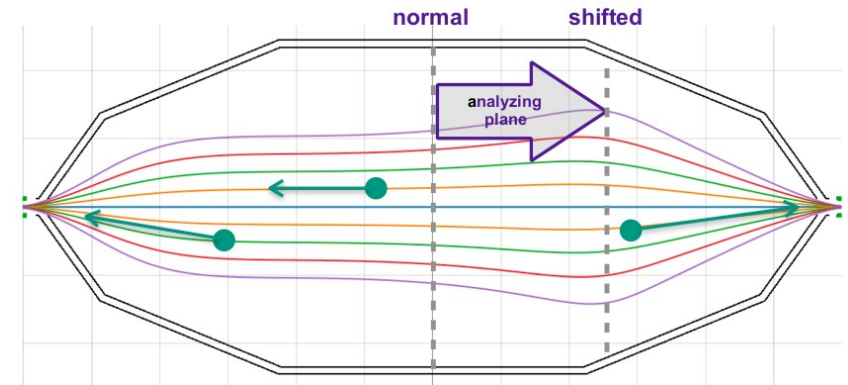
2nd neutrino mass campaign



Campagne de maintenance



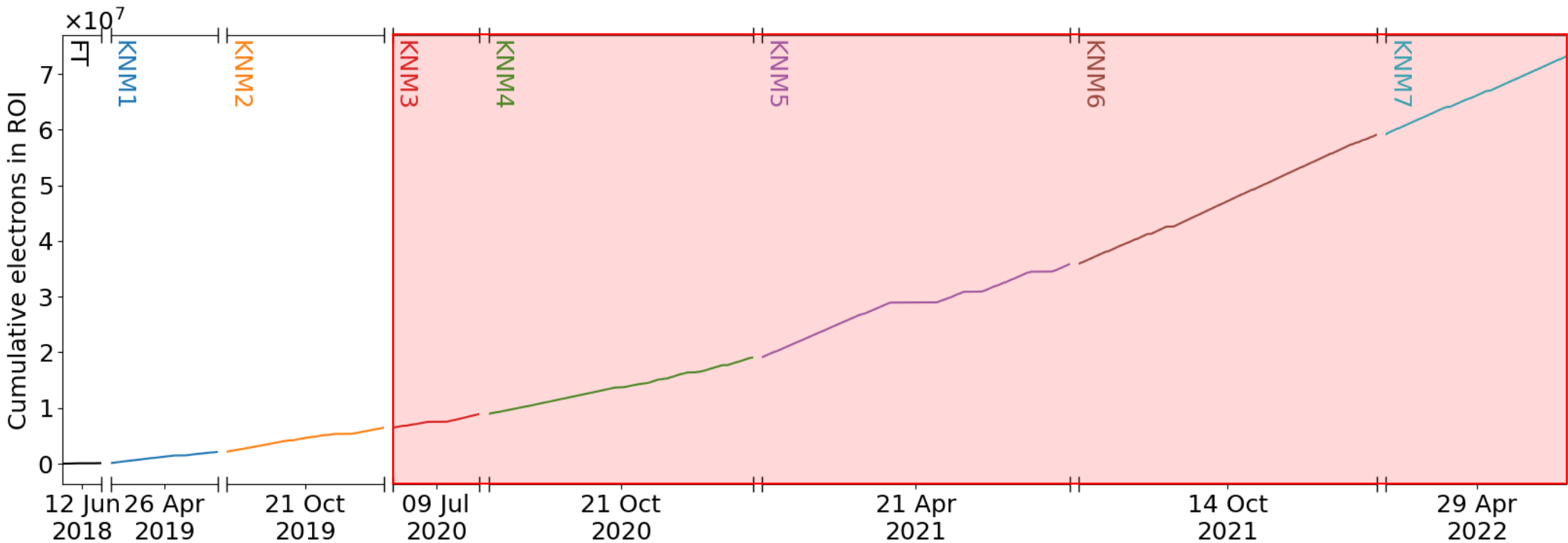
- Etude du plasma
- Amélioration de la configuration magnétique pour diminution du bruit de fond



M.Slezak et al. *J. Phys. G* 47 065002 (2020)

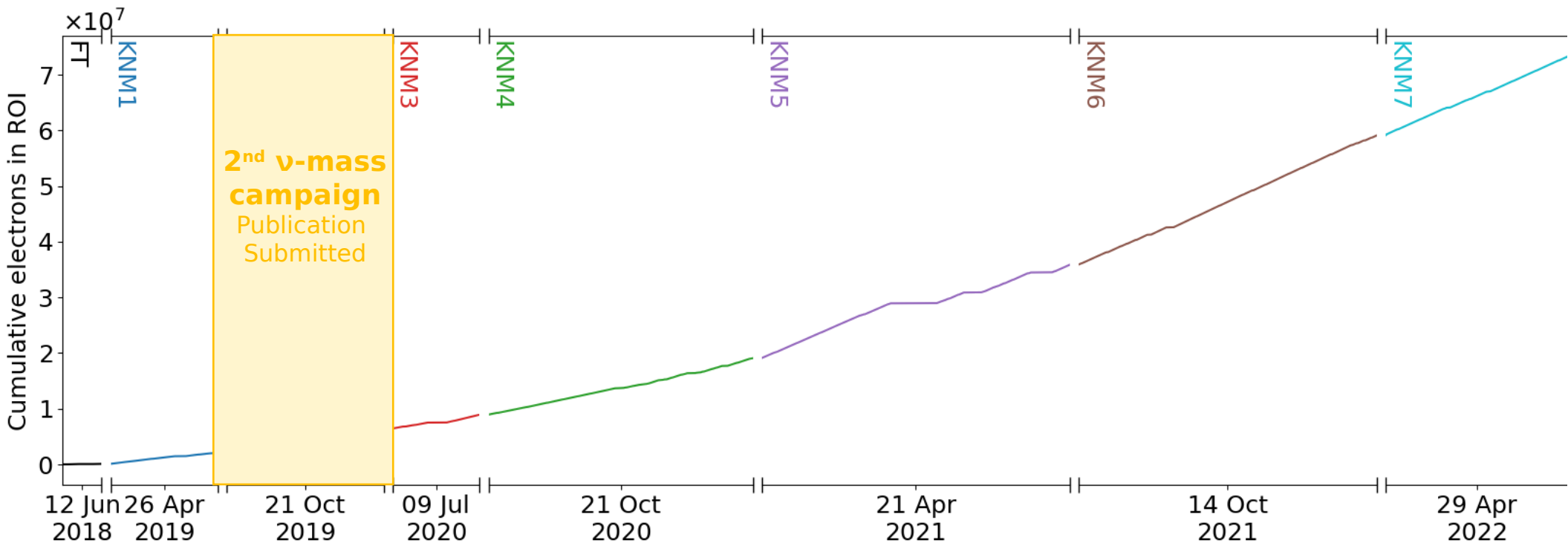
F. Fränkle, A.Schaller et al., *arxiv* :2011.05107v1

2nd neutrino mass campaign



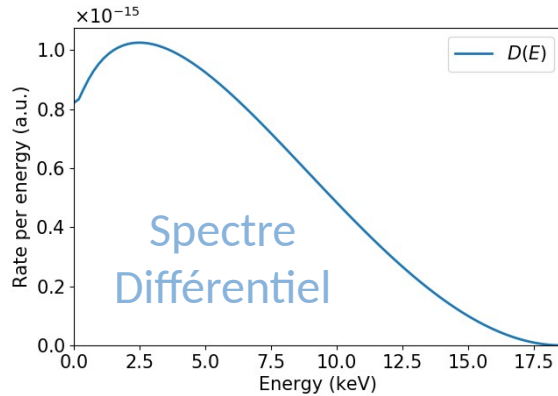
Prise de données depuis été 2020 :
→ 1000 jours \leftrightarrow < 0.3 eV (90 % CL)

2nd neutrino mass campaign



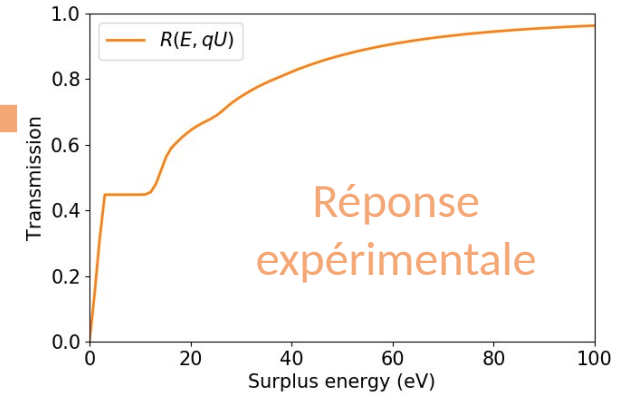
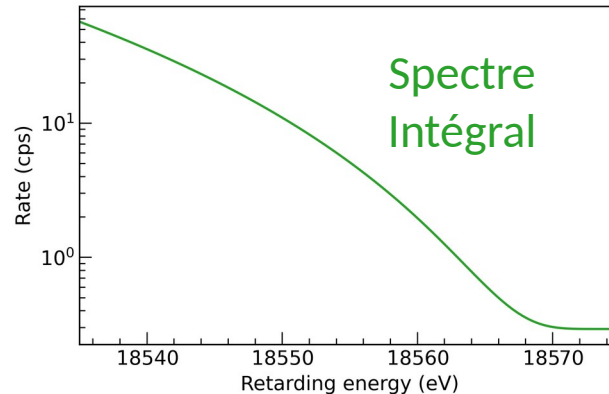
→ **Dernière publication**
Première opération de KATRIN à l'activité nominale
Seconde limite sur la masse du neutrino

Modèle



- Théorie de Fermi
- Etats finaux moléculaires
- Elargissement Doppler
- Corrections radiatives
- ...

$$\Gamma(qU) \propto \mathbf{A} \cdot \int_{qU}^{E_0} D(E; m_\nu^2, E_0) \cdot R(qU, E) dE + \mathbf{B}$$



- Résolution spectromètre
- Diffusion dans la source
- Rayonnement synchrotron
- ...

Analysis methods for the first KATRIN neutrino-mass measurement Phys. Rev. D 104, 012005 (2021)

Analyse

Freeze analysis on fake data

- Generate MC-copy of each scan

m_{ν}^2

true data

m_{ν}^2

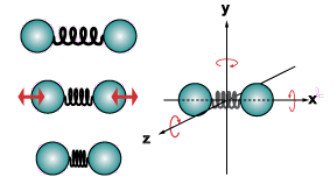
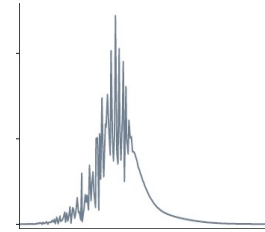
MC copy



m_{ν}^2

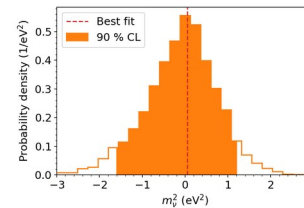
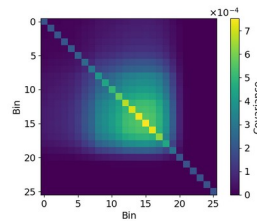
Blinded model

- Modified molecular FSD
- Shift neutrino mass only



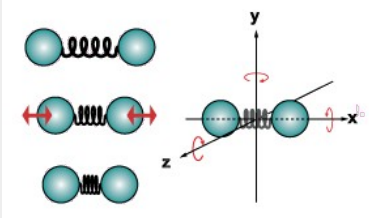
Independent analysis strategies

- Cov. matrix, MC prop, Pull-terms, Bayes



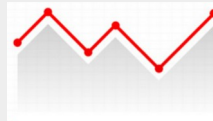
Erreurs systématiques

Etats finaux moléculaires



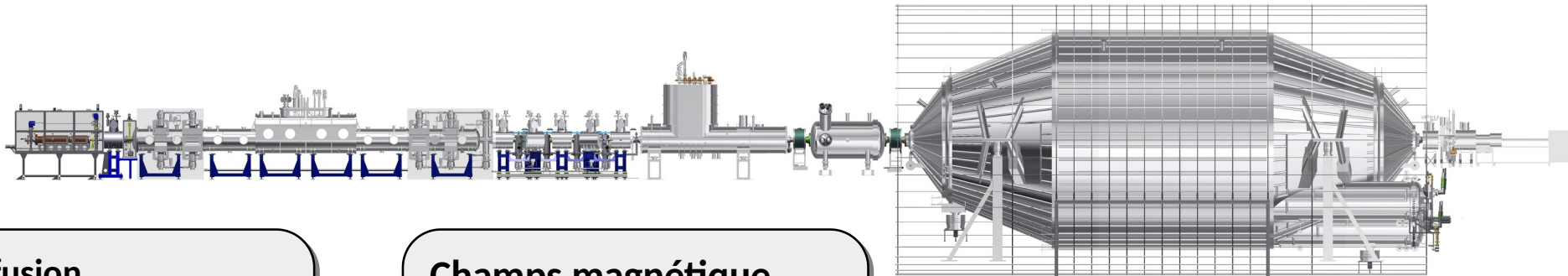
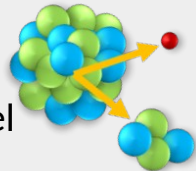
Variation d'activité

Challenge: $< 0,1 \%$



Bruit de fond:

- Corrélation temporelle
- Dépendance au potentiel électrostatique
- Challenge: $< 0,1$ cps



Diffusion

- Perte d'énergie
- Densité colonne



Champs magnétique

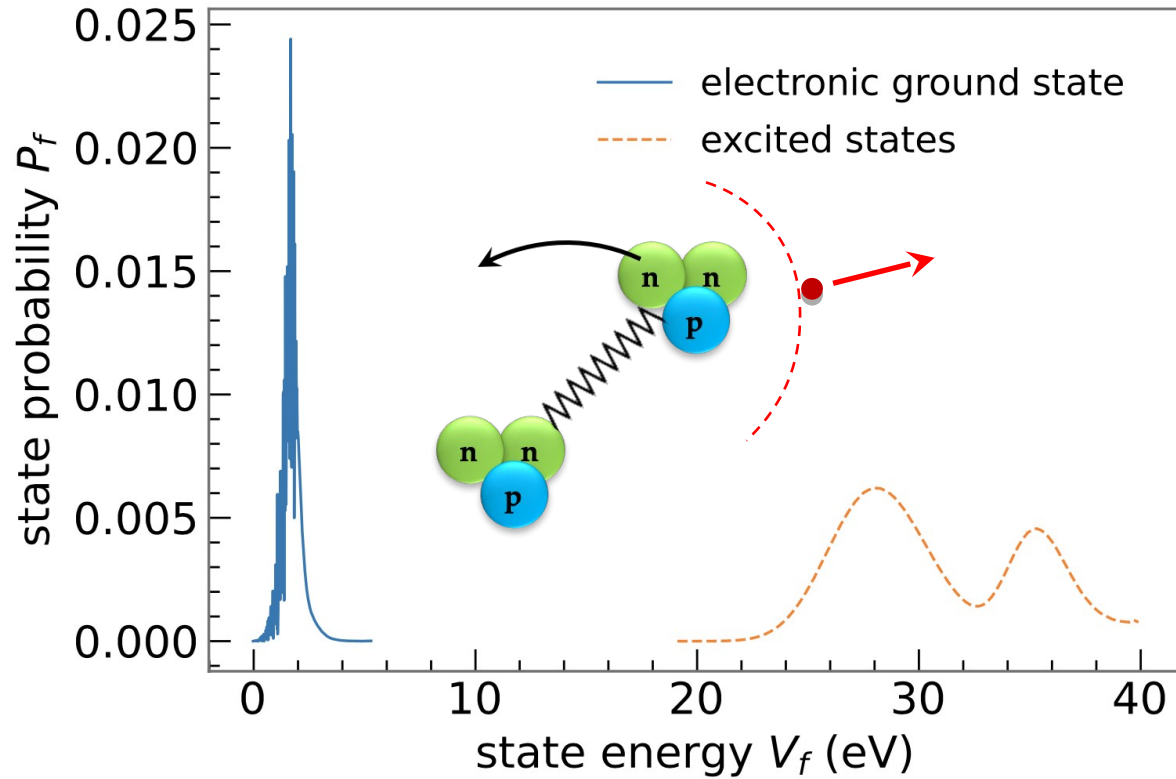
- source
- spectromètre
- détecteur



Combiner les données



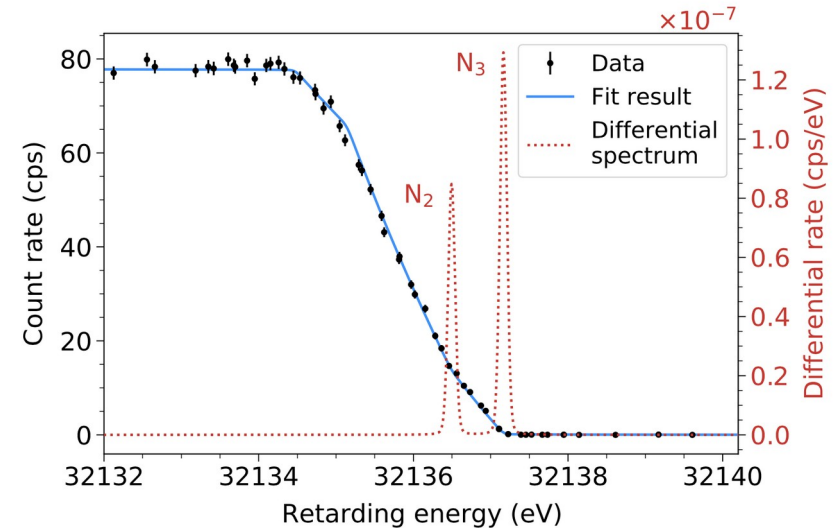
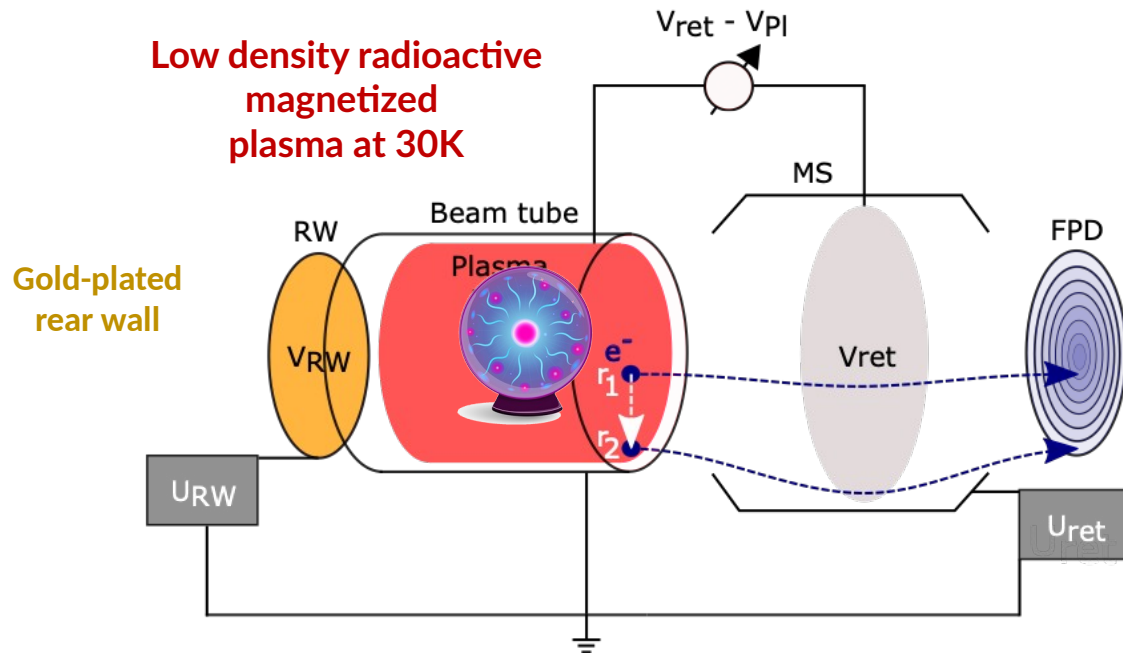
Théorie



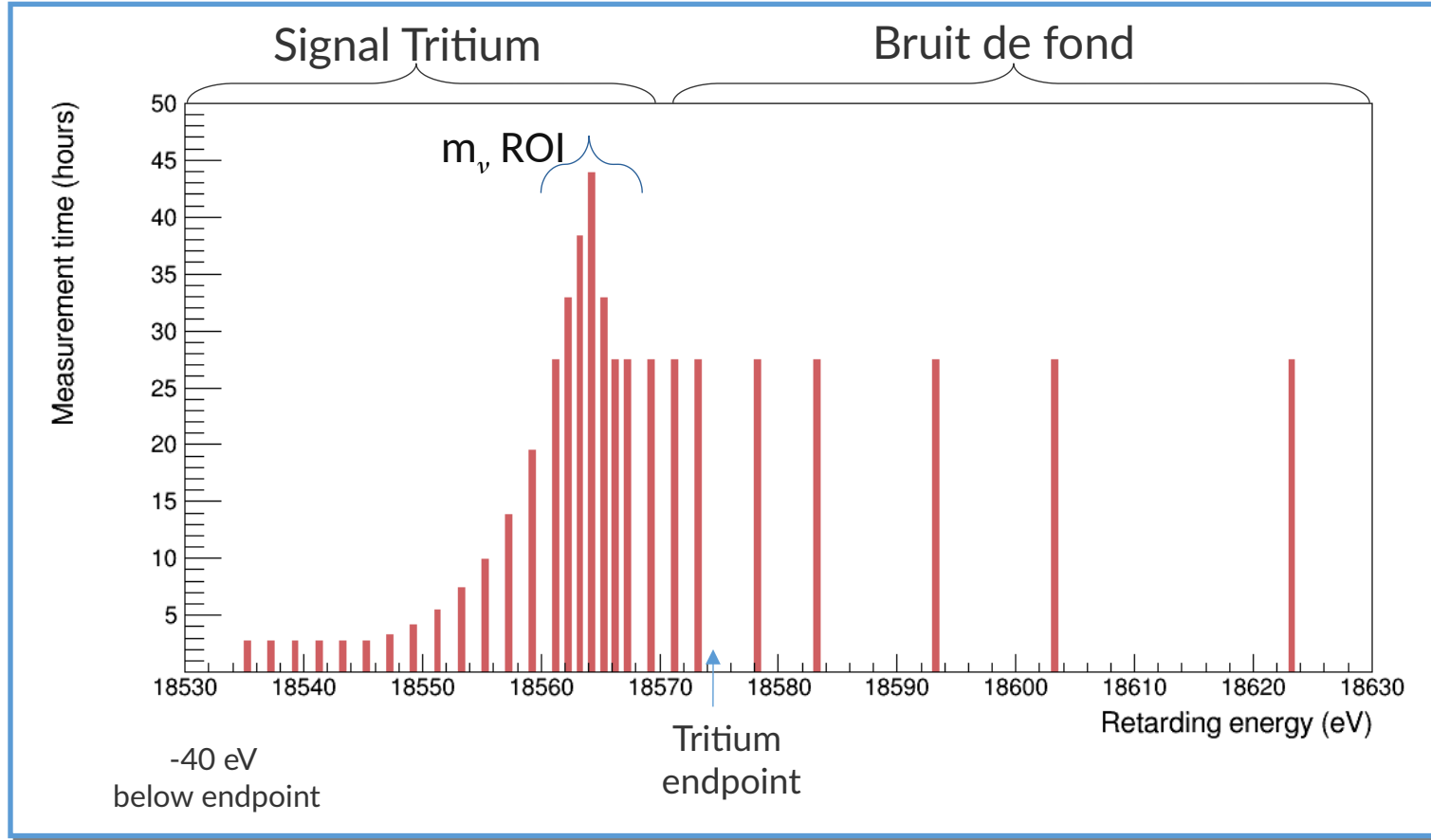
- ✓ l'électron et le tritium moléculaire partagent l'énergie disponible dans la réaction
- ✓ Calcul précis des états moléculaires accessibles à la fin de la réaction (repos et excités)
A. Saenz et al, Phys. Rev. Lett. 84, 242 (2000)
+ updates
- ✓ Implique un élargissement du spectre en énergie
- ✓ Pas une limitation pour KATRIN

Plasma froid

- Spectroscopie à travers un seuil électrostatique $\rightarrow qU_{\text{spectrometer}}(V_{\text{ret}}) - qU_{\text{source}}(V_{\text{pi}})$
- L'échelle absolue en énergie n'affecte pas les résultats (endpoint free fit parameter)
- Etalonnage grâce à l'injection de $^{83\text{m}}\text{Kr}$ gazeux dans la source. Mesure des pics monoénergétiques émis depuis la source à différentes énergies. Analyse par anneaux pour dépendance radiale.



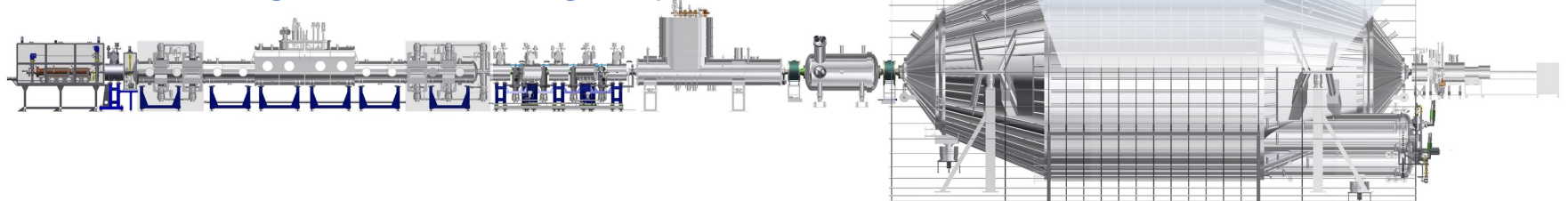
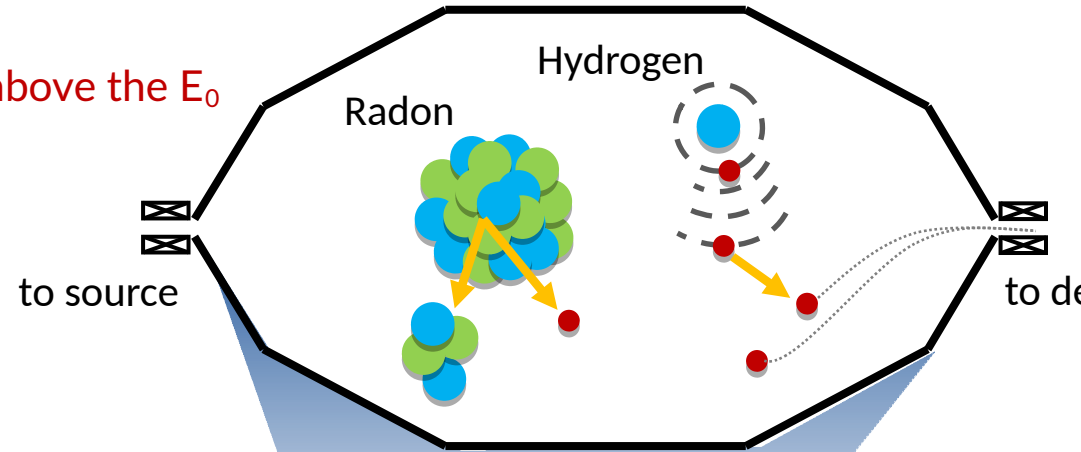
Stratégie de scan



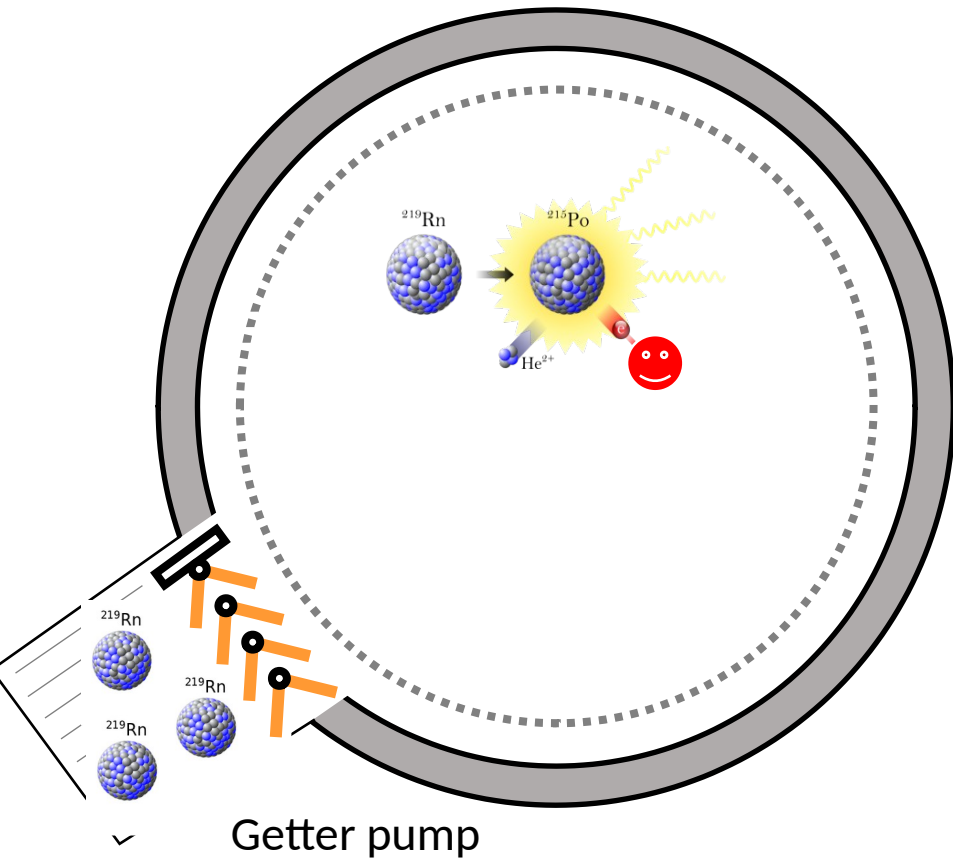
X 361 β -scans


Caractérisation du BdF

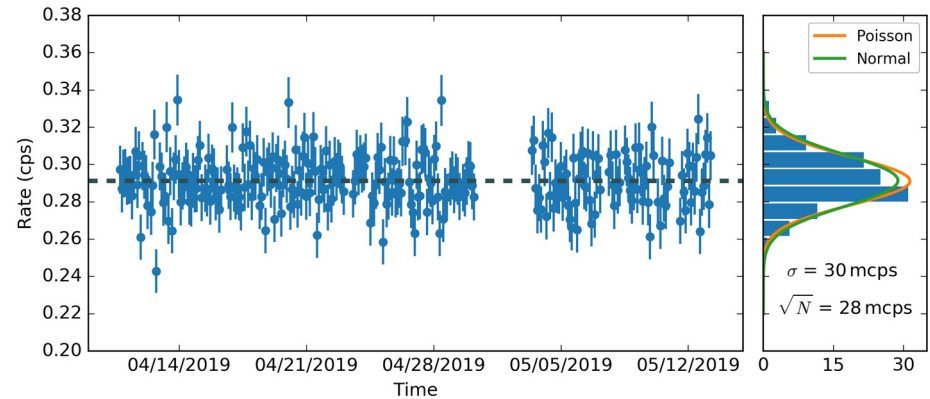
- Low energy electrons produced & trapped in the spectrometer are guided toward the focal plane detector
- **In-situ measurement: 25% of measurement time above the E_0**
- Main backgrounds come from the spectrometer, scaling thus with:
 - inner surface: 650m^2
 - volume: 1400m^3
- Concerns: 😞
 - Precise determination of background rate
 - Check / limit background retarding-potential dependence (background qU -slope)
 - Check / limit background sub-scan length dependence



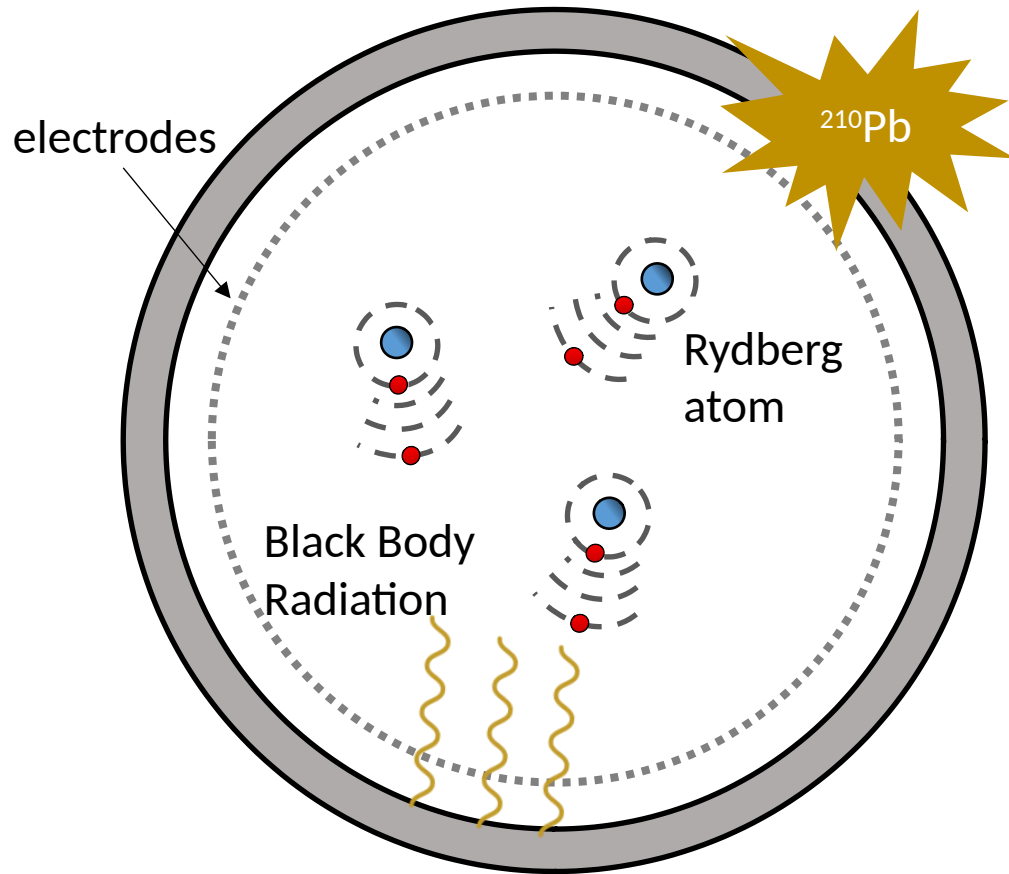
BdF Radon-induit



- NEG pumps radon emanation
- α -decays of single ^{219}Rn atoms (3.96 s)
- Low energy e^- emission inside spectrometer
- Effective reduction via nitrogen-cooled baffle system
- 10% Non-Poissonian rate over-dispersion 

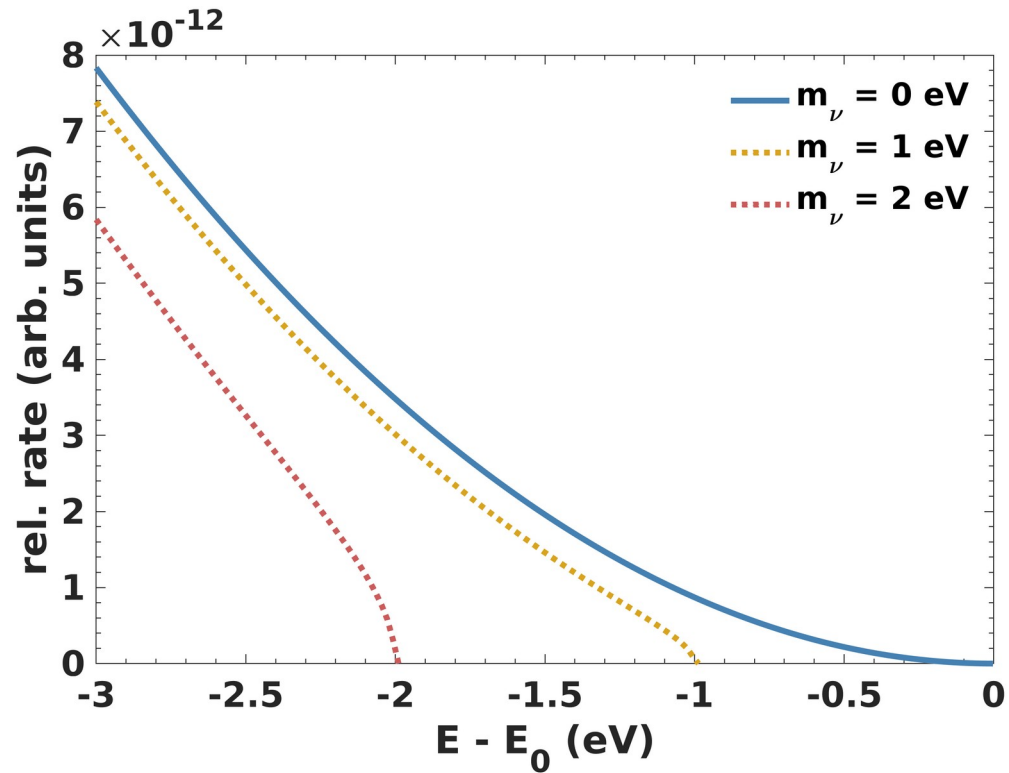


Atomes neutres excités



- Radon exposition during construction
→ ^{210}Pb surface contamination
- Rydberg atoms sputtered off from the spectrometer surfaces by ^{210}Pb α -decays
- Ionisation by thermal radiation
- Low energy e- emission inside spectrometer
- Scale as the spectrometer volume...

Extraire un signal



Extraire un signal

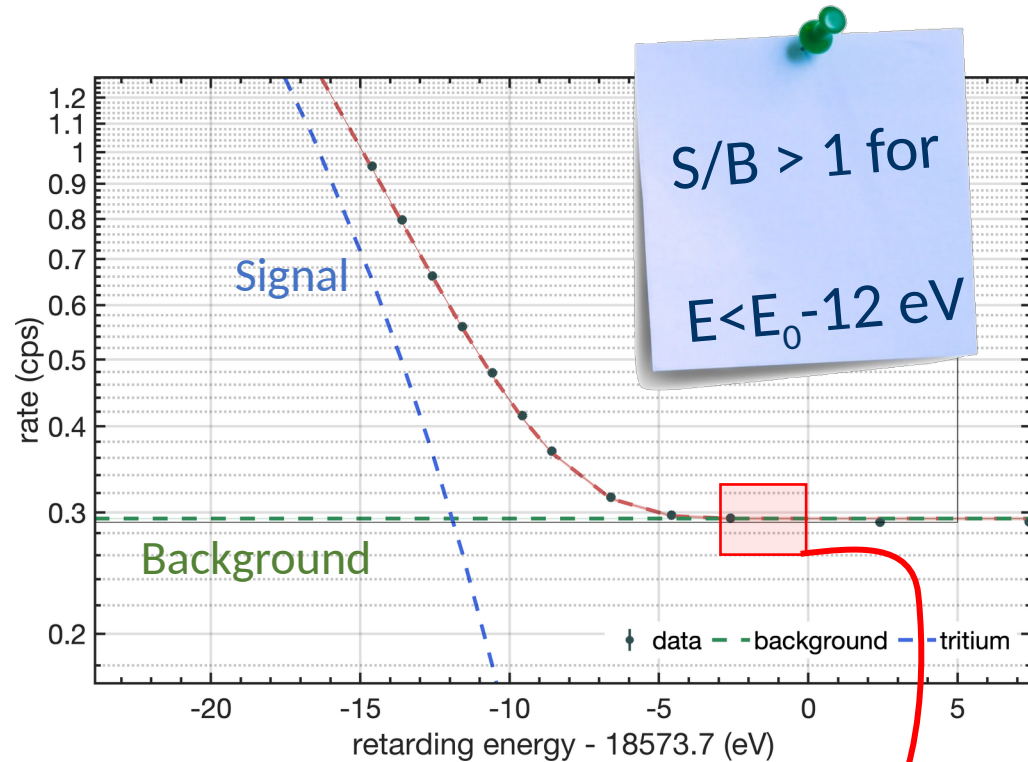
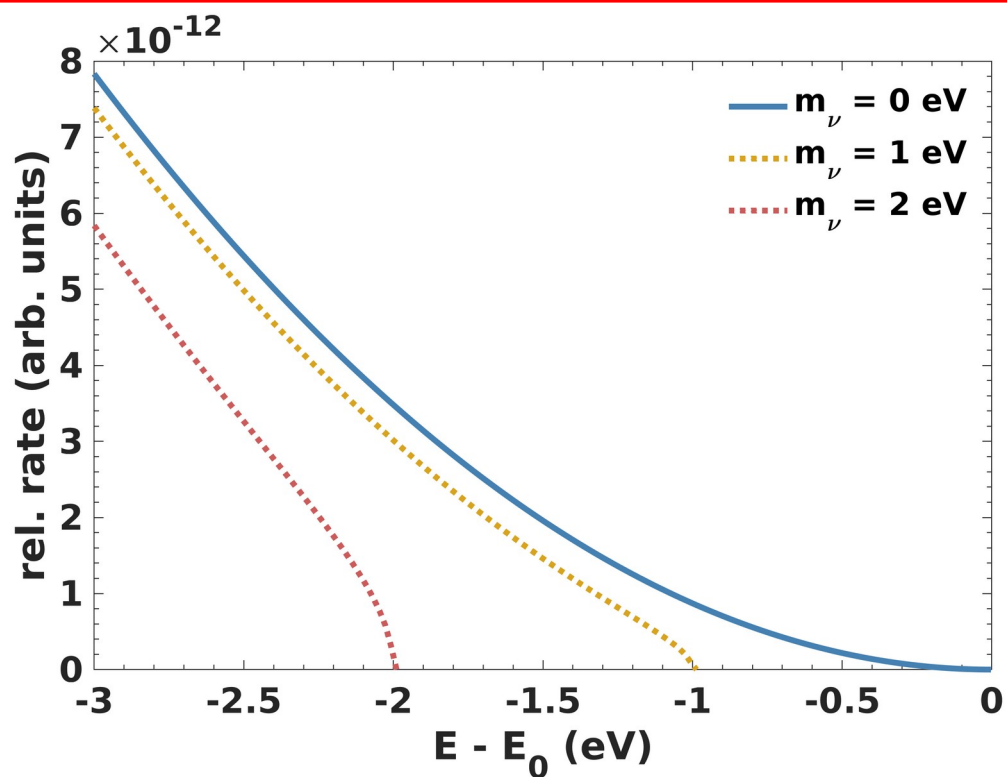


Illustration using 1st neutrino mass campaign

Extraire un signal

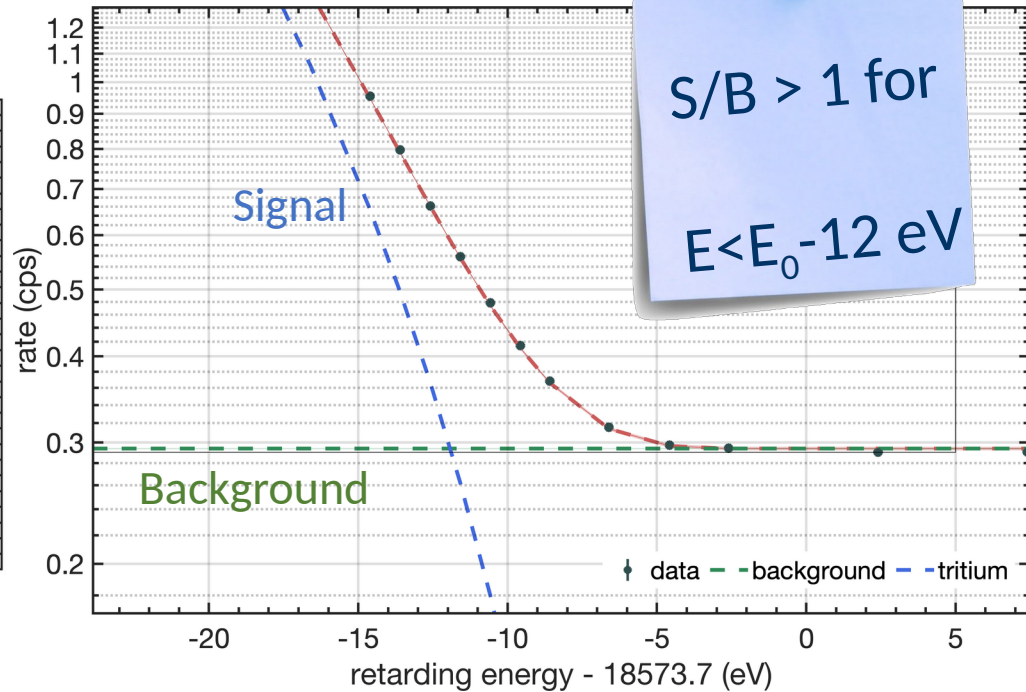
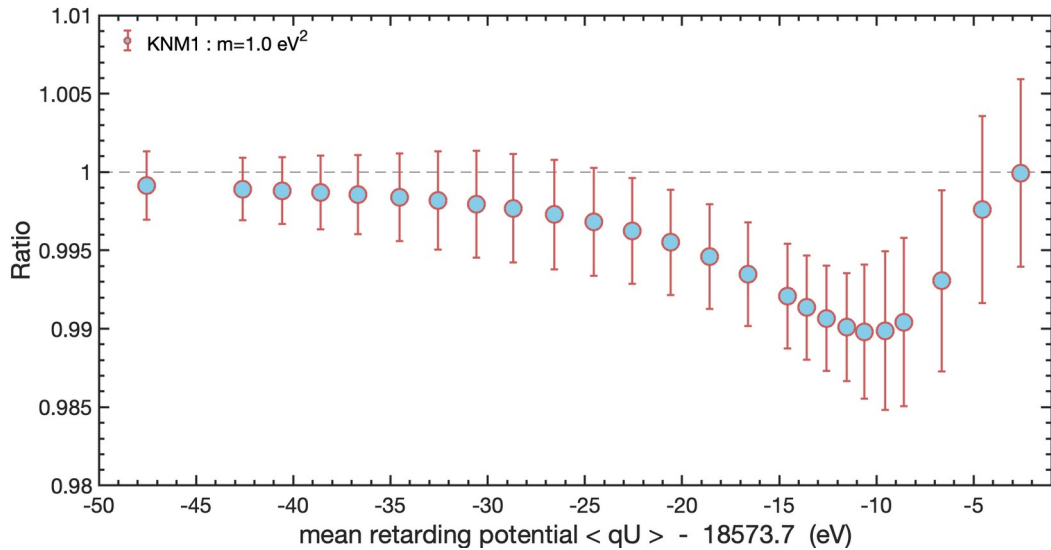


Illustration using 1st
neutrino mass
campaign

Extraire un signal

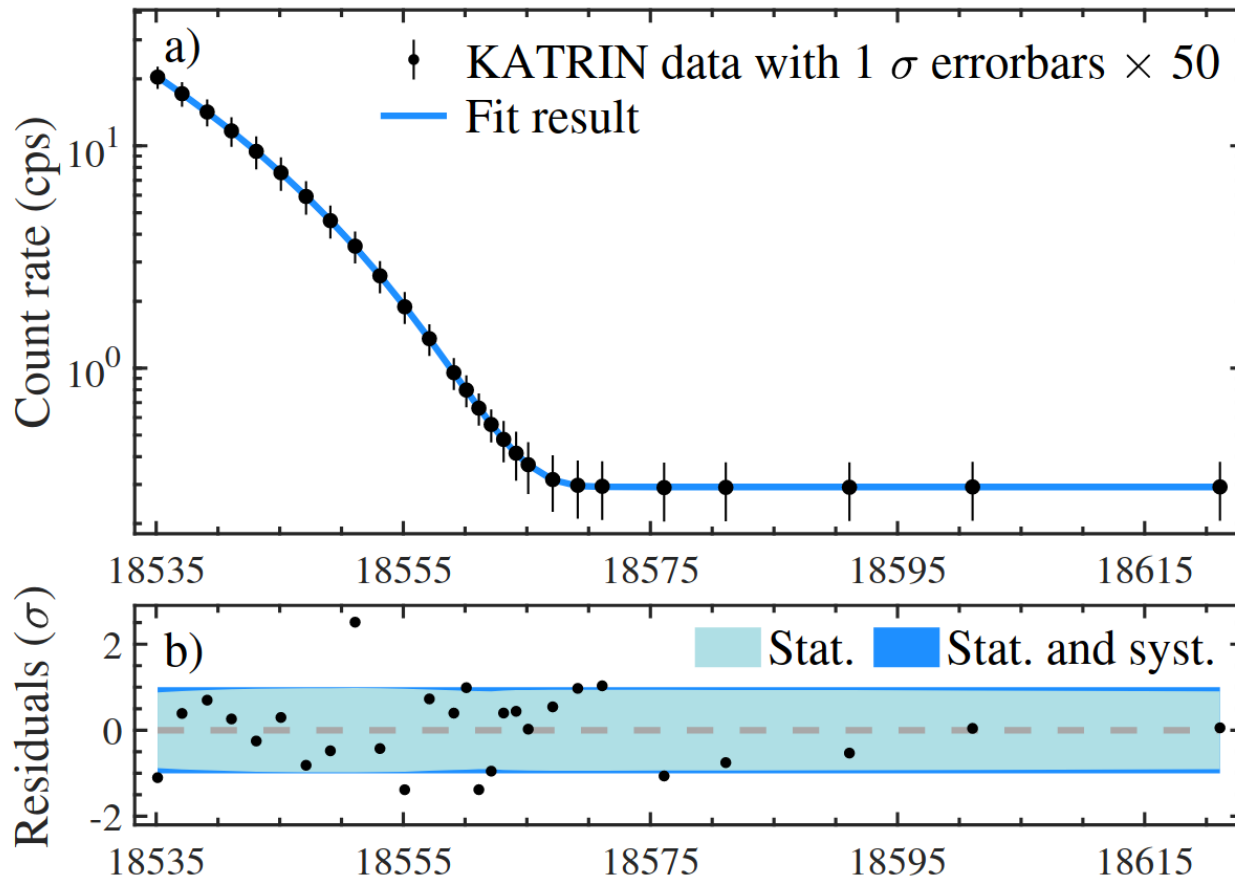
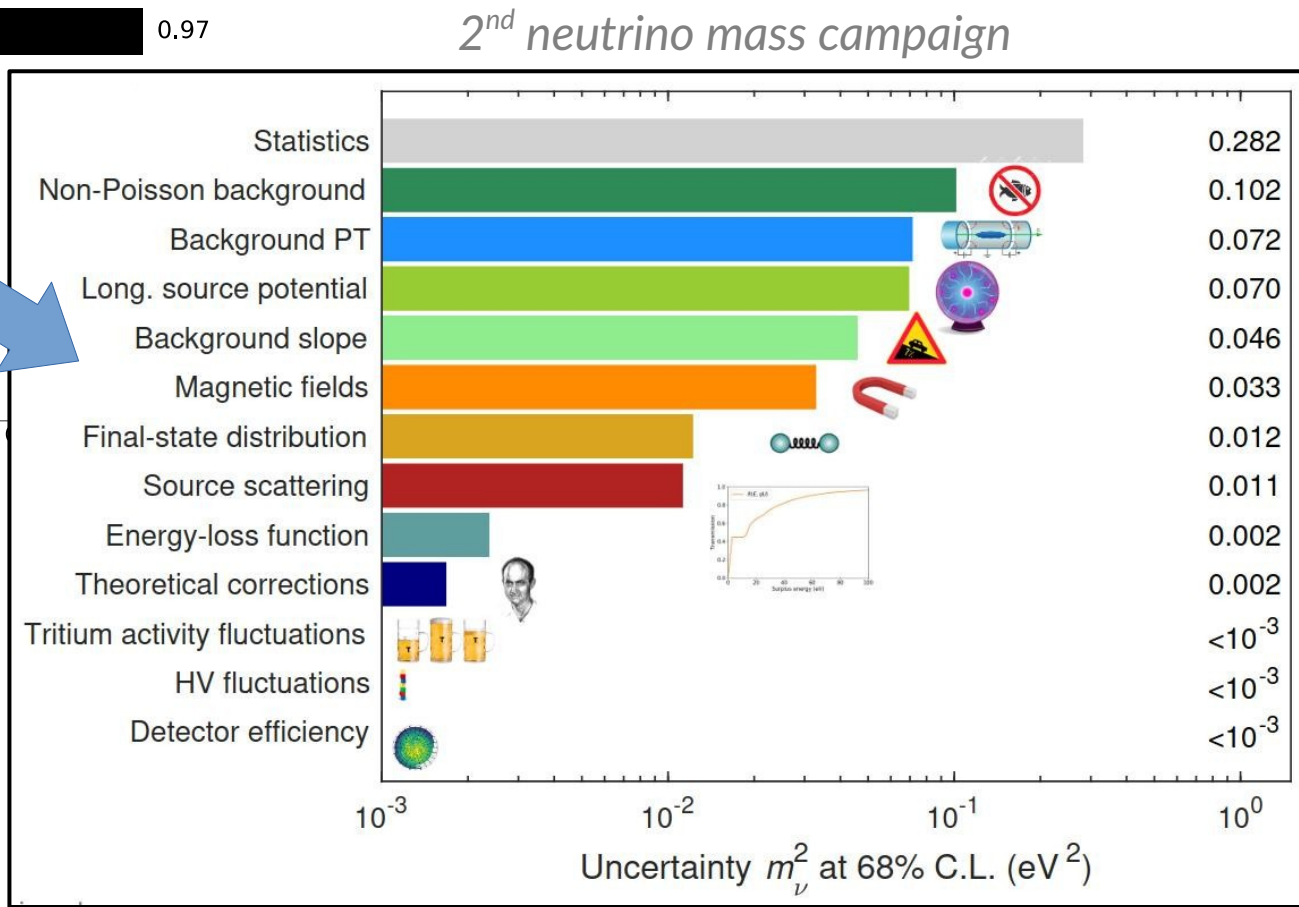
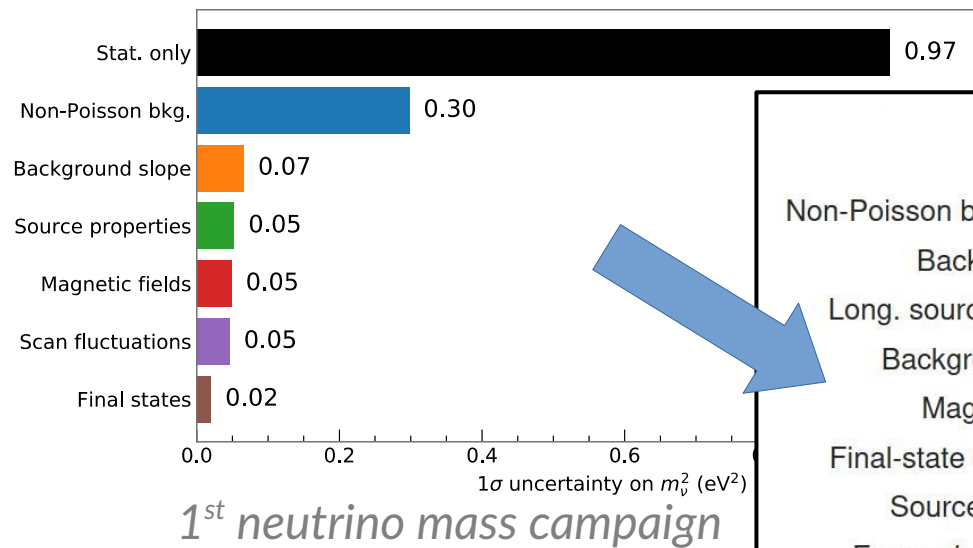
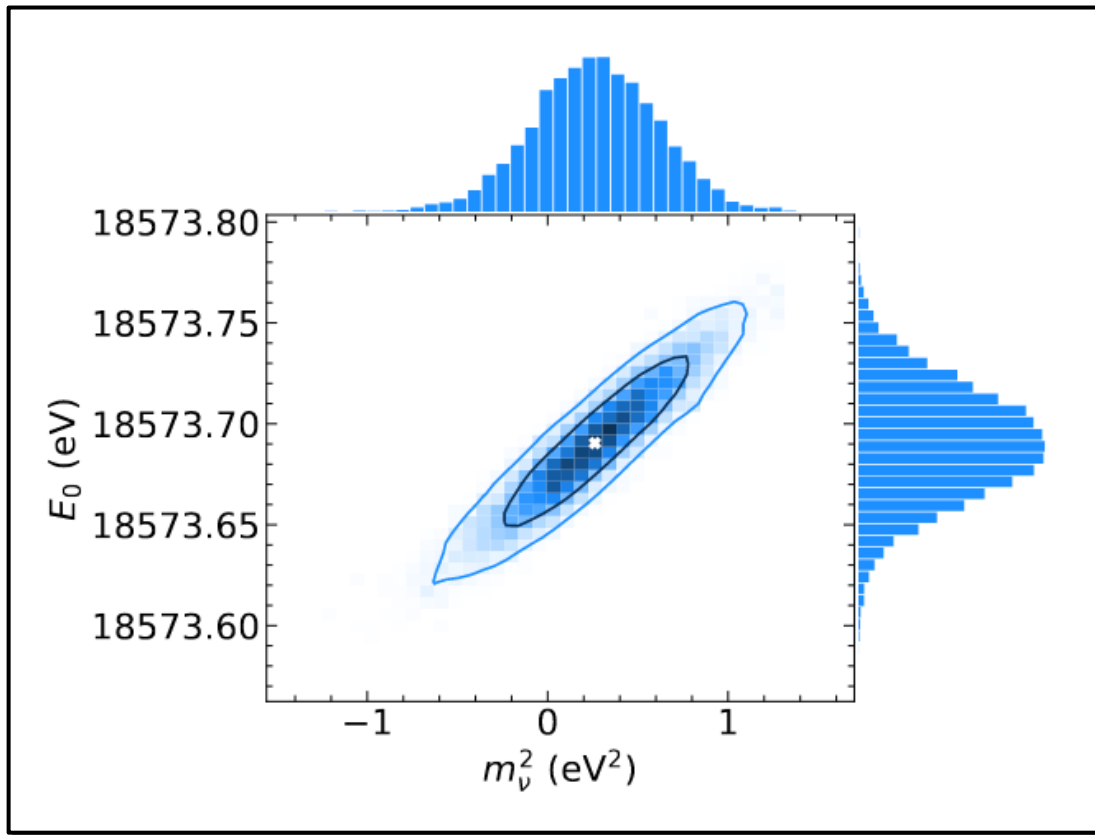


Illustration using 1st neutrino mass campaign

Résultats



Résultats



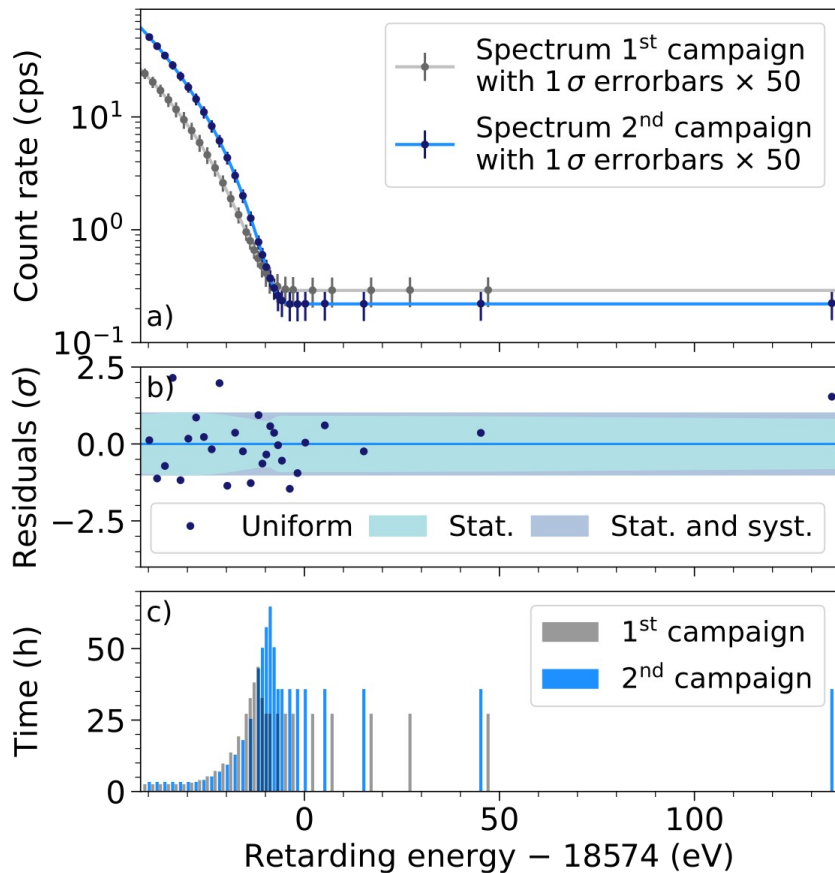
Gas density : 84 %
Sensitivity : $m_\nu < 0.7 \text{ eV (90\% CL)}$
Electrons in ROI : $4.2 \cdot 10^6$
Scan time : 31 days

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{stat}} &\sim 0.28 \text{ eV}^2 \\ \sigma_{\text{syst}} &\sim 0.15 \text{ eV}^2 \\ \sigma_{\text{tot}} &\sim 0.35 \text{ eV}^2\end{aligned}$$

Results:

$$\begin{aligned}m_\nu^2 &= 0.26 \pm 0.35 \text{ eV}^2 \\ m_\nu &< 0.9 \text{ eV (90\% CL)}\end{aligned}$$

Combiner KNM1 & KNM2



KNM1: 1st campaign:

- total statistics: 2 million events
- background 290 mcps
- best fit: $1.0^{+0.9}_{-1.1} \text{ eV}^2$ (stat. dom.)

KNM2: 2nd campaign:

- total statistics: 4.3 million events
- background 220 mcps
- best fit: $0.26 \pm 0.34 \text{ eV}^2$ (stat. dom.)

- Both KNM1 and KNM2 are statistically dominated
→ Treat them as independent data sets

Résumé

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

- 1st and 2nd campaign combined result:

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

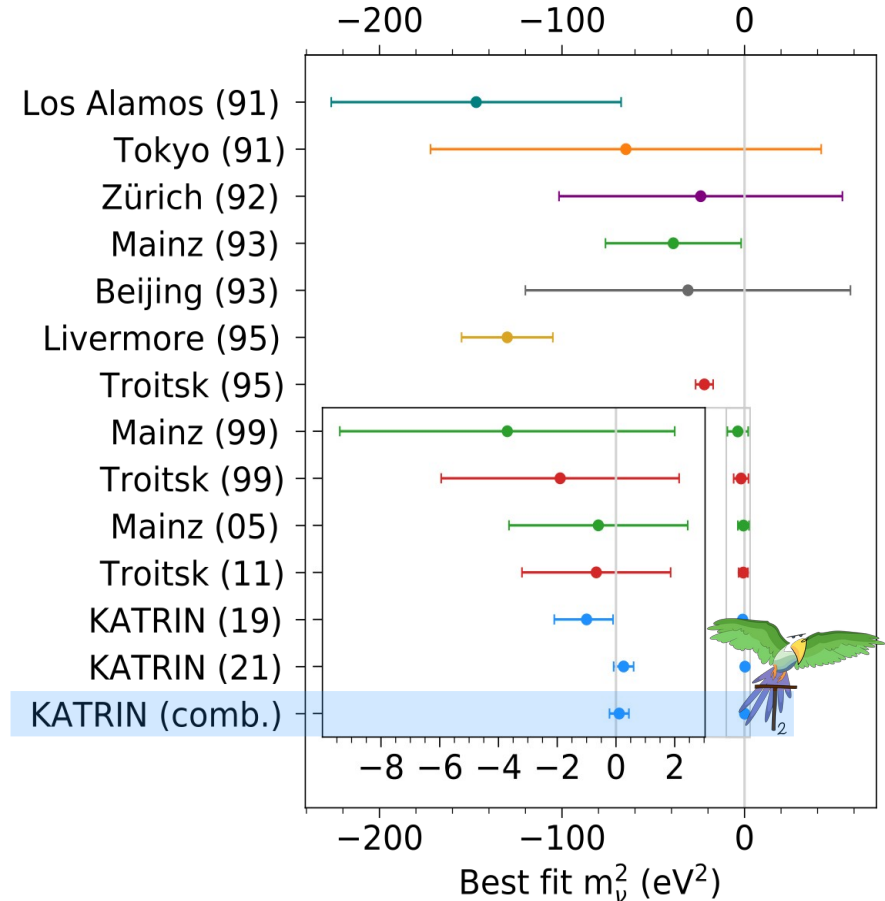
- 1st and 2nd campaign combined limit:

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

Nature Phys. 18, 160-166 (2022)

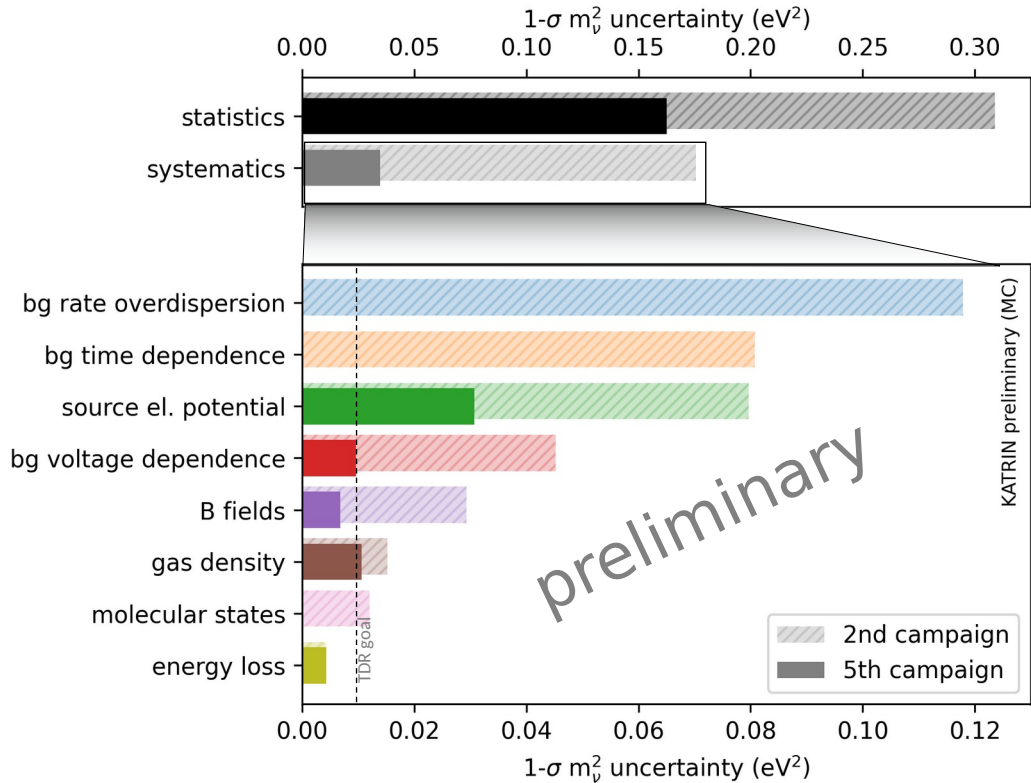
Future:

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



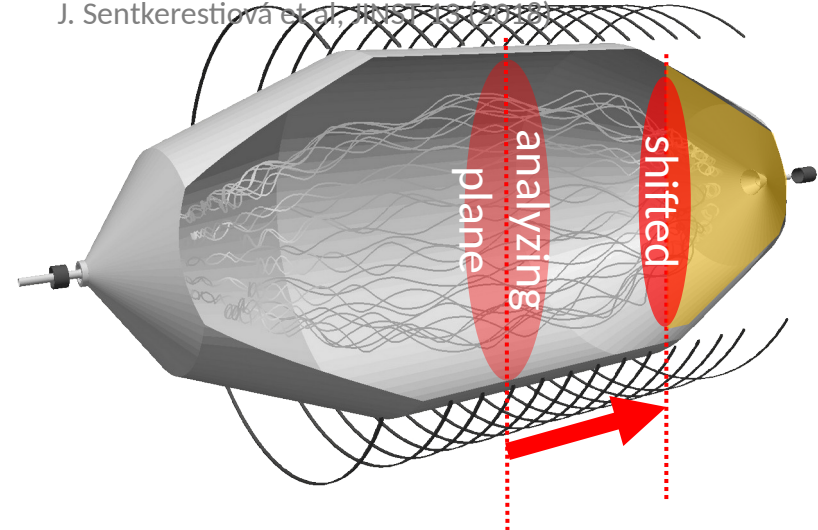
Perspectives

Masse du neutrino avec KATRIN en 2022



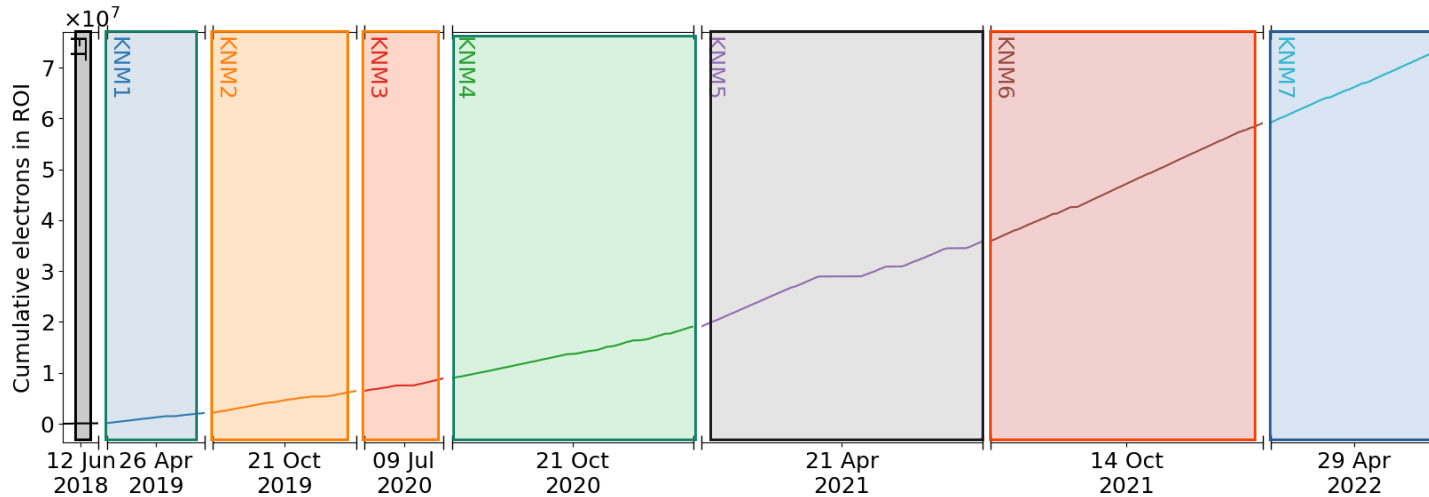
Major improvements:

- ✓ 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)



Conclusion

Masse du neutrino avec KATRIN



- 1ère campagne - rodage :
→ **très bonne stabilité**
- 1st mass campaign
→ **best limit on the m_ν** from direct measure ($m_\nu < 1.1$ eV)
- 2nd mass campaign
→ **sub-eV regime**
Nature Phys. 18, 160-166 (2022)

Other exciting perspectives:

- **eV sterile neutrinos** with unique sensitivity
- **keV sterile neutrinos** with TRISTAN project

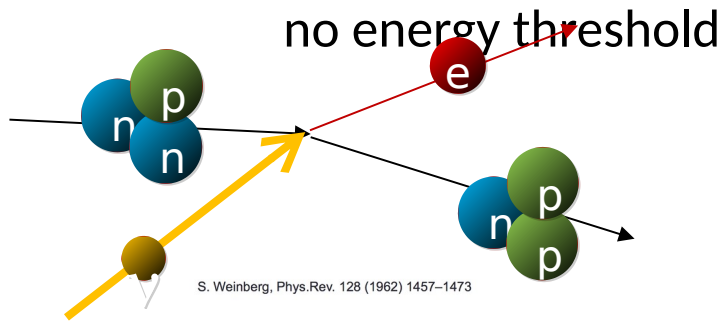
- **Next campaign:**
toward the 0.3 eV sensibility!
A lot of challenging systematics to tackle

Perspectives avec KATRIN

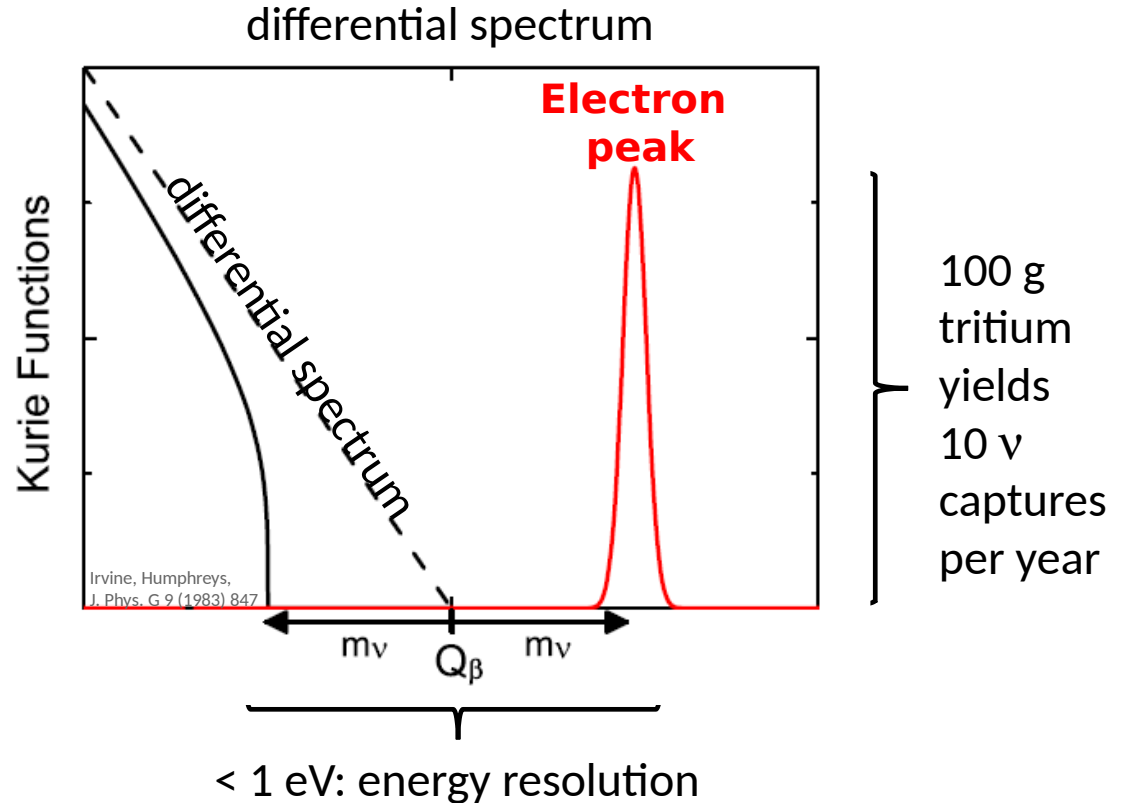
Peut-on détecter les neutrinos cosmologiques?

✓ meV relic neutrinos...

✓ neutrino capture on tritium:

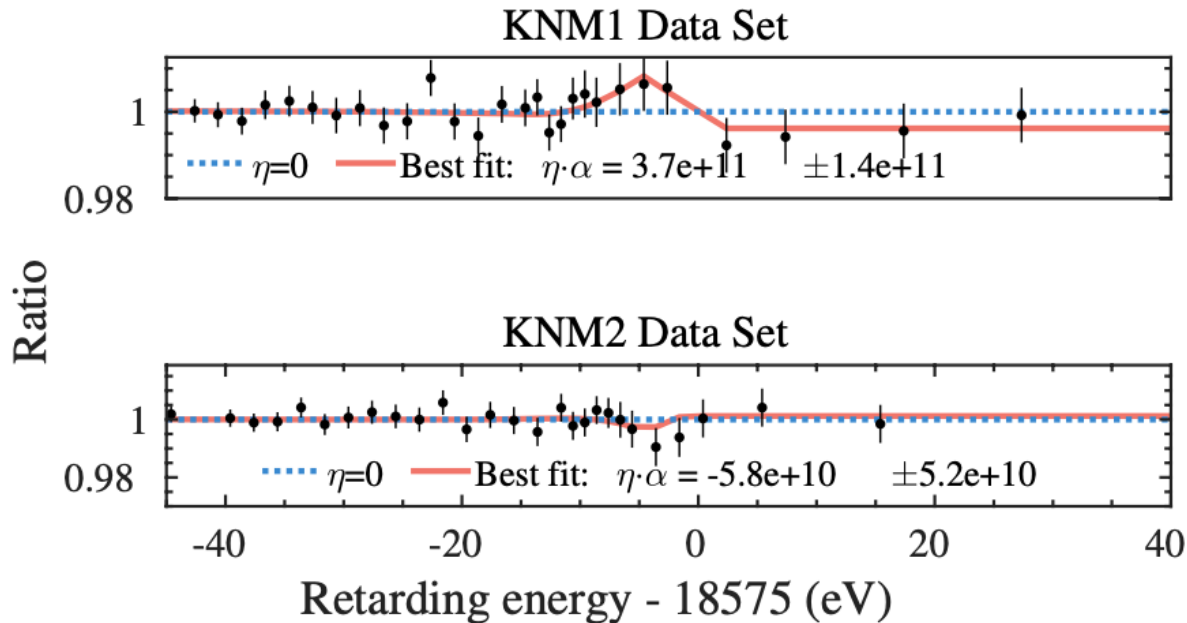


✓ electron peak right above endpoint (in the differential spectrum)



Perspectives avec KATRIN

Peut-on détecter les neutrinos cosmologiques?

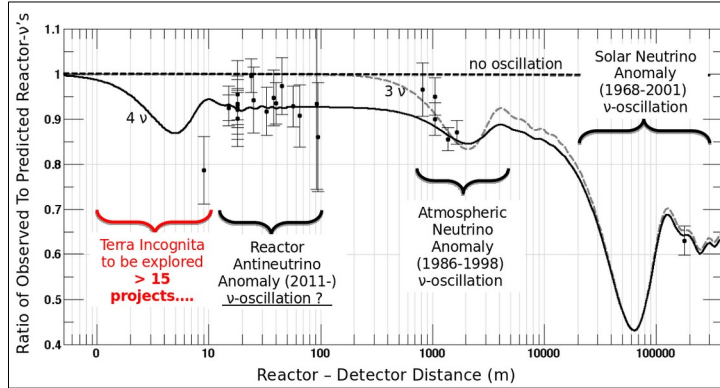


M. Aker et al. (KATRIN Collaboration) Phys. Rev. Lett. 129, 011806 (2022)

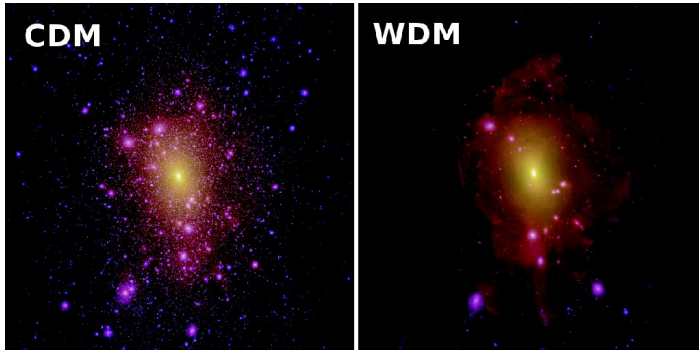
- ✓ **KNM1 2019 dataset:**
 - ✓ 522 hours
 - ✓ 3.4 μg for capture on tritium
- ✓ **KNM2 2019 dataset**
 - ✓ 744 hours
 - ✓ 13.0 μg for capture on tritium
- ✓ **no evidence for relic neutrino overdensity upper limits**

Perspectives avec KATRIN

Existe-t-il un neutrino stérile?



eV-scale:
Resolve anomalies in
oscillation experiments

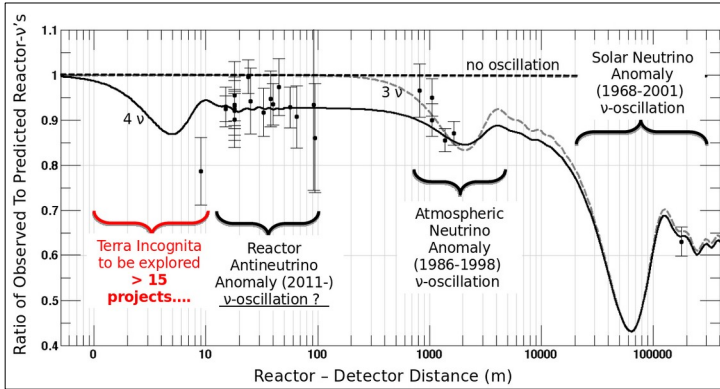


keV-scale:
Dark Matter candidate

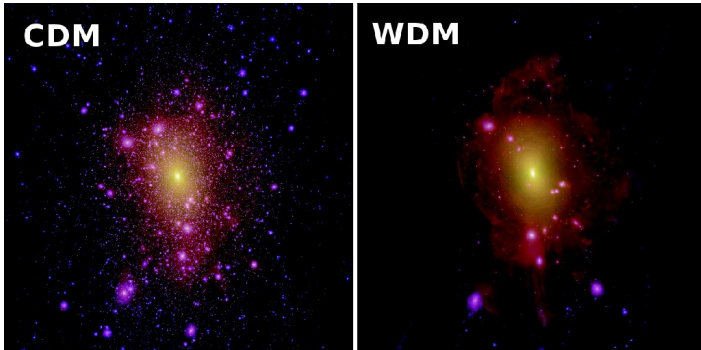
2/3 Left up Right	2.4 MeV u	2/3 Left charm Right	1.27 GeV c	2/3 Left top Right	171.2 GeV t
-1/3 Left down Right	4.8 MeV d	-1/3 Left strange Right	104 MeV s	-1/3 Left bottom Right	4.2 GeV b
0 Left ν_e	< 1 eV N_1 sterile neutrino	0 Left ν_μ	~eV ? N_2 sterile neutrino	0 Left ν_τ	~keV ? N_3 sterile neutrino
-1 Left electron Right	0.511 MeV e	-1 Left muon Right	105.7 MeV μ	-1 Left tau Right	1.777 GeV τ

Perspectives avec KATRIN

Existe-t-il un neutrino stérile à l'eV?



eV-scale:
Resolve anomalies in
oscillation experiments

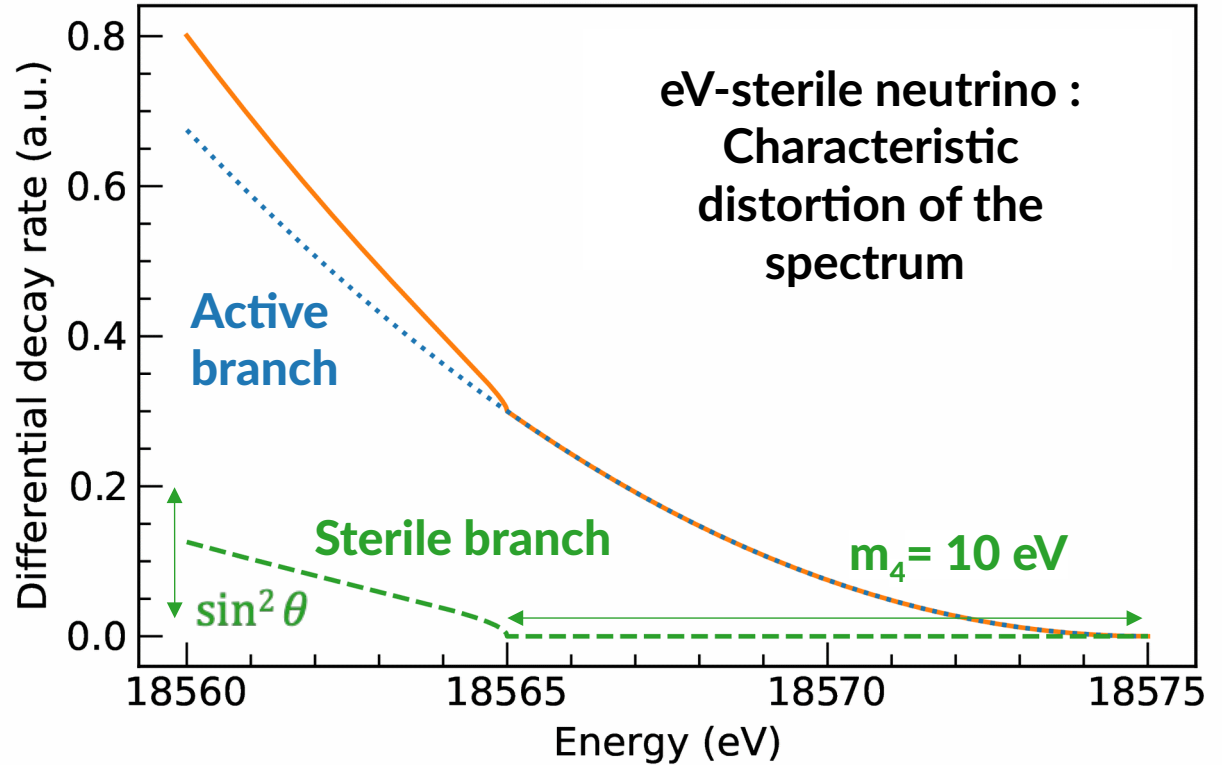
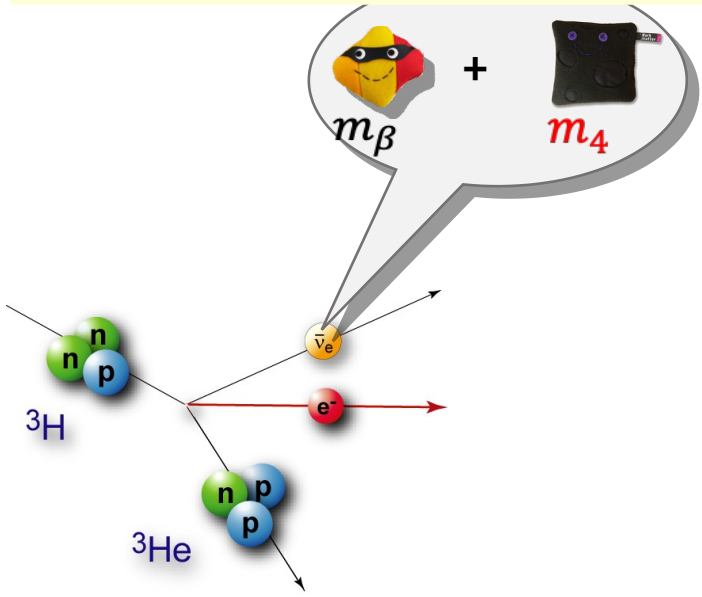


keV-scale:
Dark Matter candidate

2/3 Left up Right	2.4 MeV u	2/3 Left charm Right	1.27 GeV c	2/3 Left top Right	171.2 GeV t
-1/3 Left down Right	4.8 MeV d	-1/3 Left strange Right	104 MeV s	-1/3 Left bottom Right	4.2 GeV b
< 1 eV Left ν_e	\sim eV ? N₁ sterile neutrino	< 1 eV Left ν_μ	\sim keV ? N₂ sterile neutrino	< 1 eV Left ν_τ	\sim GeV ? N₃ sterile neutrino
-1 Left electron Right	0.511 MeV e	-1 Left muon Right	105.7 MeV μ	-1 Left tau Right	1.777 GeV τ

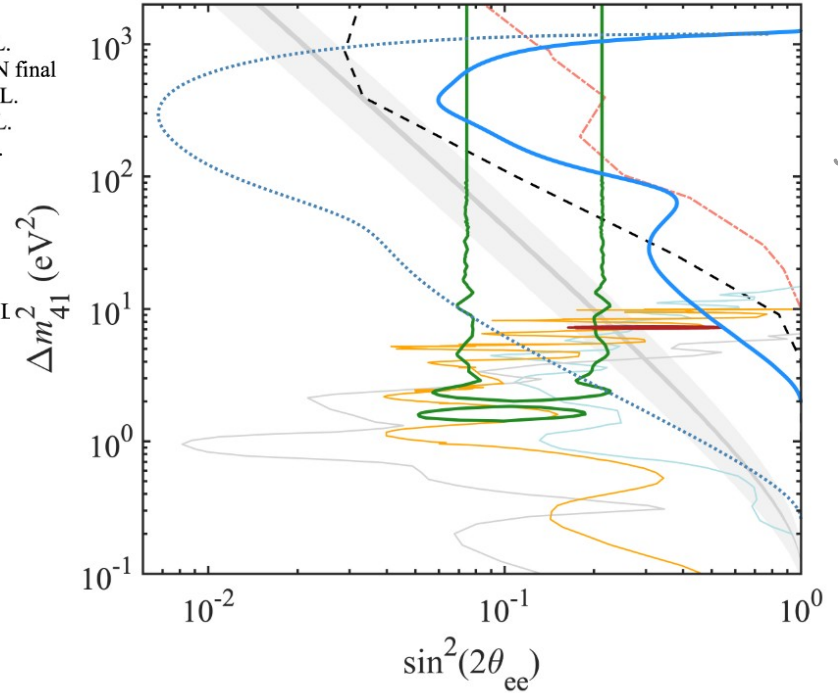
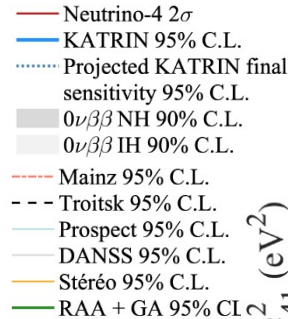
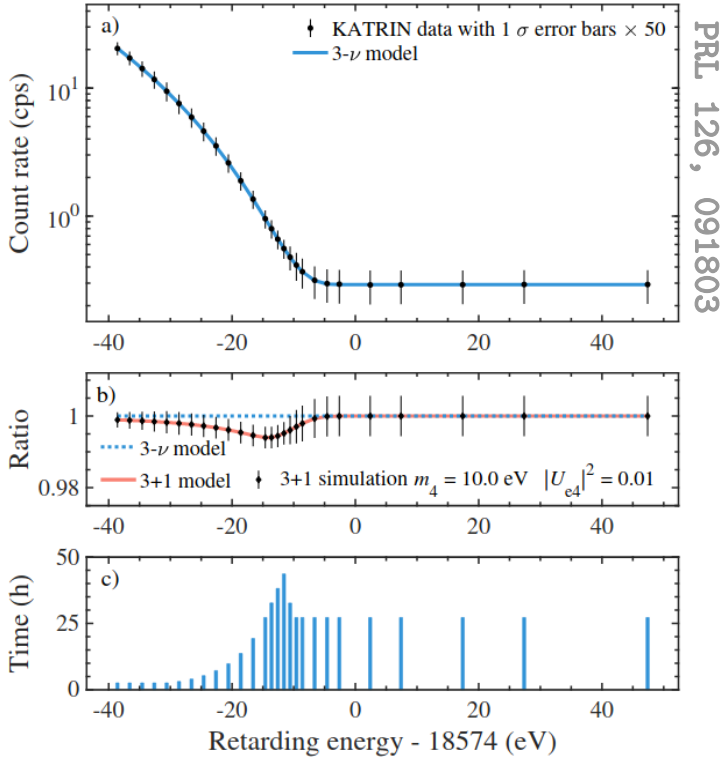
Perspectives avec KATRIN

Existe-t-il un neutrino stérile à l'eV?



Perspectives avec KATRIN

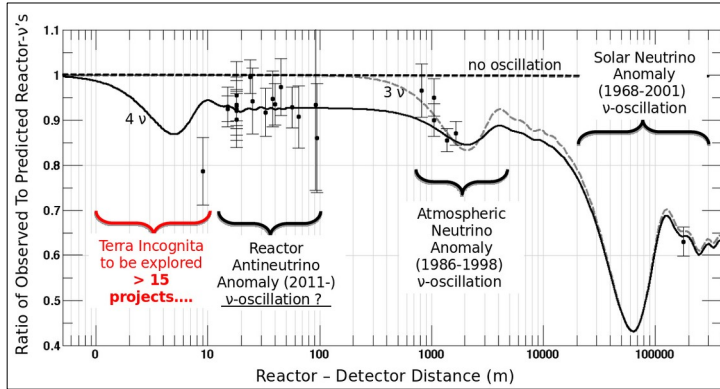
Existe-t-il un neutrino stérile à l'eV?



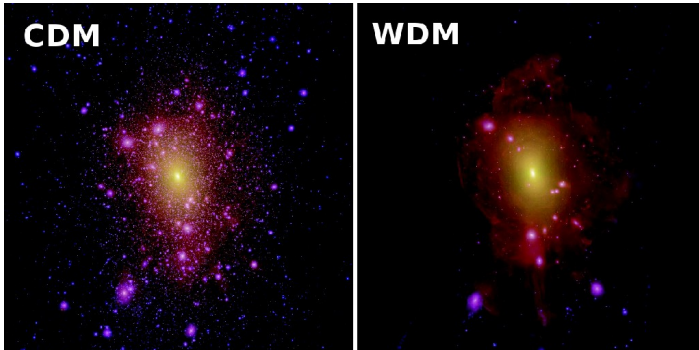
- Unique large window at high mass
- Complementary with Reactor experiments
- Exclude most of the favored phase-space in the next years

Perspectives avec KATRIN

Existe-t-il un neutrino stérile au keV?



eV-scale:
Resolve anomalies in
oscillation experiments

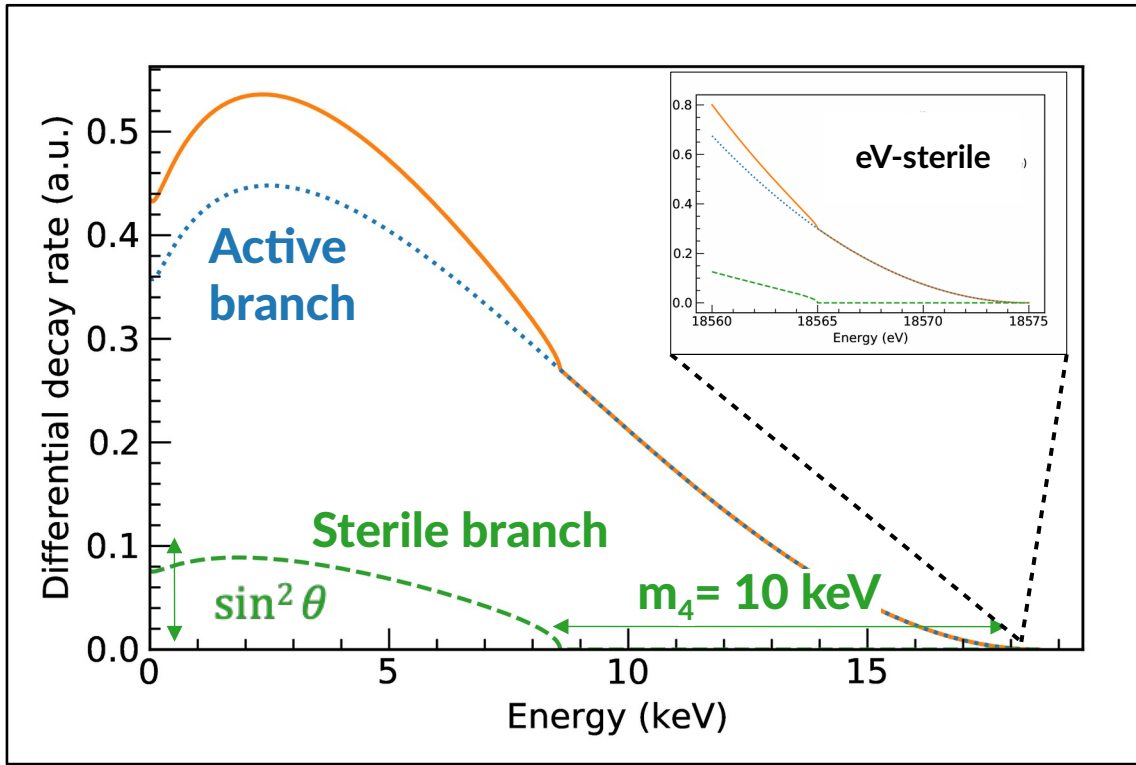


keV-scale:
Dark Matter candidate

2/3 Left u up Right	2.4 MeV	2/3 Left c charm Right	1.27 GeV	2/3 Left t top Right	171.2 GeV
-1/3 Left d down Right	4.8 MeV	-1/3 Left s strange Right	104 MeV	-1/3 Left b bottom Right	4.2 GeV
< 1 eV Left ν _e	~eV ? N ₁ sterile neutrino	< 1 eV Left ν _μ	~keV ? N ₂ sterile neutrino	< 1 eV Left ν _τ	~GeV ? N ₃ sterile neutrino
-1 Left e electron Right	0.511 MeV	-1 Left μ muon Right	105.7 MeV	-1 Left τ tau Right	1.777 GeV

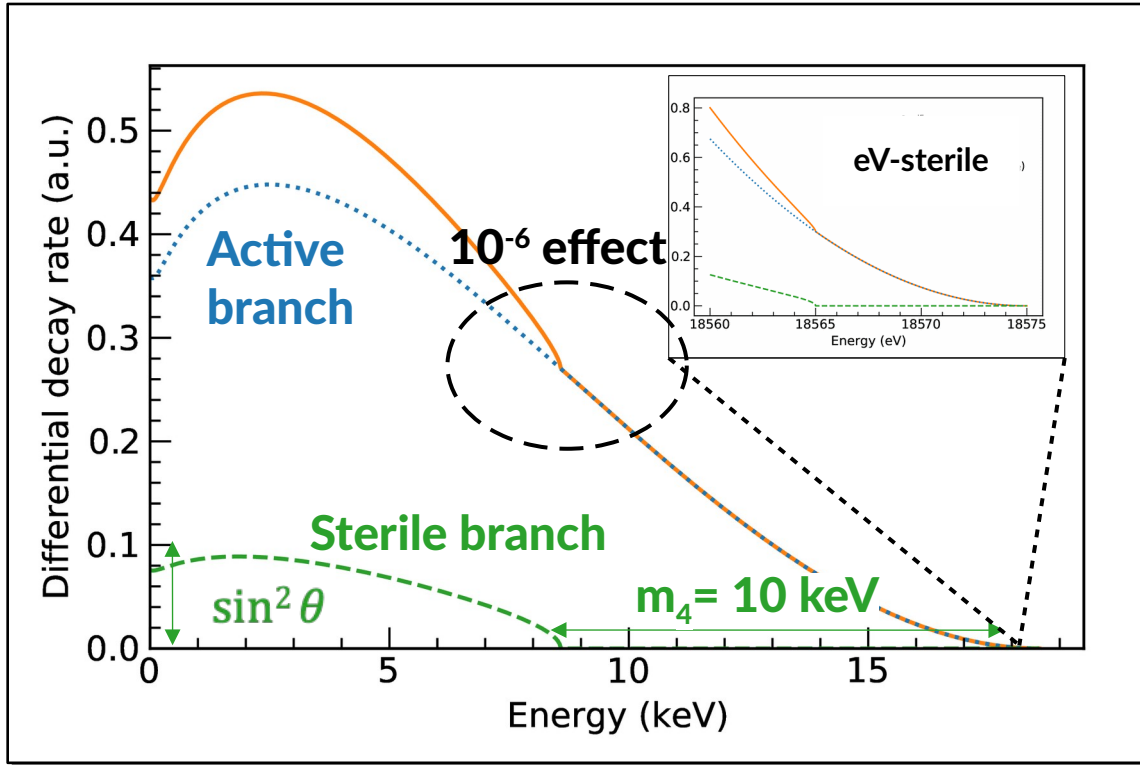
Perspectives avec KATRIN

Existe-t-il un neutrino stérile au keV?



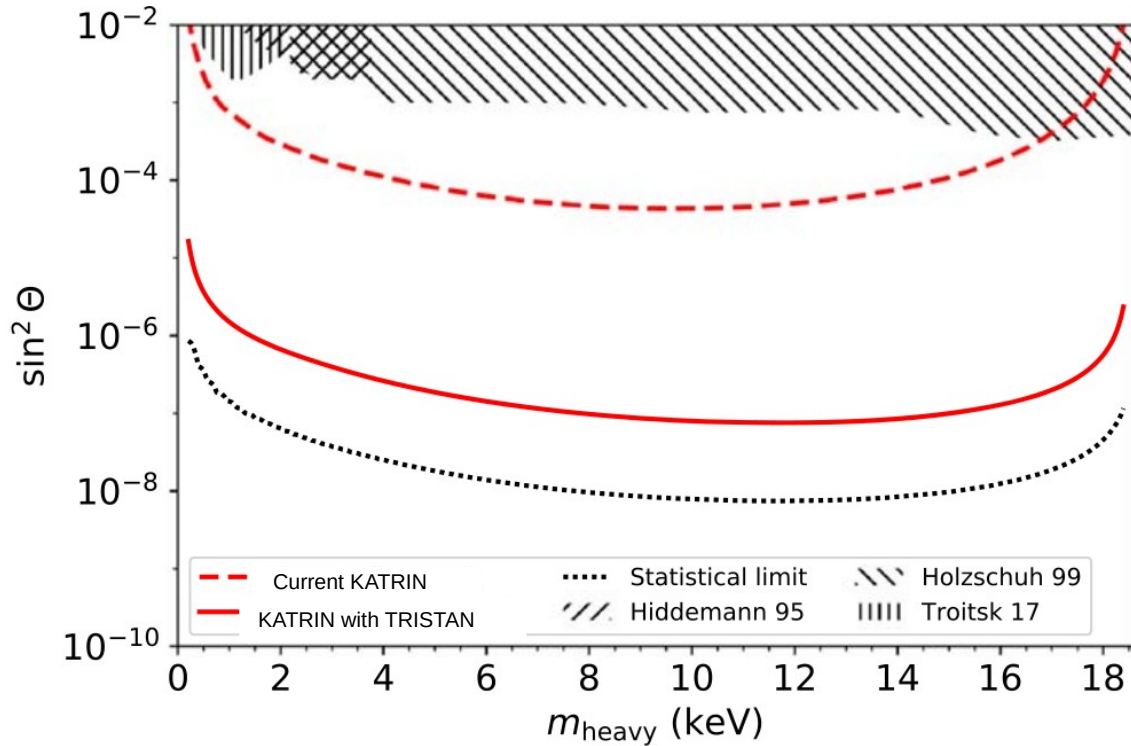
Perspectives avec KATRIN

Existe-t-il un neutrino stérile au keV?

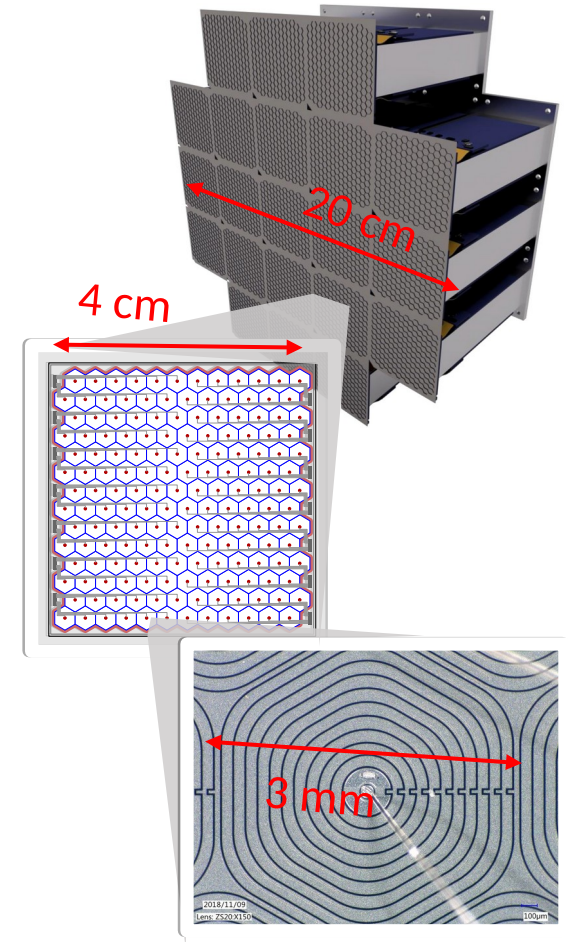


Perspectives avec KATRIN

TRISTAN : Development of a large area SDD array and read-out system to look for keV-sterile neutrino with the KATRIN experiment



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

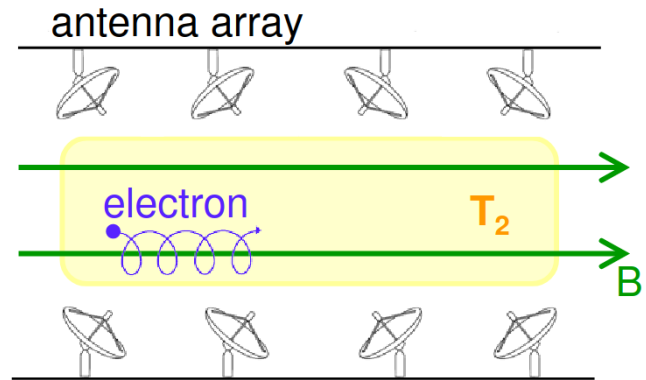
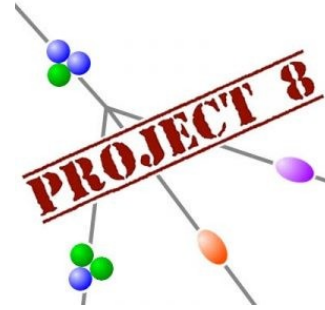
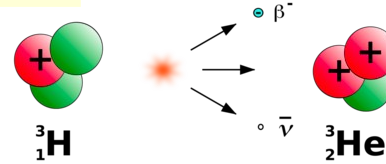


Perspectives

Peut-on mesurer la masse du neutrino après KATRIN?

PROJECT-8 : Nouvelle génération d'expérience tritium basé sur une nouvelle technologie → **mesure de la fréquence cyclotron**

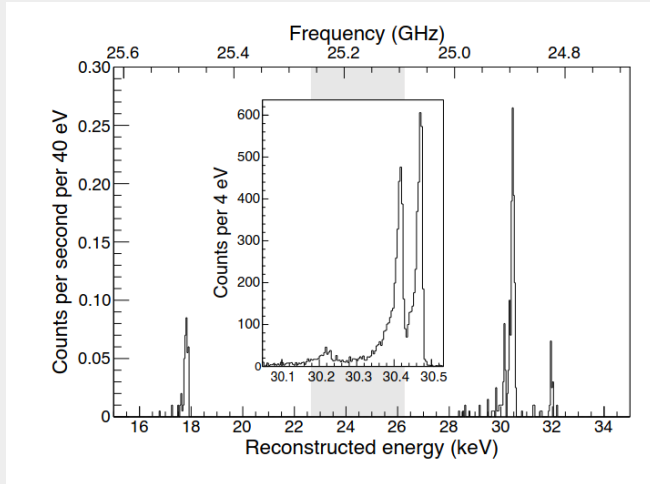
- Mesure des électrons un par un
- Resolution $\Delta E \sim m_\nu$
- Sensibilité → vise à déterminer la hiérarchie de masse ($m_{\nu_e} < 40 \text{ meV}$)
- Source très intense avec de multiples cavité radio-fréquences
- Bruit de fond essentiellement cosmique ou source induit
- Tritium gazeux :
 - Moléculaire ? (incertitude final state)
 - Atomique ? (contamination moléculaire?)
 - Différents endpoints



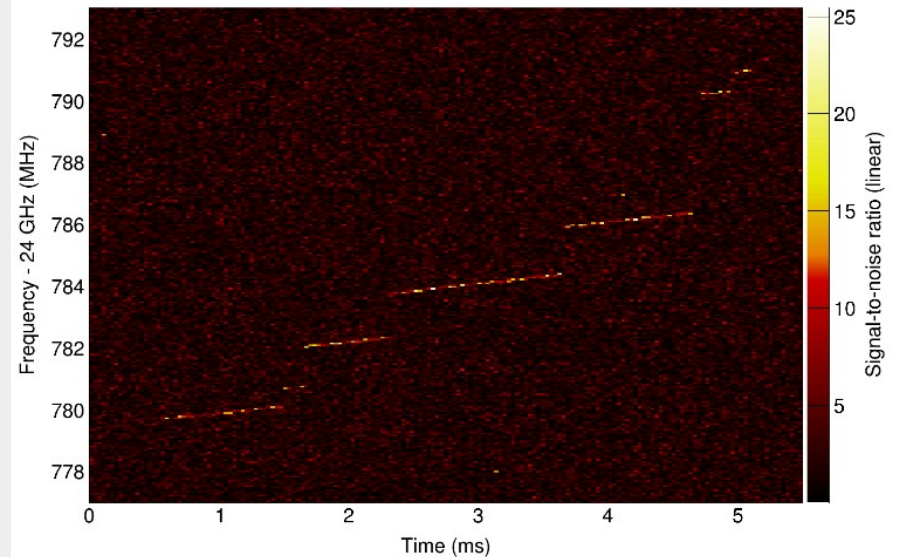
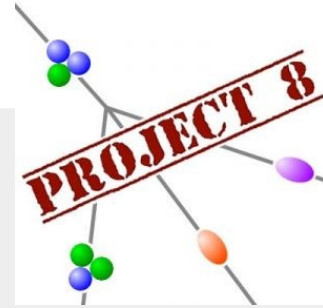
$$\omega(\gamma) = \frac{\omega_0}{\gamma} = \frac{eB}{E + m_e}$$

Perspectives

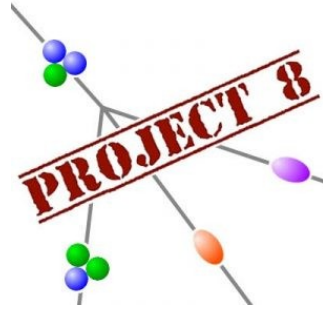
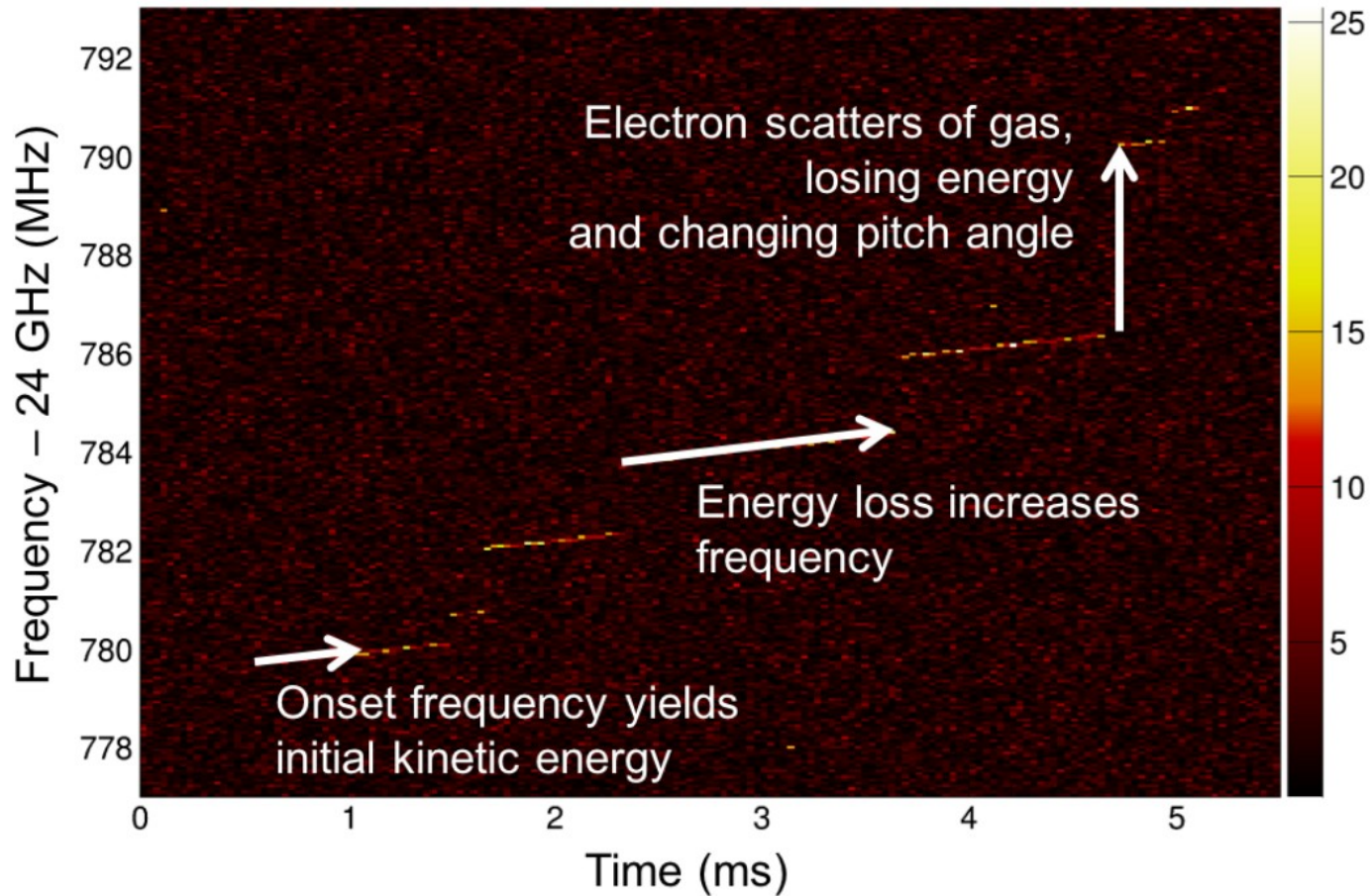
Etalonnage en énergie avec du ^{83m}Kr
→ résolution ~ 15 eV



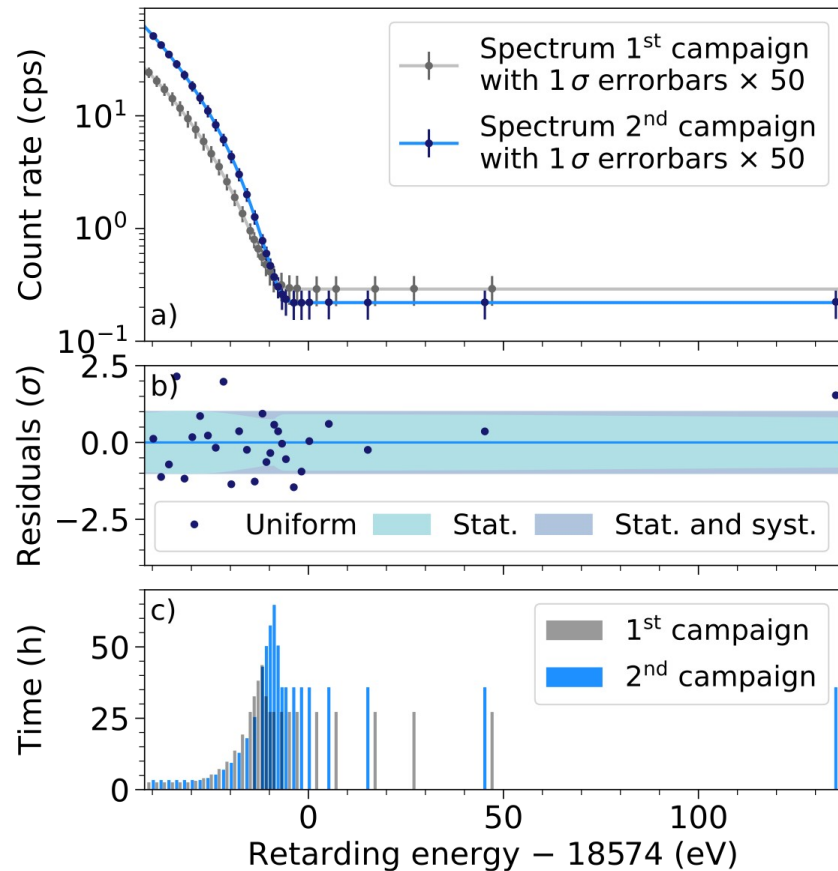
Mesure de la fréquence
de cyclotron pour chaque
électron



Perspectives



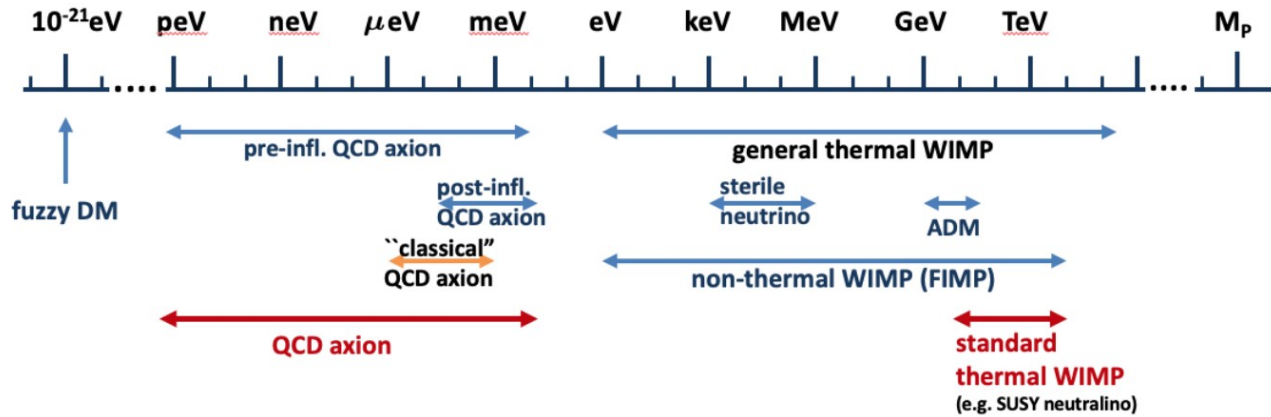
Conclusion



- La masse du neutrino est un enjeu qui dépasse la physique des particules \rightarrow a priori extension du SM
- 40 ans d'efforts expérimentaux:
 - $\rightarrow m\nu < 120$ eV (indirect, cosmology)
 - $\rightarrow m\nu < 900$ eV (direct, tritium)
- La sensibilité de KATRIN de $m_\nu < 300$ eV devrait être atteinte dans les prochaines années
- Des projets prometteurs se développent en parallèle comme Project-8, ECHO, HOLMES
- La cosmologie/ $0\nu\beta\beta$ pourrait nous apporter une réponse dans les prochaines années (test modèle Λ CDM si pas de signal, nature du neutrino)
- D'autres expériences en parallèle vont mesurer la hiérarchie de masse (DUNE, T2K, ORCA)

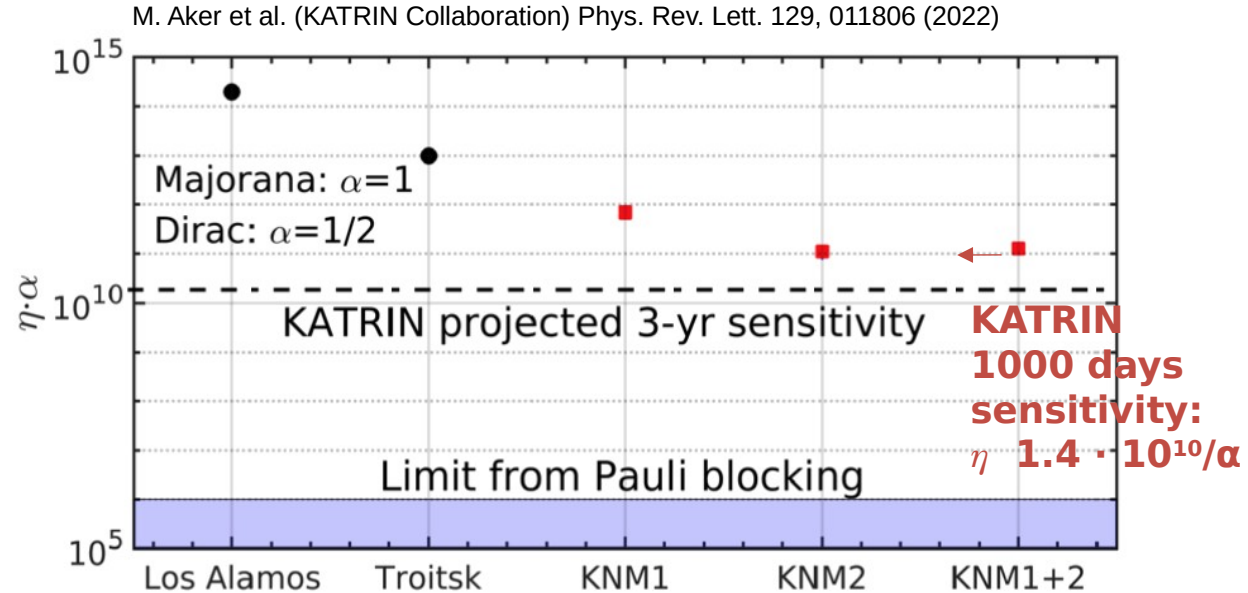
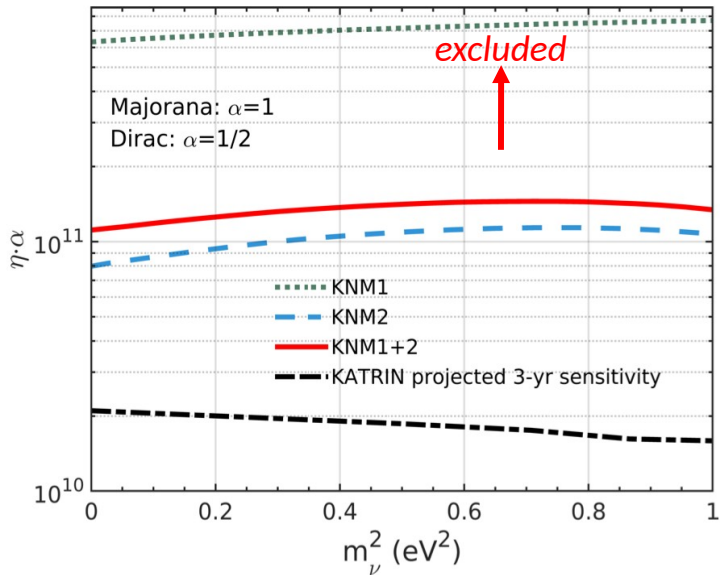
Back-up slides

Perspectives

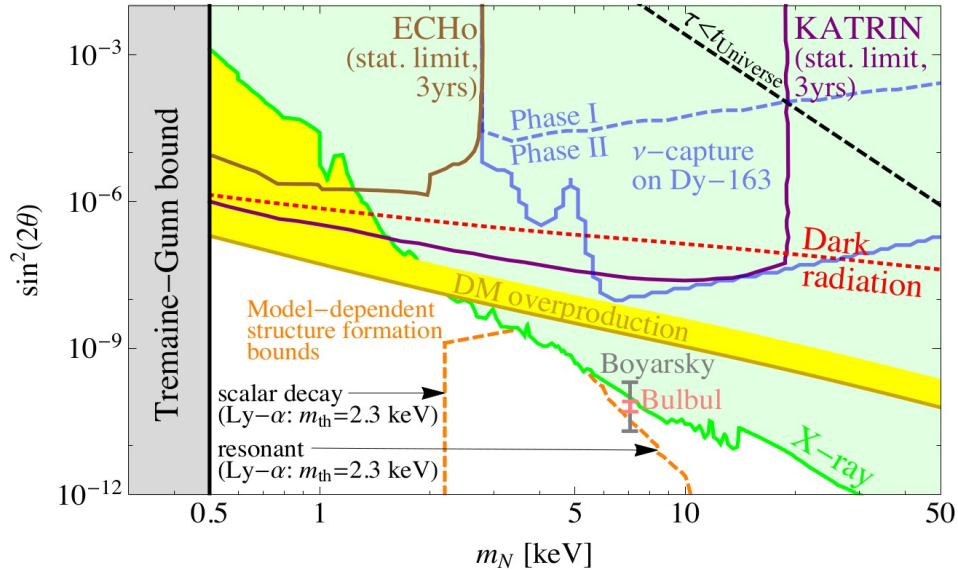
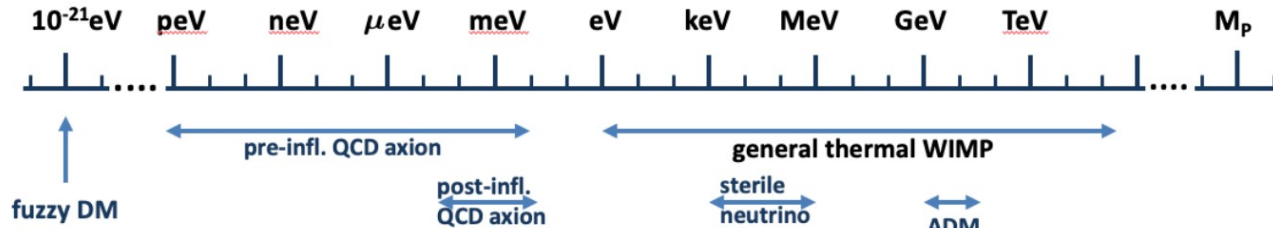


Relic Neutrino Results

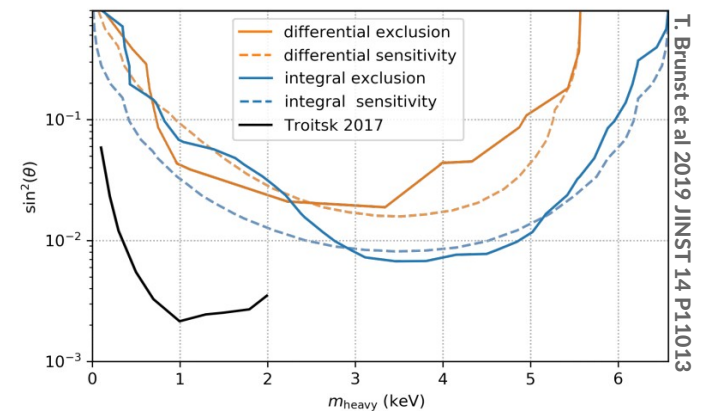
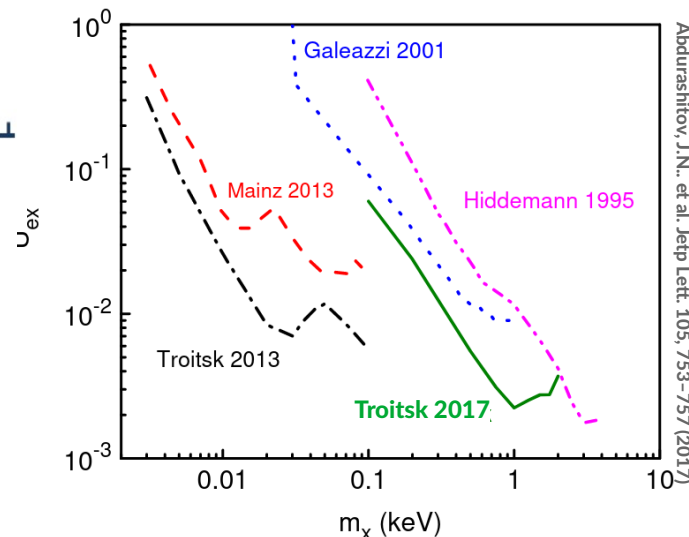
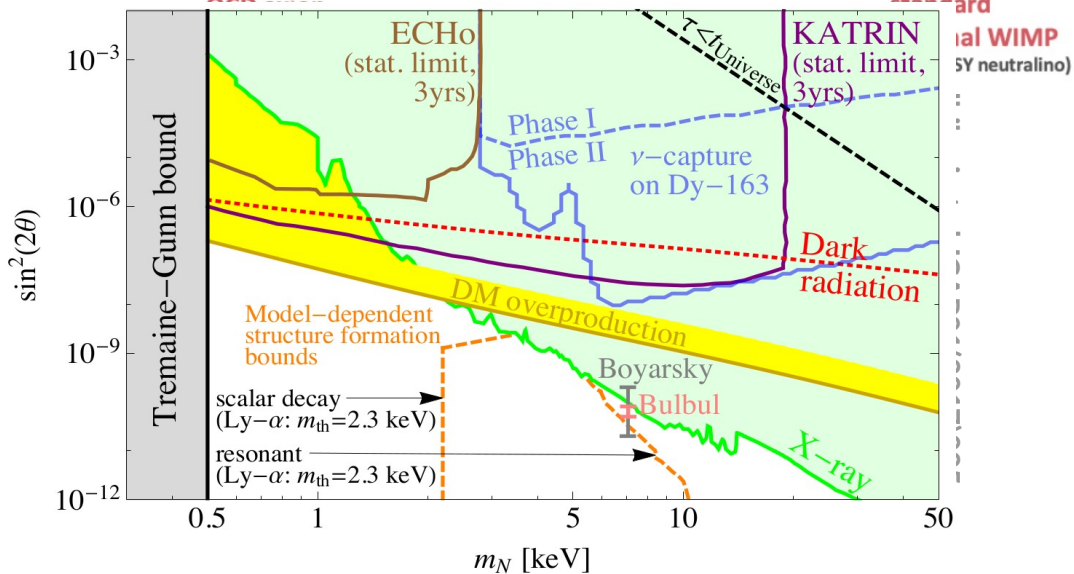
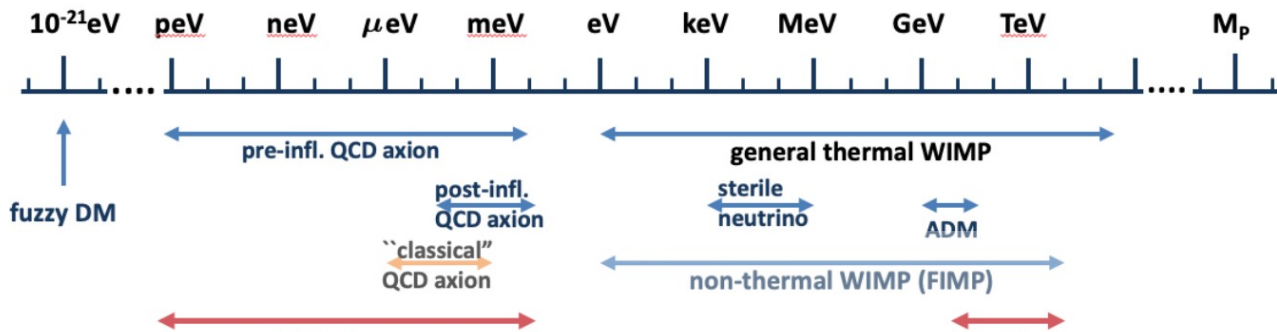
- ✓ test for large overdensity of relic neutrinos in our surrounding (based on 1st and 2nd campaigns)
- ✓ $\eta < 1.1 \cdot 10^{11}/\alpha$ at 95% CL – the search is statistically limited
- ✓ improved limit by 2 orders of magnitude compared to previous laboratory limits



Perspectives



Perspectives

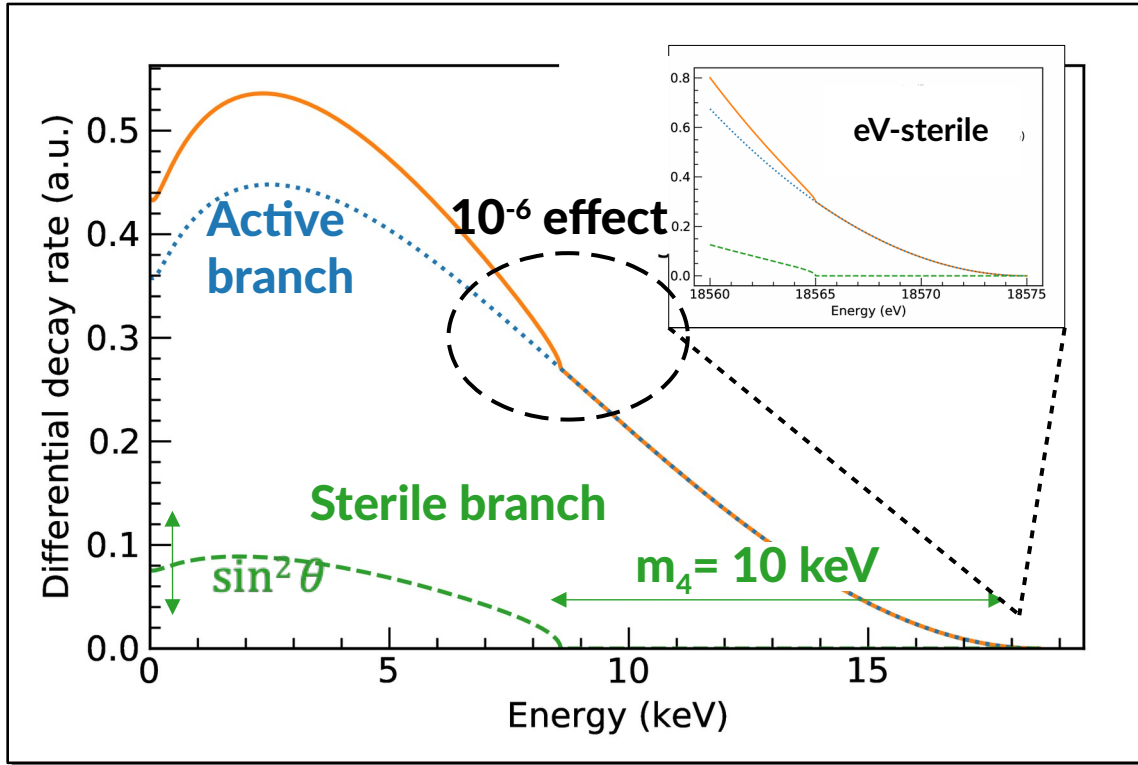


Abdurashitov, J.N., et al. Jexp Lett. 105, 753-757 (2017)

T. Brunst et al 2019 JINST 14 P11013

Perspectives

Existe-t-il un neutrino stérile au keV?



Stringent limit from **astrophysical** and **cosmological** observations ($\sin^2(\theta) < 10^{-7}$):

→ Dramatic **increase of the count rate** (up to $3 \times 10^8 \text{ Hz}$)

→ Integral and differential phases (detector with **good resolution**)

→ Highly **pixelised**

→ **new detector is needed : the TRISTAN project**



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 β -spectroscopy

