A decorative pattern of overlapping squares in light grey, medium grey, and dark blue is positioned on the left side of the slide, partially covering the title area.

Cours de physique des particules
(MA1 ou MA2)
Année académique 2023-24
PHYSF-416 (5ECTS)

CHAPITRE 10 : LES PROPRIETES DES NEUTRINOS

Chapitre X: Propriétés des neutrinos

- **X.1. Contenus en saveur des états de masse:**
- **X.2. Mesures directes de la masse du neutrino**
- **X.3. Recherche de doubles désintégrations β sans ν**
- **X.4. Limites cosmologiques**
- **X.5. Conclusions et questions ouvertes**

Chapitre X: Propriétés des neutrinos

■ X.1. Contenus en saveur des états de masse:

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
without SK atmospheric data.	$\sin^2 \theta_{12}$	$0.304^{+0.013}_{-0.012}$	$0.269 \rightarrow 0.343$	$0.304^{+0.012}_{-0.012}$	$0.269 \rightarrow 0.343$
	$\theta_{12}/^\circ$	$33.44^{+0.77}_{-0.74}$	$31.27 \rightarrow 35.86$	$33.45^{+0.77}_{-0.74}$	$31.27 \rightarrow 35.87$
	$\sin^2 \theta_{23}$	$0.573^{+0.018}_{-0.023}$	$0.405 \rightarrow 0.620$	$0.578^{+0.017}_{-0.021}$	$0.410 \rightarrow 0.623$
	$\theta_{23}/^\circ$	$49.2^{+1.0}_{-1.3}$	$39.5 \rightarrow 52.0$	$49.5^{+1.0}_{-1.2}$	$39.8 \rightarrow 52.1$
	$\sin^2 \theta_{13}$	$0.02220^{+0.00068}_{-0.00062}$	$0.02034 \rightarrow 0.02430$	$0.02238^{+0.00064}_{-0.00062}$	$0.02053 \rightarrow 0.02434$
	$\theta_{13}/^\circ$	$8.57^{+0.13}_{-0.12}$	$8.20 \rightarrow 8.97$	$8.60^{+0.12}_{-0.12}$	$8.24 \rightarrow 8.98$
	$\delta_{\text{CP}}/^\circ$	194^{+52}_{-25}	$105 \rightarrow 405$	287^{+27}_{-32}	$192 \rightarrow 361$
	$\frac{\Delta m_{21}^2}{10^{-5} \text{ eV}^2}$	$7.42^{+0.21}_{-0.20}$	$6.82 \rightarrow 8.04$	$7.42^{+0.21}_{-0.20}$	$6.82 \rightarrow 8.04$
	$\frac{\Delta m_{3\ell}^2}{10^{-3} \text{ eV}^2}$	$+2.515^{+0.028}_{-0.028}$	$+2.431 \rightarrow +2.599$	$-2.498^{+0.028}_{-0.029}$	$-2.584 \rightarrow -2.413$

$$\Delta m_{3\ell}^2 \quad \text{with} \quad \begin{cases} \ell = 1 & \text{for } \Delta m_{3\ell}^2 > 0: \text{normal ordering (NO),} \\ \ell = 2 & \text{for } \Delta m_{3\ell}^2 < 0: \text{inverted ordering (IO).} \end{cases}$$

Chapitre X: Propriétés des neutrinos

X.1. Contenus en saveur des états de masse:

$$\begin{aligned} |\nu_e\rangle &= U_{e1} |\nu_1\rangle + U_{e2} |\nu_2\rangle + U_{e3} |\nu_3\rangle \\ |\nu_\mu\rangle &= U_{\mu 1} |\nu_1\rangle + U_{\mu 2} |\nu_2\rangle + U_{\mu 3} |\nu_3\rangle \\ |\nu_\tau\rangle &= U_{\tau 1} |\nu_1\rangle + U_{\tau 2} |\nu_2\rangle + U_{\tau 3} |\nu_3\rangle \end{aligned}$$

Contenu de la matrice PMNS :

Contenus = $|U_{kl}|^2$

Ex : contenu de ν_e dans ν_3
 $= \sin^2(\theta_{13}) = \sin^2(8,4^\circ) \sim 2\%$

$$U = \begin{pmatrix} c_{12} & c_{13} & & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ (-s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}) & s_{13}e^{i\delta} & & (c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13})e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ (s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13})e^{i\delta} & & & (-c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13})e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix}$$

arXiv:2007.14792v1

NuFIT 5.1 (2021)

3σ ranges

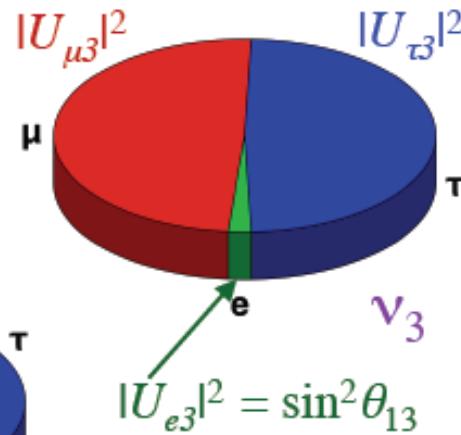
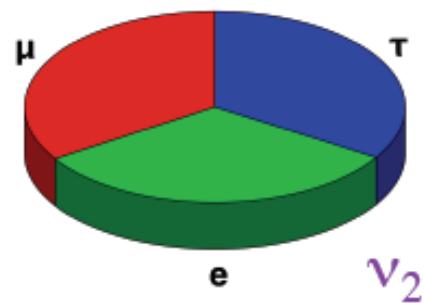
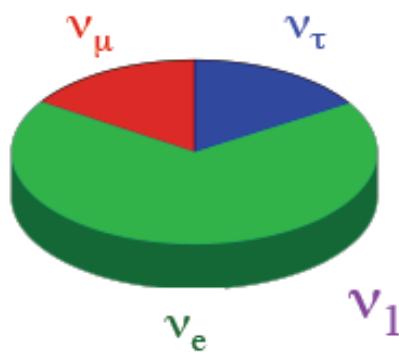
$$|U|_{3\sigma}^{\text{w/o SK-atm}} = \begin{pmatrix} 0.801 \rightarrow 0.845 & 0.513 \rightarrow 0.579 & 0.143 \rightarrow 0.156 \\ 0.232 \rightarrow 0.507 & 0.459 \rightarrow 0.694 & 0.629 \rightarrow 0.779 \\ 0.260 \rightarrow 0.526 & 0.470 \rightarrow 0.702 & 0.609 \rightarrow 0.763 \end{pmatrix}$$

$$|U|_{3\sigma}^{\text{with SK-atm}} = \begin{pmatrix} 0.801 \rightarrow 0.845 & 0.513 \rightarrow 0.579 & 0.144 \rightarrow 0.156 \\ 0.244 \rightarrow 0.499 & 0.505 \rightarrow 0.693 & 0.631 \rightarrow 0.768 \\ 0.272 \rightarrow 0.518 & 0.471 \rightarrow 0.669 & 0.623 \rightarrow 0.761 \end{pmatrix}$$

Chapitre X: Propriétés des neutrinos

■ X.1. Contenus en saveur des états de masse:

The Probabilities of Making e , μ , and τ

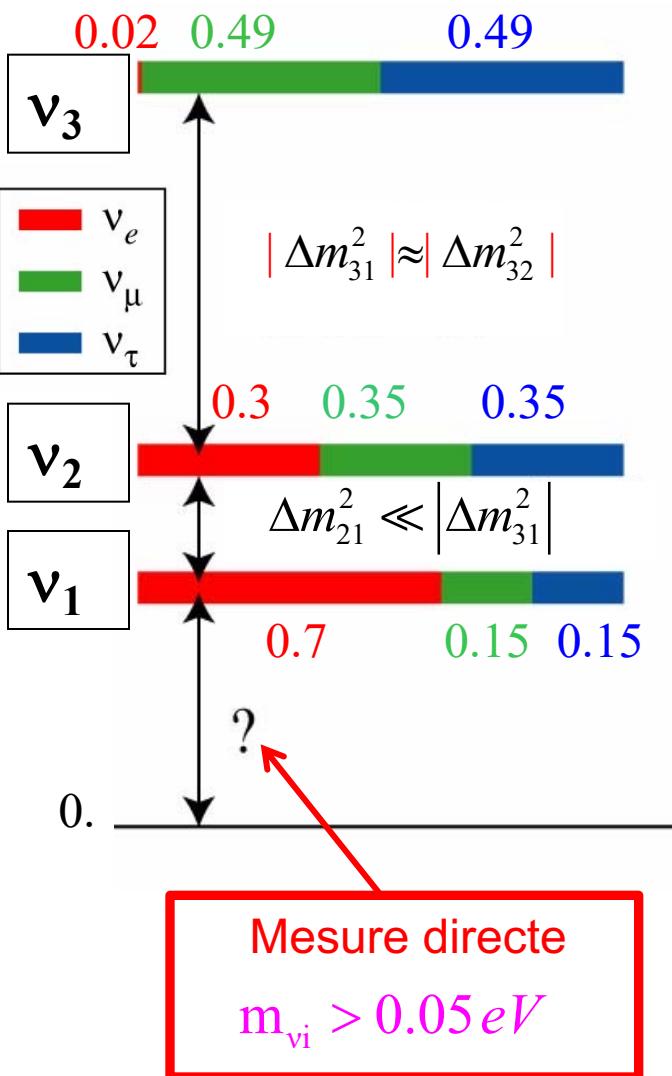


$$\begin{aligned} |\nu_e\rangle &= U_{e1} |\nu_1\rangle + U_{e2} |\nu_2\rangle + U_{e3} |\nu_3\rangle \\ |\nu_\mu\rangle &= U_{\mu 1} |\nu_1\rangle + U_{\mu 2} |\nu_2\rangle + U_{\mu 3} |\nu_3\rangle \\ |\nu_\tau\rangle &= U_{\tau 1} |\nu_1\rangle + U_{\tau 2} |\nu_2\rangle + U_{\tau 3} |\nu_3\rangle \end{aligned}$$

$$U = \begin{pmatrix} c_{12} & c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13} e^{-i\delta} \\ \left(-s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23} \right) & s_{13}e^{i\delta} & \left(c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13} \right) & s_{23}c_{13} \\ \left(s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13} \right) & e^{i\delta} & \left(-c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13} \right) & c_{23}c_{13} \end{pmatrix}$$

X.1. Contenus en saveur des états de masse:

Not updated results



Tous les résultats sont compatibles avec

$$\Delta m_{21}^2 = (7.40 \pm 0.21) \times 10^{-5} \text{ eV}^2 \quad m_2 > m_1 \text{ (convention)}$$

$$|\Delta m_{32}^2| = (2.49 \pm 0.03) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

Hiérarchie inconnue: $m_3 \gg m_2 > m_1$ ou $m_3 \ll m_1 < m_2$?

$$\sin^2(\theta_{12}) = 0.307 \pm 0.013 \rightarrow (\theta_{12}) = 33.62 \pm 0.78$$

→ mélange important

$$\sin^2(\theta_{23}) = 0.538^{+0.033}_{-0.069} \rightarrow (\theta_{23}) = 47.2^{+1.9}_{-3.9}$$

→ mélange maximum ?

$$\sin^2(\theta_{13}) = 0.02206 \pm 0.00075 \rightarrow (\theta_{13}) = 8.54 \pm 0.15$$

→ non nul

- compatible avec mélange complet $\nu_\mu - \nu_\tau$

- compatible avec faible composante ν_e dans ν_3

- mélange important entre ν_e et ν_μ/ν_τ dans ν_1 et ν_2

- pas d'information significative sur la violation de CP:

$$U_{e3} = \sin \theta_{13} e^{i\delta_{CP}}$$

Chapitre X: Propriétés des neutrinos

■ X.1. Contenus en saveur des états de masse:

Il existe 3 approches expérimentales pour mesurer la masse des neutrinos :

- La mesure directe par l'étude du spectre d'énergie des électrons émis dans la désintégration β du tritium
- L'étude d'éventuelles doubles désintégrations β sans ν dans l'état final, liées à l'éventualité que le ν soit "de Majorana", c'-à-d. identique à $\bar{\nu}$
- Des mesures cosmologiques liées à la matière noire (on en dira peu).

Chapitre X: Propriétés des neutrinos

■ X.2. Mesures directes de la masse du neutrino

□ Principe

Mesure du spectre d'énergie des électrons dans les désintégrations β du tritium. Cette méthode est la plus directe car elle fait appel seulement à des considérations cinématiques basées sur la conservation de l'énergie et de l'impulsion:

$$\text{Si } {}^3H \rightarrow {}^3He + e^-, E_e = 18,6 \text{ keV} \equiv E_0$$

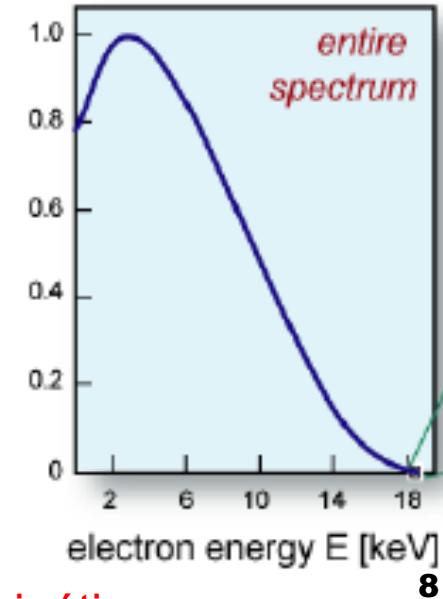
$$\text{Mais } {}^3H \rightarrow {}^3He + e^- + \bar{\nu}_e \Rightarrow$$

Distribution d'énergie pour l' e^- :

$$\text{Max}(E_e) = E_0 \text{ si } m_{\nu_e} = 0$$

$$\text{Si } m_{\nu_e} \neq 0 \text{ alors } m_{\nu_e} = \frac{m_{He3}}{m_{H3}} (E_0 - \text{Max}(E_e))$$

$$\simeq E_0 - \text{Max}(E_e) \text{ car: } \frac{m_{He3}}{m_{H3}} = 1.0002$$



Chapitre X: Propriétés des neutrinos

■ X.2. Mesures directes de la masse du neutrino

□ Principe

Parenthèse:

$$\frac{dN(E_e)}{dE_e} \div E_e p_e (E_0 - E_e) \sqrt{(E_0 - E_e)^2 - m_{\nu_e}^2}$$

s'obtient à partir de la règle d'or, avec le $|<\mathbf{m}>|^2$ valide pour l'interaction faible. Le calcul est fait dans le Griffiths (9.3 Decay of the neutron), dans l'approximation $m_\nu = 0$. Le résultat:

$$\frac{dN(E_e)}{dE_e} \div E_e p_e (E_0 - E_e)^2 = E_e p_e E_\nu^2 = E_e p_e E_\nu p_\nu \text{ car } E_\nu = p_\nu \text{ si } m_\nu = 0$$

Ce qui devient, si $m_\nu \neq 0$:

$$\frac{dN(E_e)}{dE_e} \div E_e p_e E_\nu p_\nu = E_e p_e E_\nu \sqrt{E_\nu^2 - m_\nu^2}$$

Chapitre X: Propriétés des neutrinos

■ X.2. Mesures directes de la masse du neutrino

□ Principe

Mélange de neutrinos →

$$|\nu_e\rangle = \sum_{k=1}^3 U_{ek} |\nu_k\rangle \Rightarrow m_{\nu_e}^{eff^2} = \sum_{k=1}^3 |U_{ek}|^2 m_k^2$$

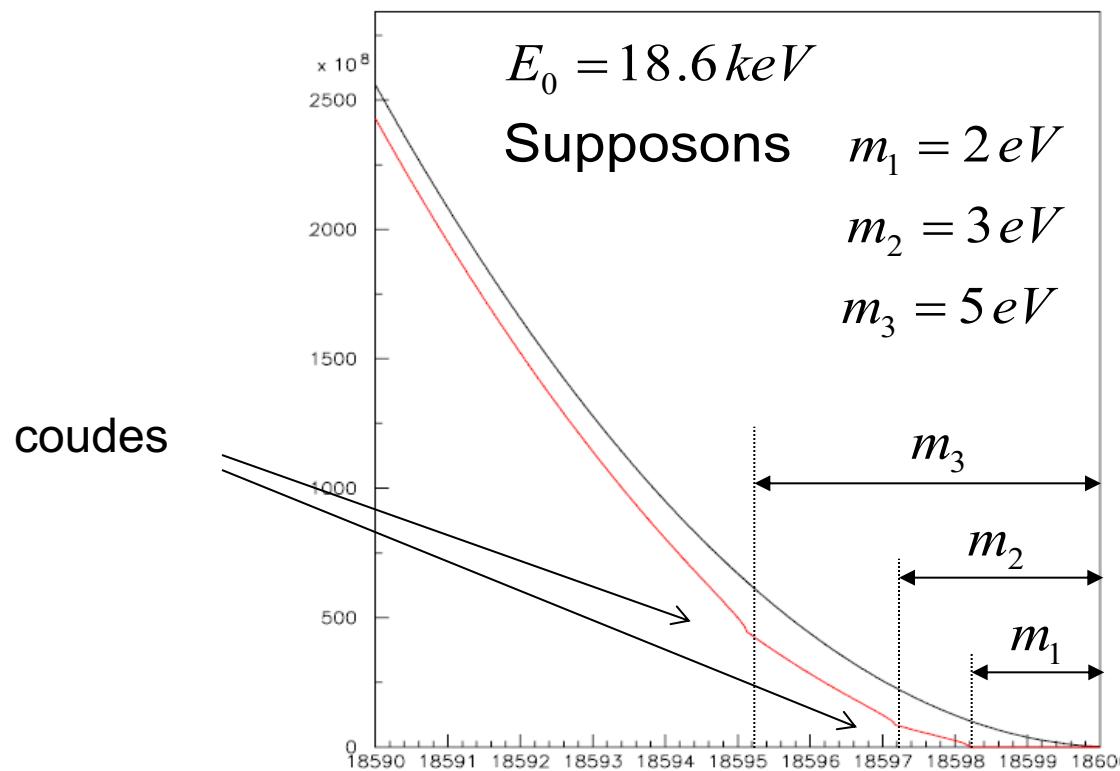
On mesure une masse effective du ν_e

$$\frac{dN(E_e)}{dE_e} \div E_e p_e (E_0 - E_e) \sum_{k=1}^3 |U_{ek}|^2 \sqrt{(E_0 - E_e)^2 - \cancel{m_k^2}} \Theta(E_0 - E - m_k)$$

Chapitre X: Propriétés des neutrinos

■ X.2. Mesures directes de la masse du neutrino

- Principe

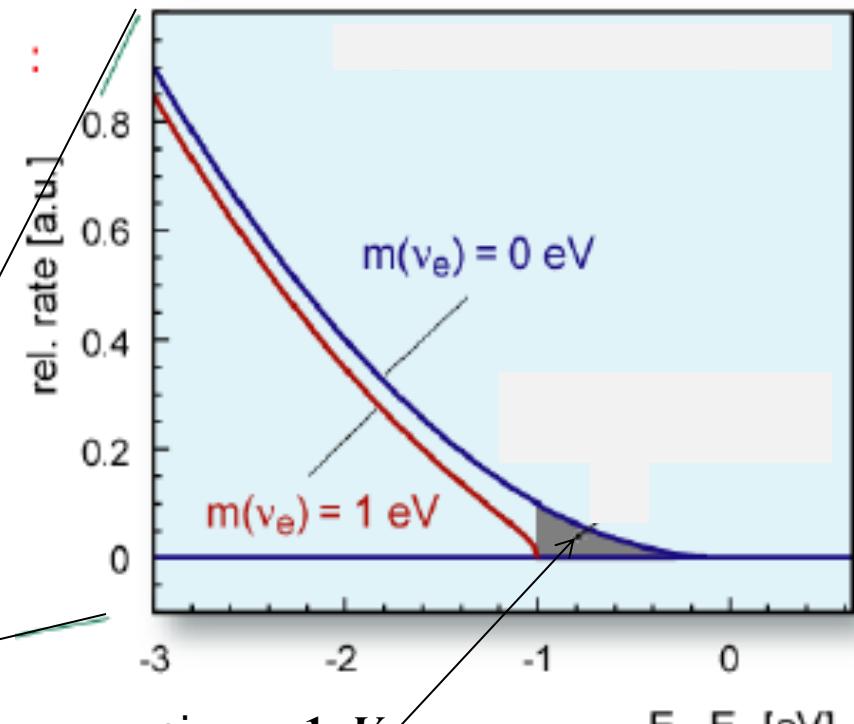
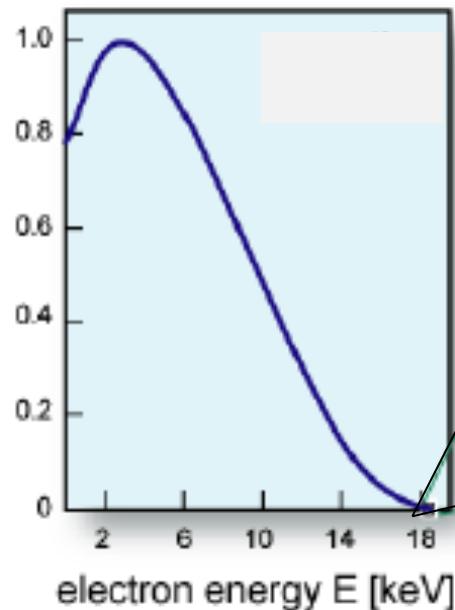


Simulation!
Dans le cas où
les neutrinos
ont des masses
significatives
2eV, 3eV, 5eV

Chapitre X: Propriétés des neutrinos

■ X.2. Mesures directes de la masse du neutrino

- Principe



si $m_\nu = 1 \text{ eV}$
 $\Rightarrow \sim 2 \cdot 10^{-13}$ de toutes
les désintégrations
dans le dernier 1 eV

Chapitre X: Propriétés des neutrinos

■ X.2. Mesures directes de la masse du neutrino

□ Pourquoi le tritium?

- 2^{ème} valeur la plus basse de E_0 (18.6 keV): effet relatif de m_ν grand.
- Il y a aussi ^{187}Re ($E_0 = 2.47$ keV) mais sa structure électronique est très compliquée tandis que ^3H a le **Z le plus bas**: effet Coulomb le plus faible
- **Faible densité** : pertes d'énergie des e^- dans la source faibles
- **Grande activité de la source** : $T^{1/2} = 12.3$ ans
($T^{1/2} = 4.3 \times 10^{10}$ ans pour ^{187}Re)

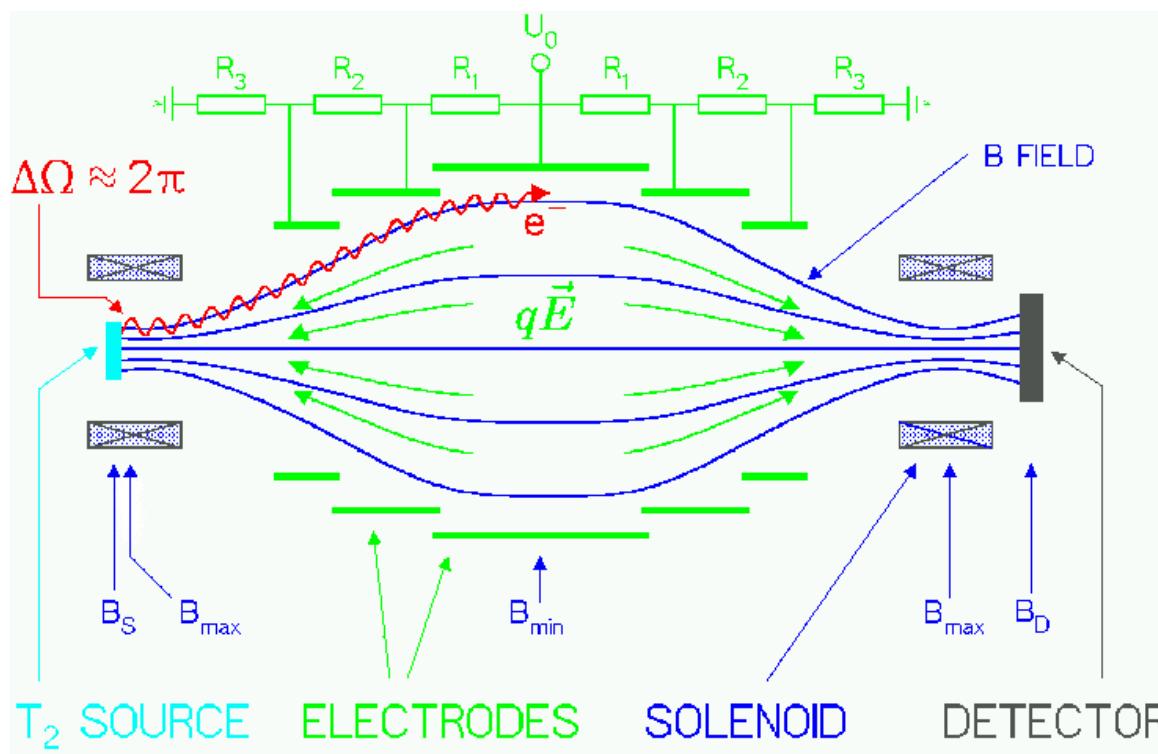
$\text{Re} = \text{Rhénium}$

$Z = 75$

Chapitre X: Propriétés des neutrinos

■ X.2. Mesures directes de la masse du neutrino

- L'expérience de Mainz – principe



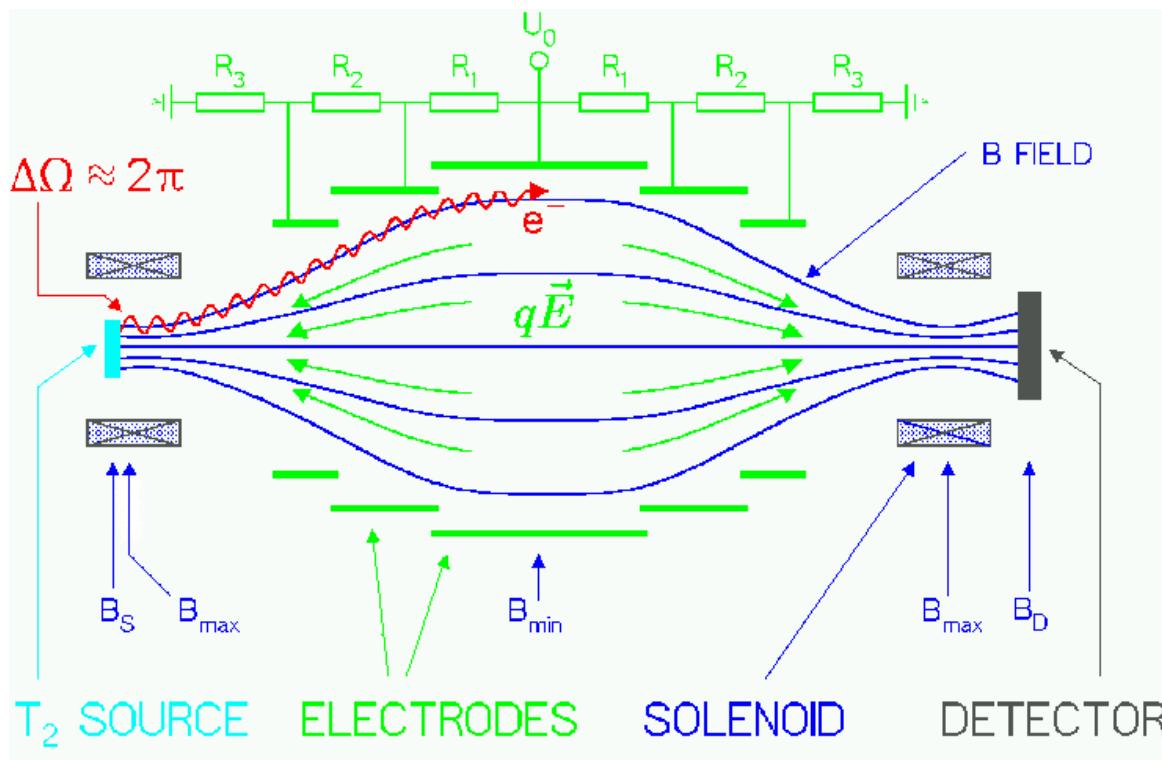
T2: source : film de tritium moléculaire de 40 nm d'épaisseur, condensé sur un substrat de graphite.

Champ magnétique qui diminue d'un facteur 4 au centre de sorte que les électrons sont pratiquement alignés sur les lignes de champ électrique (effet focalisant)

Chapitre X: Propriétés des neutrinos

■ X.2. Mesures directes de la masse du neutrino

- L'expérience de Mainz – principe



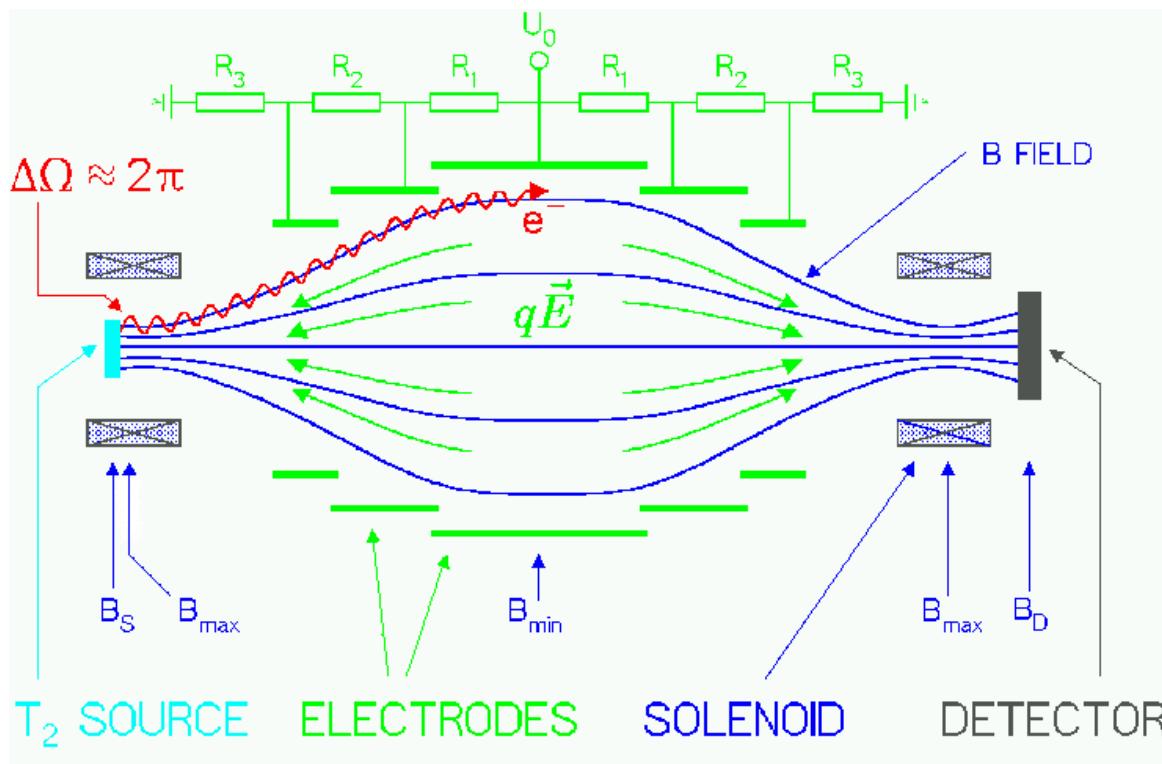
Pour parvenir au centre les électrons doivent traverser une barrière de potentiel électrostatique.

Seuls les électrons d'énergie supérieure au potentiel électrostatique sont réaccélérés et collimés sur le détecteur.

Chapitre X: Propriétés des neutrinos

■ X.2. Mesures directes de la masse du neutrino

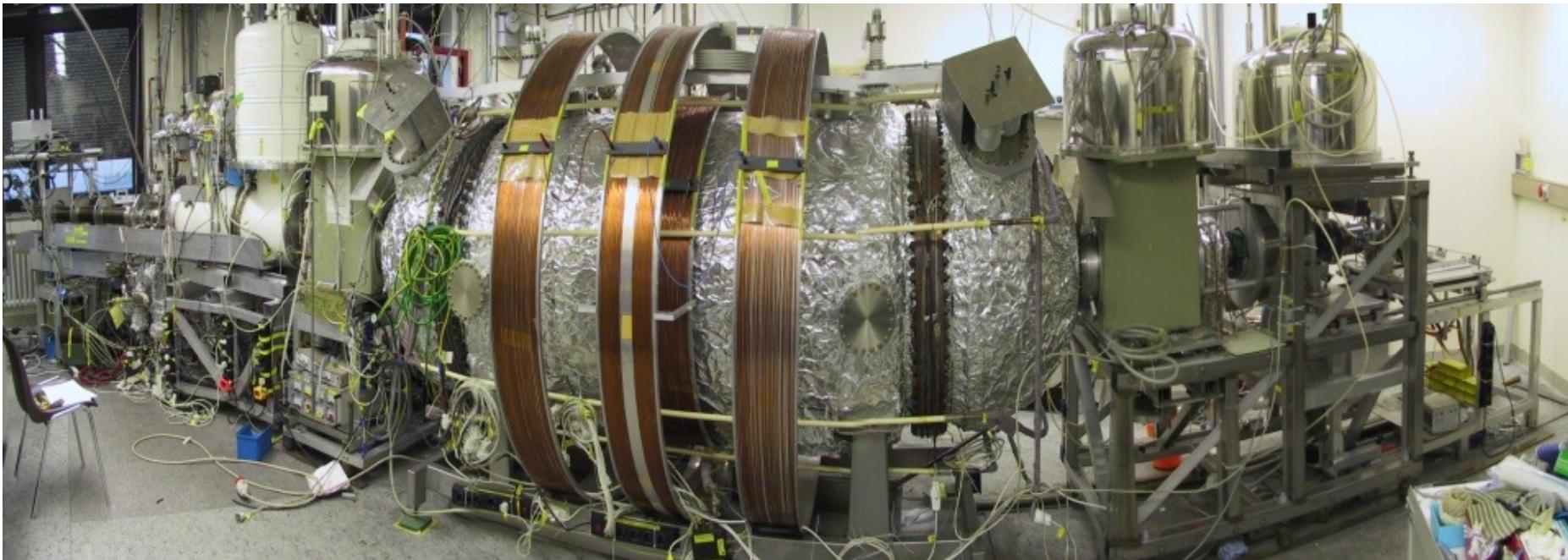
- L'expérience de Mainz – principe



En faisant varier le potentiel électrostatique V , on mesure les taux de comptage de la source pour des valeurs de l'énergie des e^- émis:
 $E_e > V$

Chapitre X: Propriétés des neutrinos

- X.2. Mesures directes de la masse du neutrino
 - L'expérience de Mainz – dispositif final



Chapitre X: Propriétés des neutrinos

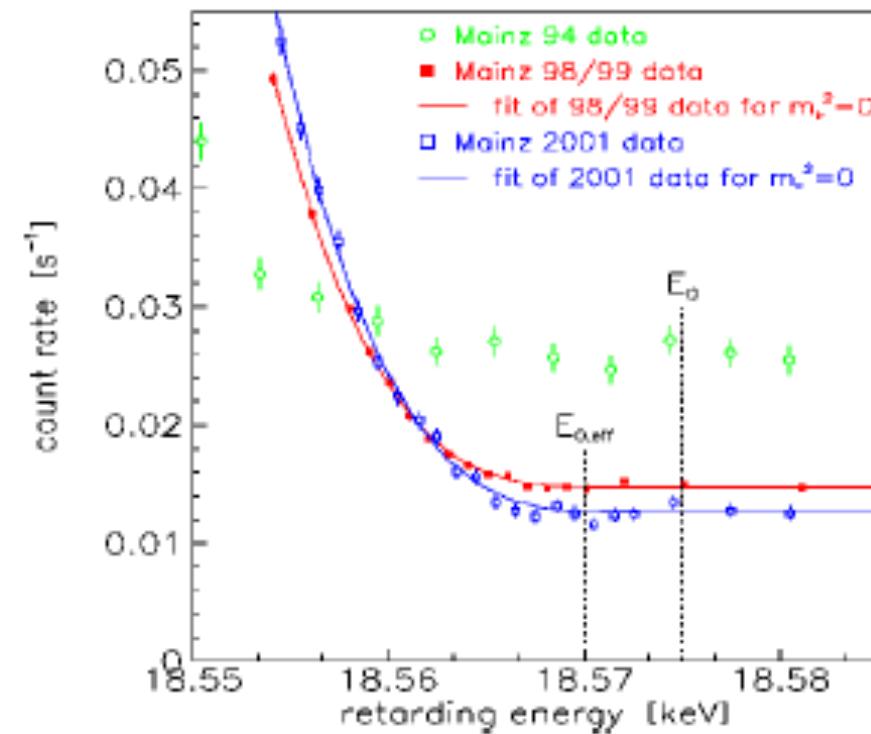
■ X.2. Mesures directes de la masse du neutrino

- L'expérience de Mainz – résultats

2005: $m_{\nu_e}^{eff} < 2.3 \text{ eV}$ at 95% CL

$$m_{\nu_e}^{eff^2} = -0.6 \pm 2.2 \pm 2.1 \text{ eV}^2$$

C.Kraus et al., Eur. Phys. J. C40 (2005) 447



Chapitre X: Propriétés des neutrinos

■ X.2. Mesures directes de la masse du neutrino

- L'expérience de Troitsk (Moscou)

Même principe que l'expérience de Mainz mais avec une source de tritium gazeux.

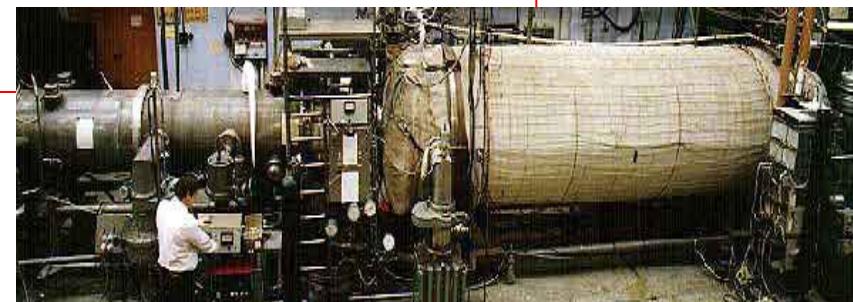
2011 : $m_{\nu_e}^{eff} < 2.12 \text{ eV}$ at 95% CL (Bayesian statistics)

$m_{\nu_e}^{eff} < 2.05 \text{ eV}$ at 95% CL (Feldman et Cousins)

$$m_{\nu_e}^{eff^2} = -0.67 \pm 2.53 \text{ eV}^2$$

V.N.Aseev et al. Phys. Rev. D 84 (2011) 112003

Ces deux expériences ont atteint leur limite de sensibilité O(2 eV).



Chapitre X: Propriétés des neutrinos

■ X.2. Mesures directes de la masse du neutrino

- Future expérience: KATRIN
(Karlsruhe Tritium Neutrino experiment)

Même concept que l'expérience de Mainz avec:

- Un spectromètre beaucoup plus grand
- Une résolution en énergie de 0.9 eV
- Une réduction des erreurs systématiques
- Une source de tritium beaucoup plus intense: 10^{10} désintégrations β/s acceptées par le spectromètre → réduction de l'erreur statistique

Sensibilité: $m_{\nu_e}^{eff} < 0.2 \text{ eV}$ si $m_{\nu_e}^{eff} = 0$: amélioration d'un facteur 10

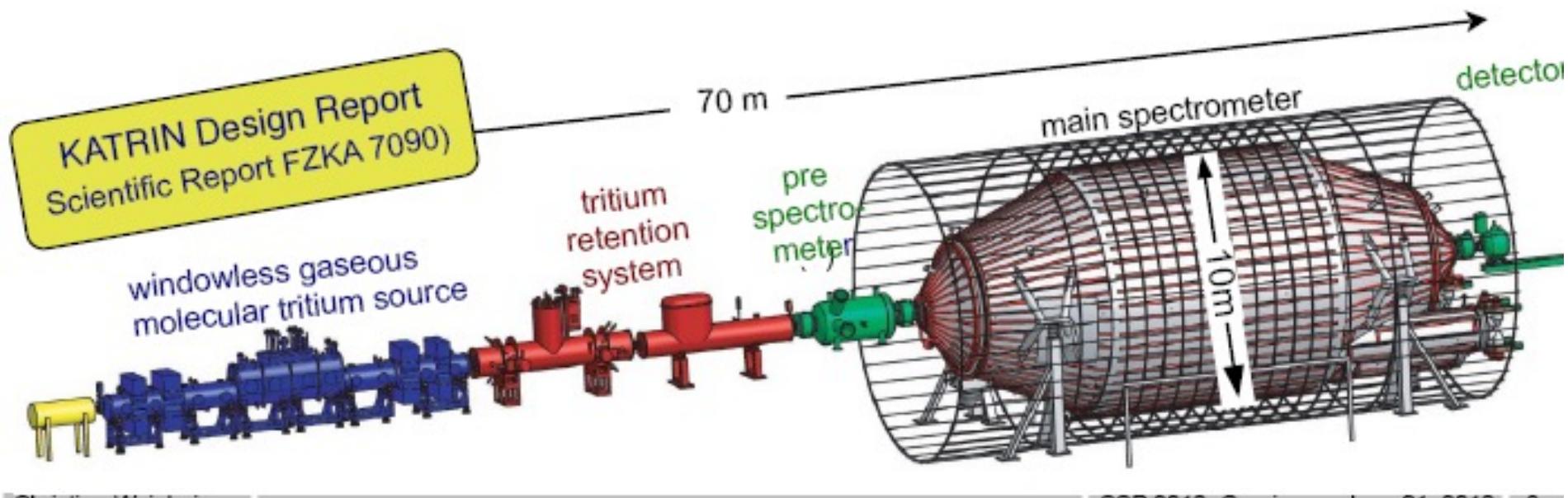
⇒ Amélioration d'un facteur 100 sur $m_{\nu_e}^{eff}$

Mesure de $m_{\nu_e}^{eff} \neq 0$ à 5σ si $m_{\nu_e}^{eff} > 0.35 \text{ eV}$

$\sigma_{stat} \sim \sigma_{syst}$ attendu après 3 années de prise de données

■ X.2. Mesures directes de la masse du neutrino

□ Future expérience: KATRIN



Chapitre X: Propriétés des neutrinos

■ X.2. Mesures directes de la masse du neutrino

□ Future expérience: KATRIN

- Va améliorer la sensibilité d' un ordre de grandeur
- Va étudier tout le domaine de masse d' intérêt pour la cosmologie
- Pourra chercher d' éventuels neutrinos stériles

Statut:

- Depuis Mai 2013: Mise en route et tests des différents éléments du détecteur et études de bruits de fond
- Début 2017: début de la prise de données pour 5-6 ans (= 3 années complètes de prise de données)
- Resultats depuis 2019 : voir les slides suivantes

Chapitre X: Propriétés des neutrinos

Résultats en 2019:

■ 274 scans of tritium β -decay spectrum:

- alternating up- / down- scans
- 2 h net scanning time
- analysis: 27 HV set points
- [$E_0 - 40$ eV , $E_0 + 50$ eV]

↓

FSD

↓

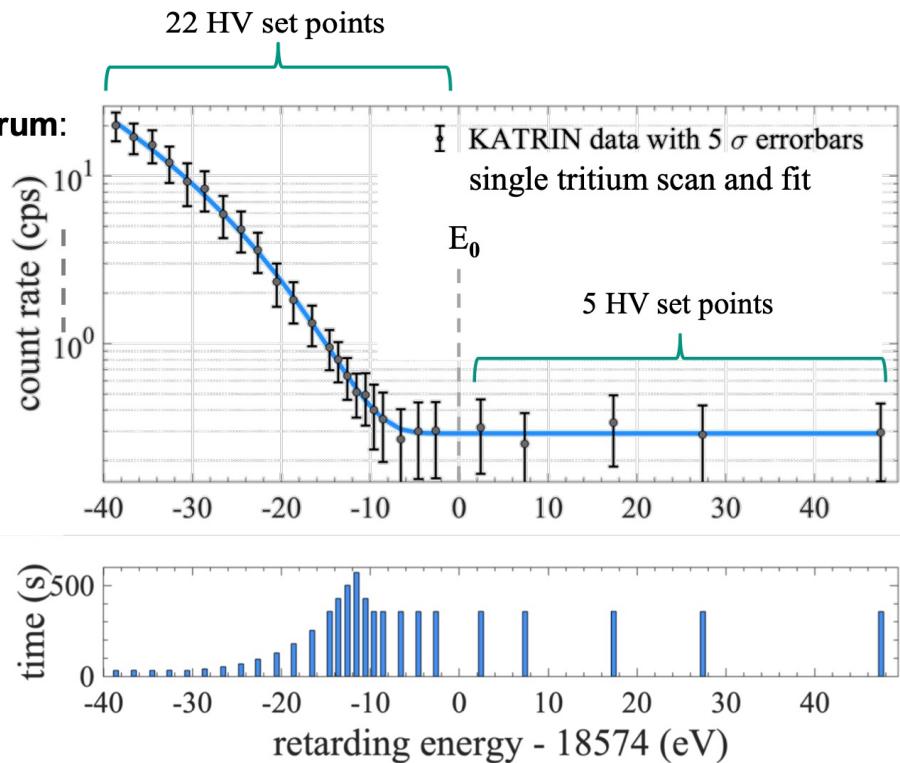
bg-slope

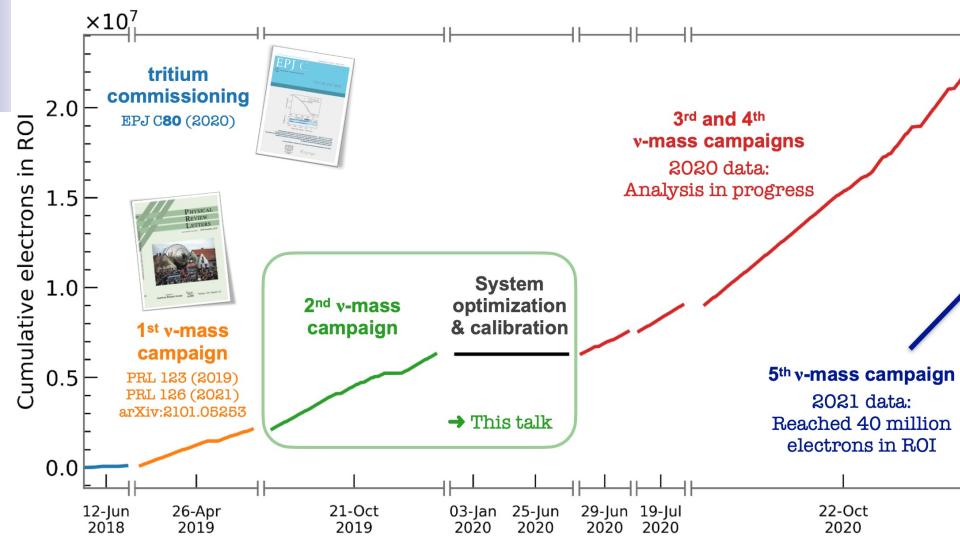
■ MTD maximises ν -mass sensitivity

- focus on region close to E_0

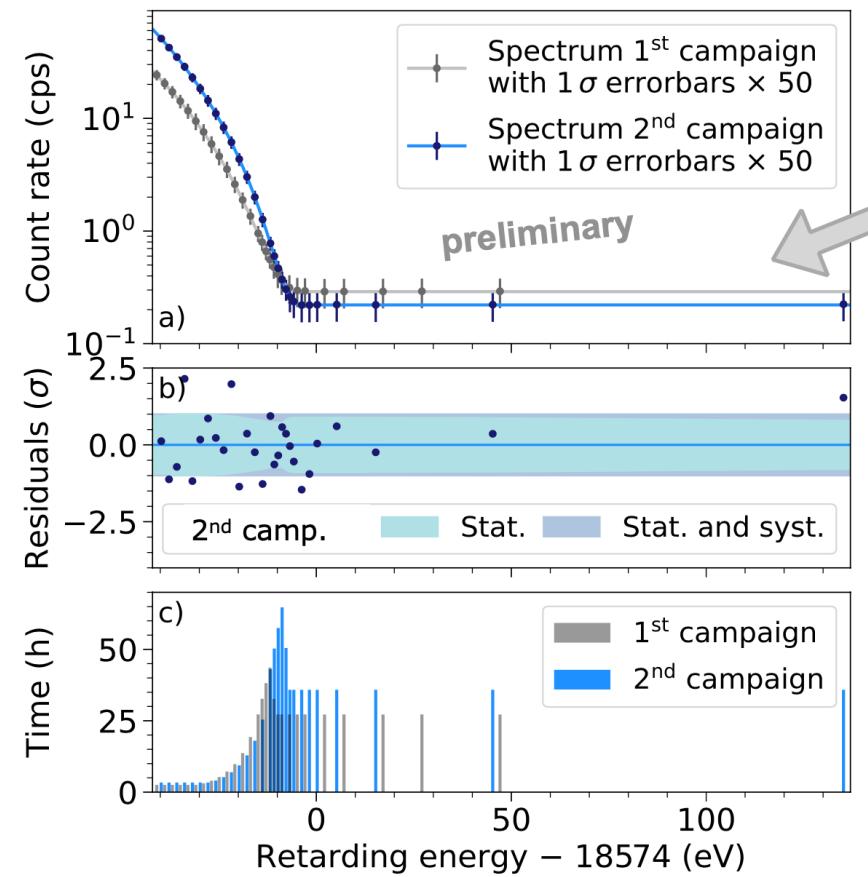
■ ν -mass and E_0 : best fit results

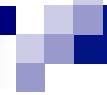
$$m^2(\nu_e) = \left(-1.0^{+0.9}_{-1.1} \right) \text{eV}^2 \text{ (90% CL)}$$





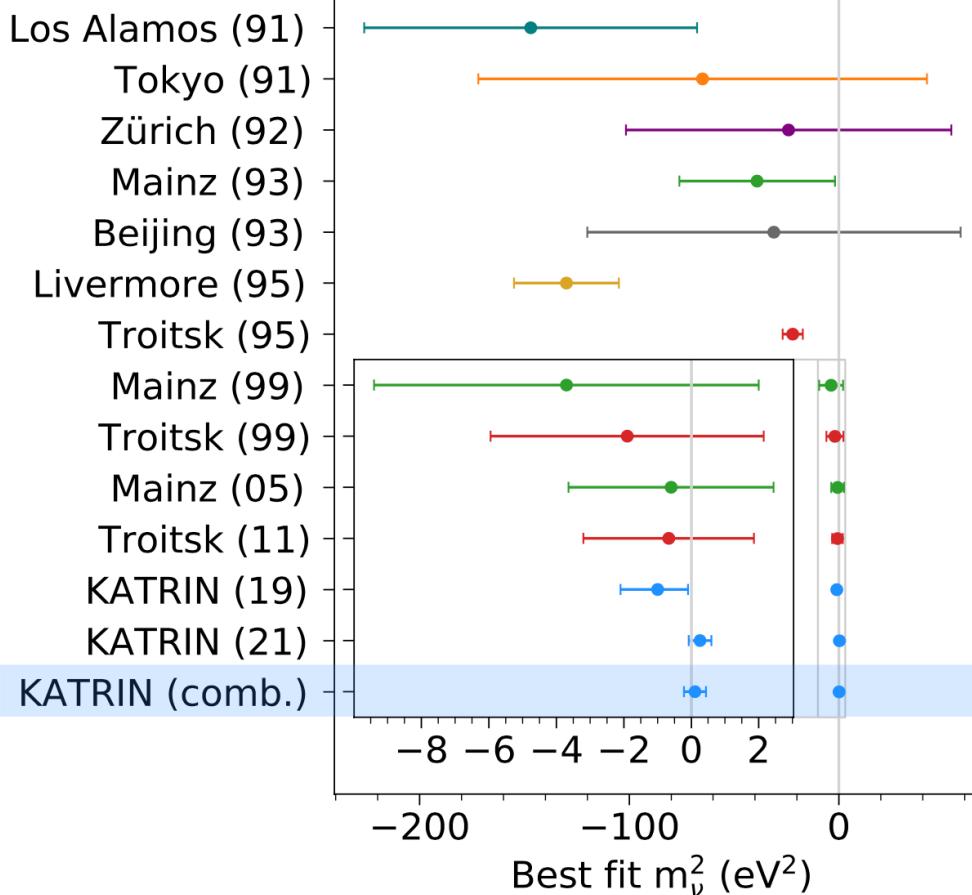
	1 st campaign PRL 123 (2019)	2 nd campaign This talk
Campaign date	April-May 2019	Sept-Nov 2019
Total scan time	522 h (274 scans)	744 h (361 scans)
Background	290 mcps	reduction -25% → 220 mcps
Source activity	25 GBq	nominal activity → 98 GBq
Tritium purity	97.6%	raised purity → 98.7%
Electrons in ROI	2 Mio	stats doubled → 4.3 Mio





30-year retrospective on tritium experiments

Experiment (year)



Instrument development
+ dedicated systematics experiments
+ theoretical model

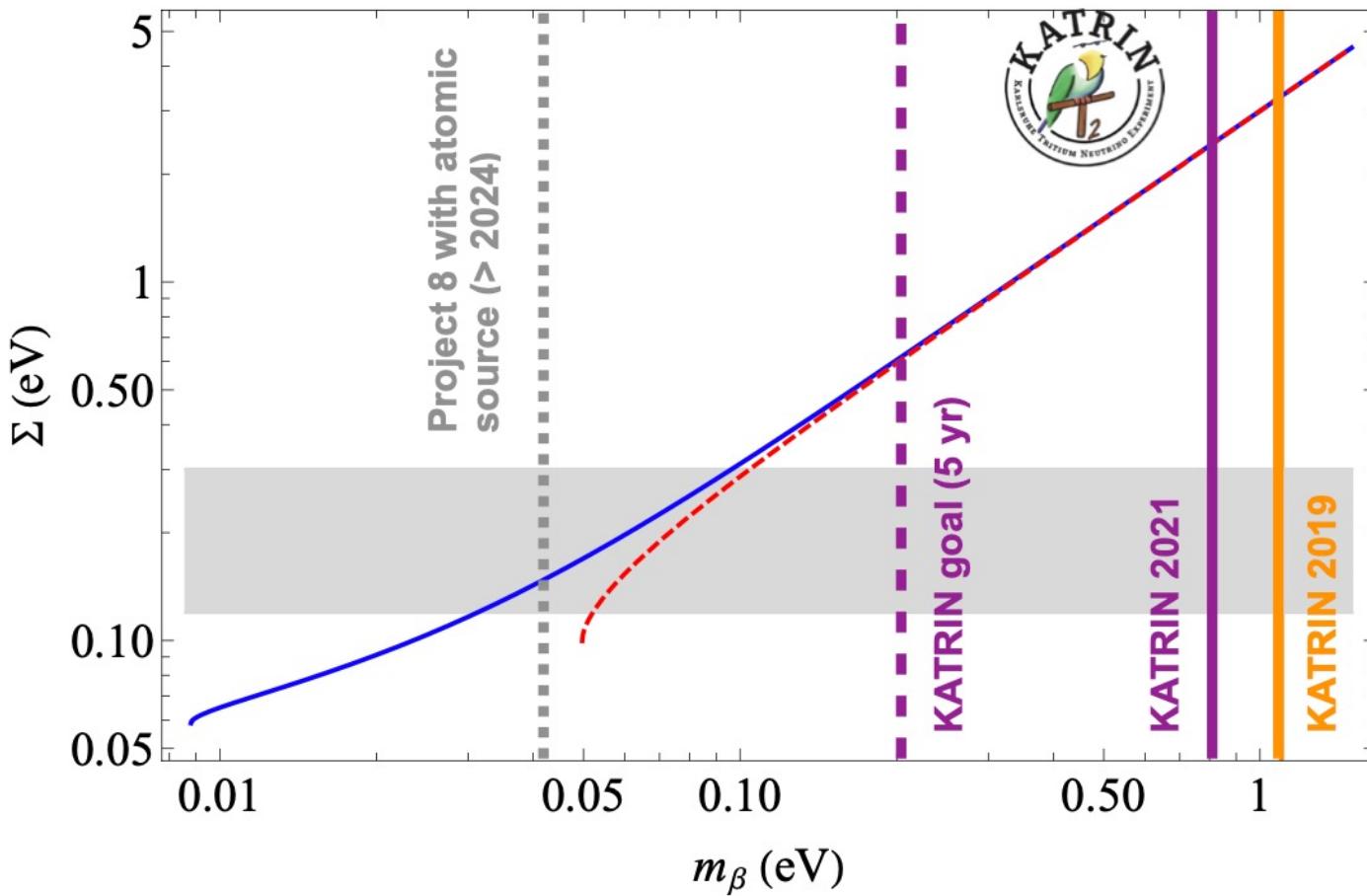
Scale-up & further development
of MAC-E technique
with gaseous source

KATRIN (2021): first direct neutrino-mass
experiment to reach sub-eV sensitivity

Combined result: $m_{\nu}^2 = (0.1 \pm 0.3) \text{ eV}^2$

Combined limit: $m_{\nu} < 0.8 \text{ eV}$ (90% CL)

Σ as a function of $m\beta$, for both the normal (blue,solid) and inverted (red,dashed) mass orderings. We use the current best-fit values of the oscillation parameters from arXiv 2007.14792 (2020)



<- Grey zone:
range of 95% CL
upper bounds on Σ
from cosmology
(arXiv:1907.12598,
2020)

Chapitre X: Propriétés des neutrinos

■ X.3. Recherche de doubles désintégrations β sans ν

- introduction

$m_\nu \neq 0 \Rightarrow$ on n'a plus nécessairement $\nu \neq \bar{\nu}$.

Question qui se pose:

Neutrino de Dirac: $\nu \neq \bar{\nu}$, comme les autres fermions?

ou

Neutrino de Majorana: $\nu = \bar{\nu}$?

Au début, dans l'hypothèse $m_\nu = 0$, le fait que certaines réactions étaient observées avec un ν incident mais pas avec un $\bar{\nu}$ incident (ou l'inverse), a conduit à penser que $\nu \neq \bar{\nu}$.

Chapitre X: Propriétés des neutrinos

■ X.3. Recherche de doubles désintégrations β sans ν

□ Introduction

Exemples:

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

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

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

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p$$

mais: $\nu_\mu + p \cancel{\rightarrow} \mu^+ + n$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

$$\bar{\nu}_\mu + p \rightarrow \mu^+ + n$$

mais: $\bar{\nu}_\mu + n \cancel{\rightarrow} \mu^- + p$

Les observations ci-dessus semblent indiquer que $\nu \neq \bar{\nu}$.

Mais alors, qu'est-ce qui différencie le ν et le $\bar{\nu}$?

Si $m_\nu = 0$ cela peut être leur hélicité, puisque $h_\nu = -1$ et $h_{\bar{\nu}} = +1$

Si $m_\nu \neq 0$ ce n'est plus possible car h n'est plus un invariant.

Chapitre X: Propriétés des neutrinos

■ X.3. Recherche de doubles désintégrations β sans ν

□ Introduction

Ce qui différencie ν et $\bar{\nu}$: L_e ou L_μ ou L_τ .

Mais L est introduit dans le MS, pour justifier que certaines réactions ne se produisent pas.

Ce pourrait être la même particule qui est produite dans la désintégration du π^+ et dans celle du π^- , avec des hélicités différentes. Il "suffirait" d'une transformation de Lorentz suffisamment rapide pour modifier l'hélicité de la particule produite. Renversement d'hélicité: jamais observé.

Mais m_ν si petit que $\gamma \sim 10^6 - 10^{12} \rightarrow$ impossible en pratique.

Chapitre X: Propriétés des neutrinos

■ X.3. Recherche de doubles désintégrations β sans ν

- Introduction

L'hypothèse d'un neutrino de Majorana a actuellement la faveur des théoriciens.

Le démontrer expérimentalement est très difficile. La seule possibilité envisagée actuellement est d'observer une double désintégration β sans émission de neutrino, ce qui conduirait du même coup à une estimation de la masse de cet hypothétique neutrino de Majorana.

Chapitre X: Propriétés des neutrinos

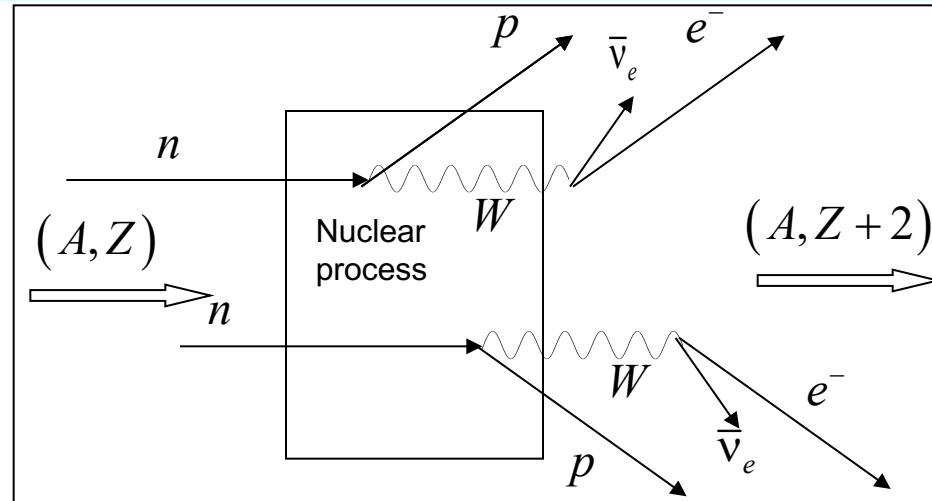
■ X.3. Recherche de doubles désintégrations β sans ν

□ Double désintégration β avec neutrinos

La double désintégration β avec émission de 2 ν est un processus autorisé et observé pour une trentaine de noyaux radioactifs:

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + 2 e^- + 2 \bar{\nu}_e \quad \Delta L = 0$$

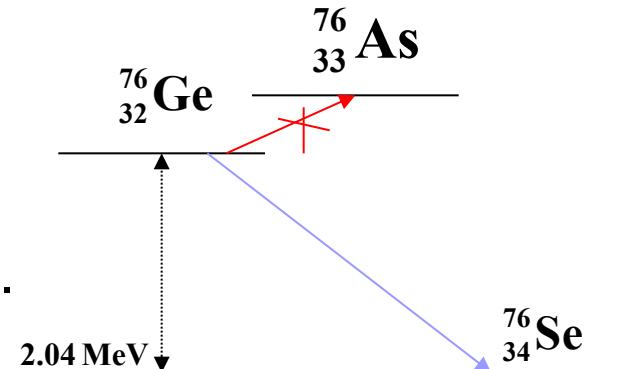
interaction faible du 2nd ordre du MS



Chapitre X: Propriétés des neutrinos

- X.3. Recherche de doubles désintégrations β sans ν
 - Double désintégration β avec neutrinos

Pour qu'elle puisse se produire, outre que l'énergie de liaison de $(A,Z+2)$ doit être plus grande que celle de (A,Z) , il faut que la simple désintégration β , processus au 1^{er} ordre, soit empêchée; cela se produit si l'énergie de liaison de $(A,Z+1)$ est plus petite que celle de (A,Z) . Exemple: le germanium.



Chapitre X: Propriétés des neutrinos

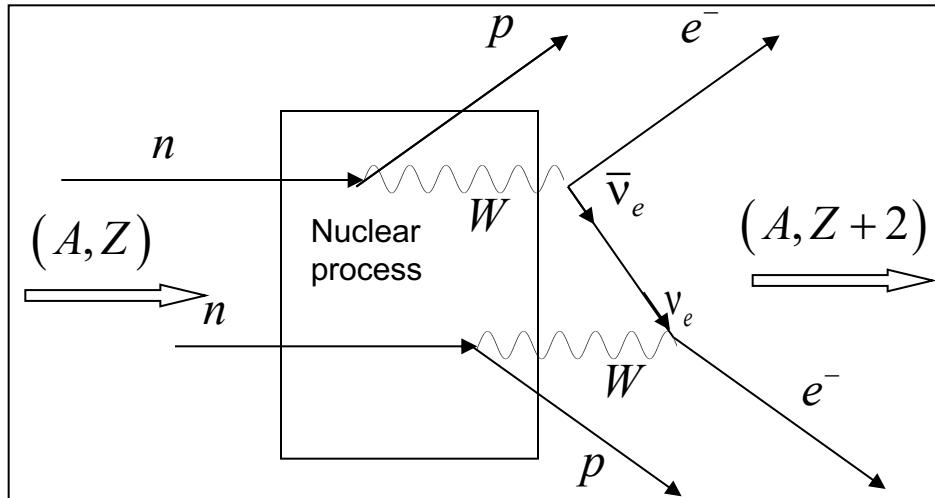
■ X.3. Recherche de doubles désintégrations β sans ν

- Double désintégration β sans neutrinos

La double désintégration β sans émission de ν est un processus interdit dans le SM:

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + 2 e^- \quad \Delta L = 2$$

interdit pour un ν de Dirac (SM), permis pour un ν de Majorana



$\bar{\nu}_e$ émis à un vertex absorbé
comme ν_e à l'autre vertex
 $\Rightarrow \bar{\nu}_e \equiv \nu_e$
 $\Rightarrow \nu$ de Majorana

Chapitre X: Propriétés des neutrinos

■ X.3. Recherche de doubles désintégrations β sans ν

- Double désintégration β sans neutrinos

En outre, pour rendre compte des réactions interdites, le neutrino qui couple aux leptons dans les interactions à CC est de chiralité gauche et celui qui couple aux antileptons est de chiralité droite.

Dès lors, pour que la désintégration double β sans ν puisse se produire, il faut aussi

$$\bar{\nu}_\rho \text{ émis comme } \nu_R \quad \Rightarrow \quad \nu_e \text{ absorbé comme } \nu_L$$

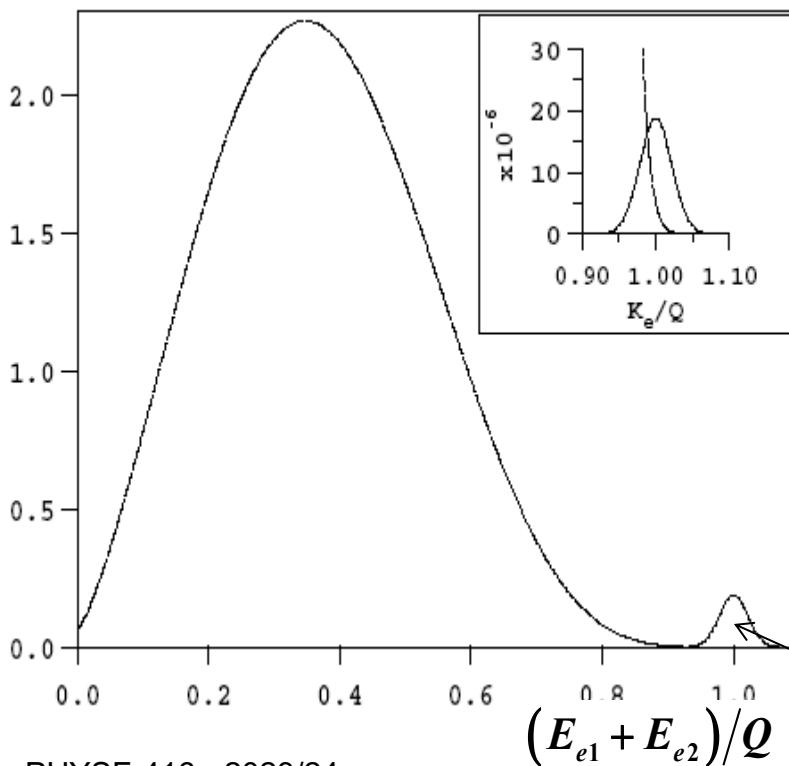
Cette transition n'est pas prévue pour un ν de masse nulle pour lequel chiralité et hélicité sont confondues et pour lequel il n'est pas possible de modifier son hélicité par une T.L.

Chapitre X: Propriétés des neutrinos

■ X.3. Recherche de doubles désintégrations β sans ν

□ Double désintégration β sans neutrinos

Si la masse du neutrino est non nulle:



- Pour qu'il n'y ait pas de ν dans l'état final, il faut soit:

$\bar{\nu}_e$ émis comme ν_R avec $h = -1$;

ν_e absorbé comme ν_L avec $h = +1$;

- L'amplitude de transition d'une hélicité vers l'autre : $\propto O(m_\nu/E)$

$$\Rightarrow m_\nu \neq 0 \text{ et le taux : } \Gamma \propto \left(m_{\nu_e}^{eff} \right)^2$$

$$\text{ou } T^{1/2} \propto \frac{1}{\left(m_{\nu_e}^{eff} \right)^2}$$

Signal éventuel

Chapitre X: Propriétés des neutrinos

■ X.3. Recherche de doubles désintégrations β sans ν

□ Méthodes expérimentales

Des désintégrations double- β avec ν ont été observées pour près des 35 isotopes susceptibles d'en avoir. Parmi eux, seuls 11 ont une valeur $Q > 2$ MeV permettant d'espérer détecter un éventuel signal sans ν

Isotope	nat. abund. (%)	Q-value (keV)	Experiment
^{48}Ca	0.187	4262 ± 0.84	CANDLES
^{76}Ge	7.8	2039.006 ± 0.050	GERDA, MAJORANA
^{82}Se	9.2	2997.9 ± 0.3	SuperNEMO, LUCIFER
^{96}Zr	2.8	3347.7 ± 2.2	-
^{100}Mo	9.6	3034.40 ± 0.17	AMoRE, LUMINEU, MOON
^{110}Pd	11.8	2017.85 ± 0.64	-
^{116}Cd	7.5	2813.50 ± 0.13	COBRA, CdWO ₄
^{124}Sn	5.64	2292.64 ± 0.39	-
^{130}Te	34.5	2527.518 ± 0.013	CUORE
^{136}Xe	8.9	2457.83 ± 0.37	EXO, KamLAND-Zen, NEXT
^{150}Nd	5.6	3371.38 ± 0.20	SNO+, MCT



Ch. Weinheimera,
Kai Zuberb
[arXiv:1307.3518](https://arxiv.org/abs/1307.3518)

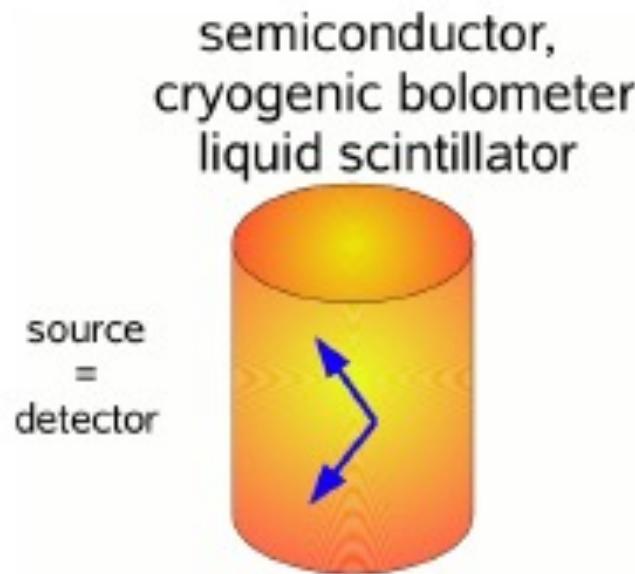


Chapitre X: Propriétés des neutrinos

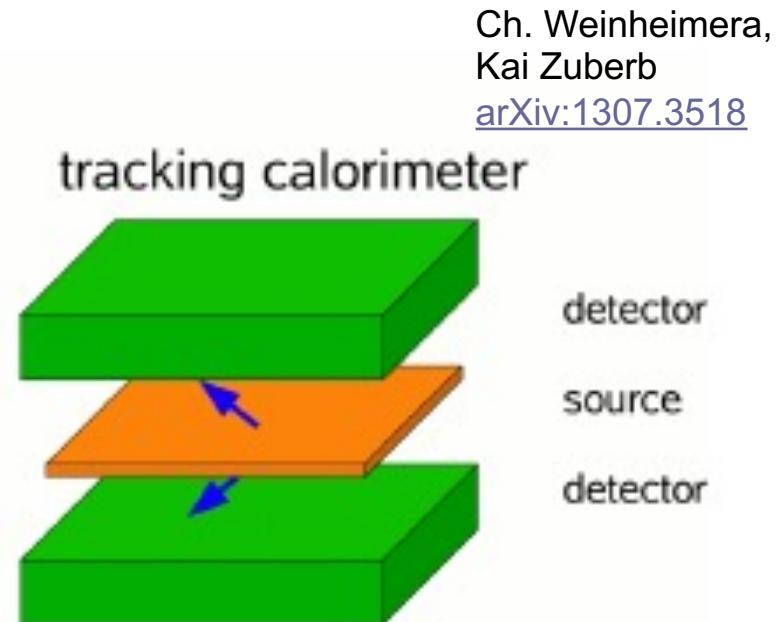
■ X.3. Recherche de doubles désintégrations β sans ν

□ Méthodes expérimentales

Deux approches:



mesure que la somme de l'énergie des 2 e.
apporte actuellement les résultats les plus précis



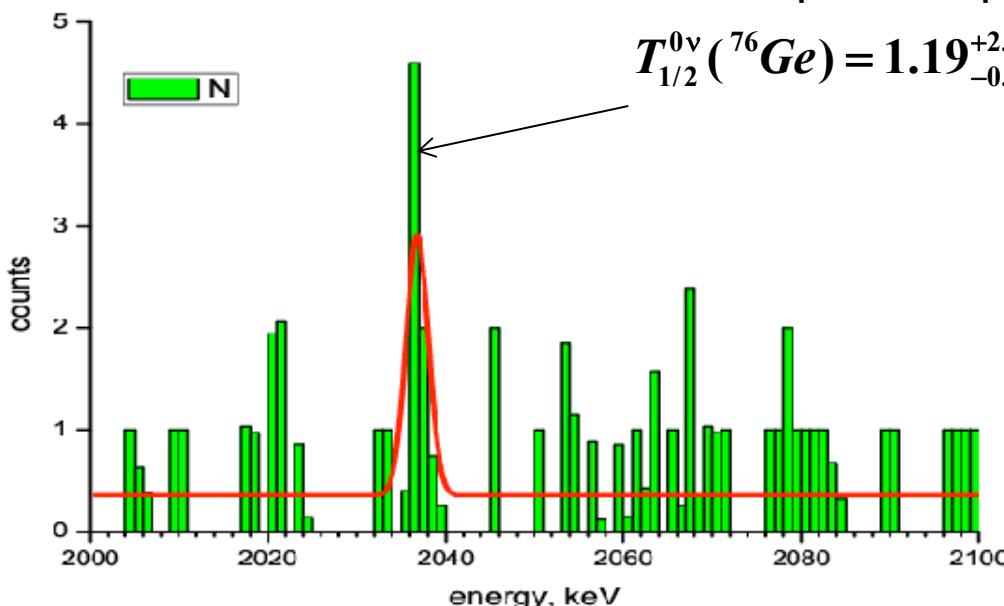
Chapitre X: Propriétés des neutrinos

- X.3. Recherche de doubles désintégrations β sans ν
 - Un seul résultat positif:

Moscow-Heidelberg au Gran Sasso

Seule observation d'un signal possible,
récusé par une partie de la collaboration:

$$T_{1/2}^{0\nu}({}^{76}\text{Ge}) = 1.19_{-0.50}^{+2.99} \times 10^{25} \text{ y} \Rightarrow \langle m_\nu \rangle = 0.2 - 0.6 \text{ eV} \quad ???$$



Suspect et non
confirmé par les
résultats les plus
récents les plus
précis.

Mod. Phys. Lett. A. 2006. V.21. P. 1547-1566

Chapitre X: Propriétés des neutrinos

■ X.3. Recherche de doubles désintégrations β sans ν

□ Exo-200 (New Mexico, USA)

Détecteur sous-terrain

TPC remplie de Xe liquide
enrichi en ^{136}Xe

Double mesure de l'énergie:

- Mesure de l'ionisation (fils)

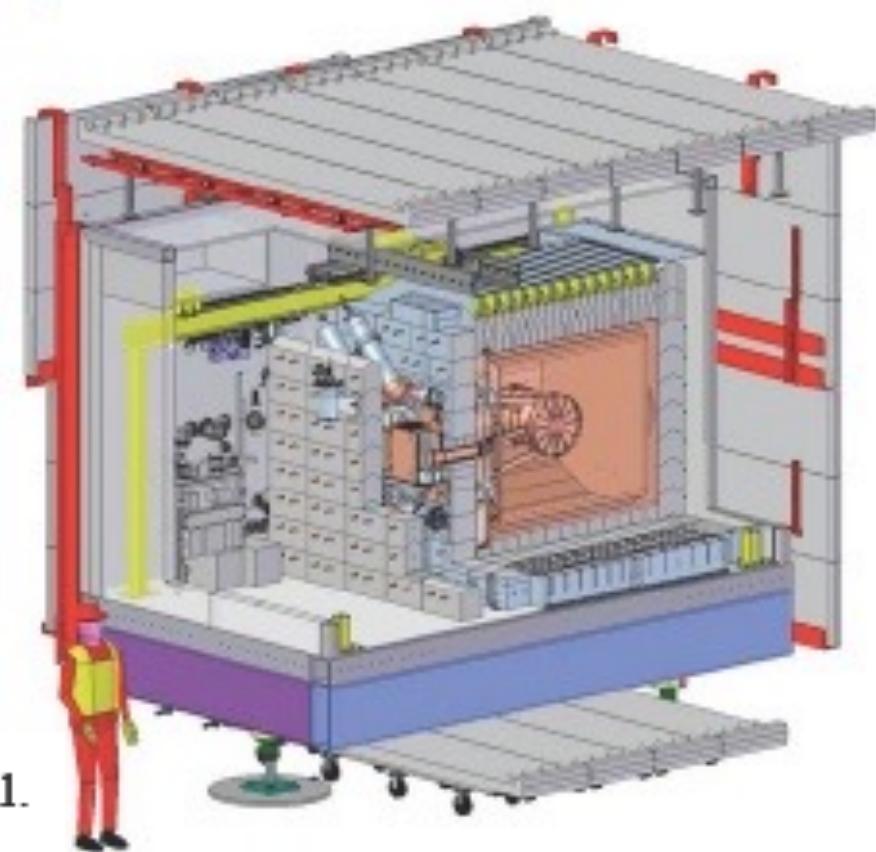
- Mesure de la scintillation
(photodiode à avalanche)

Dans cryostat de protection

Veto des μ cosmiques

Matériaux très purs

(radioactivité!)



$$T_{1/2}^{0\nu}(^{136}\text{Xe}) > 1.1 \cdot 10^{25} \text{ yr} \text{ @ 90\% c.l.}$$

→ $m_{\text{Majorana}} < 190 - 450 \text{ meV}$

Chapitre X: Propriétés des neutrinos

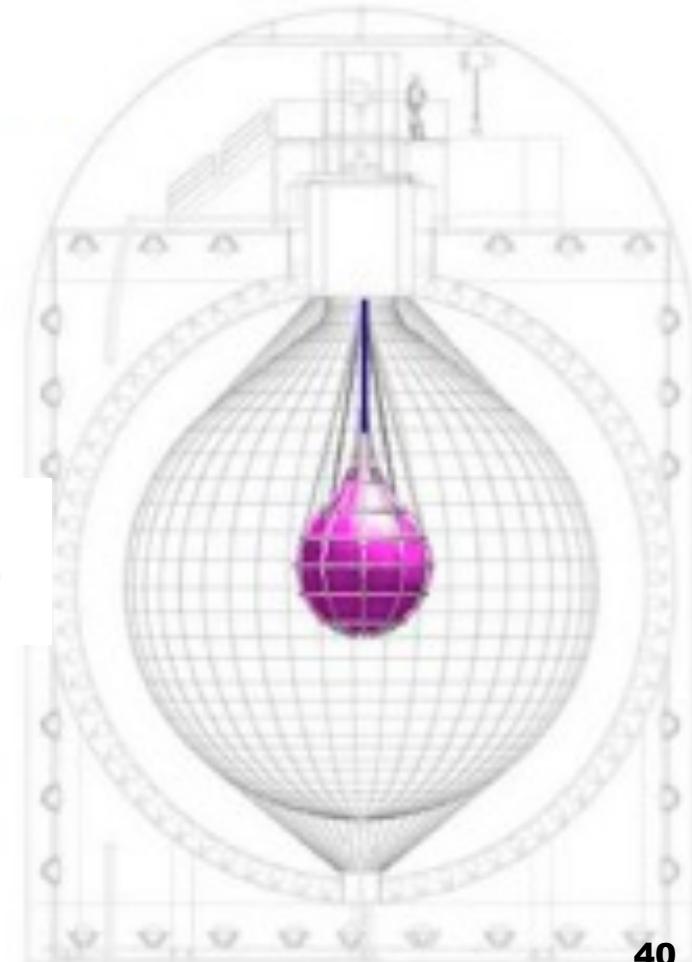
■ X.3. Recherche de doubles désintégrations β sans ν

- KamLAND-Zen
- DéTECTEUR KamLAND – déjà décrit
- + ballon en nylon – 3 m ø – rempli de 13 T de scintillateur liquide doppé au Xe dont 179 kg de ^{136}Xe

$$T_{1/2}^{0\nu}(^{136}\text{Xe}) > 1.9 \times 10^{25} \text{ yr} \quad @ \text{ 90\% c.l.}$$

Phys. ReX. Lett. 110, 062502 (2013)

$t_{1/2} > 10,7 \times 10^{25} \text{ yr}$ (2016)



Chapitre X: Propriétés des neutrinos

- X.3. Recherche de doubles désintégrations β sans ν
 - GERDA



Cryostat à Argon liquide



~ K.H. Ackermann et al. Eur. Phys. J. C 73 (2013) 908 2330

Chapitre X: Propriétés des neutrinos

■ X.3. Recherche de doubles désintégrations β sans ν

- GERDA

Résultat de GERDA (Run 1):

$$t_{1/2}(^{76}\text{Ge}) > 2.1 \times 10^{25} \text{ yr} \quad \text{à 90\% de CL}$$

En incluant les résultats des expériences précédentes avec du Ge:

$$t_{1/2}(^{76}\text{Ge}) > 3.0 \times 10^{25} \text{ yr}$$

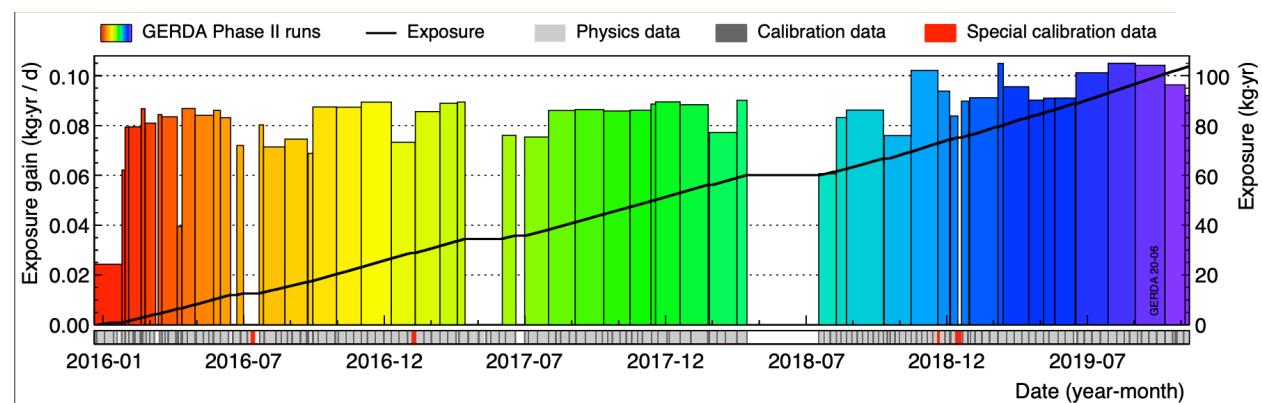
→ Incompatible avec le signal d'Heidelberg! (2013)

GERDA (Run 2) : $t_{1/2} > 8.0 \times 10^{25} \text{ yr}$ (2018 : arXiv:1803.11100)

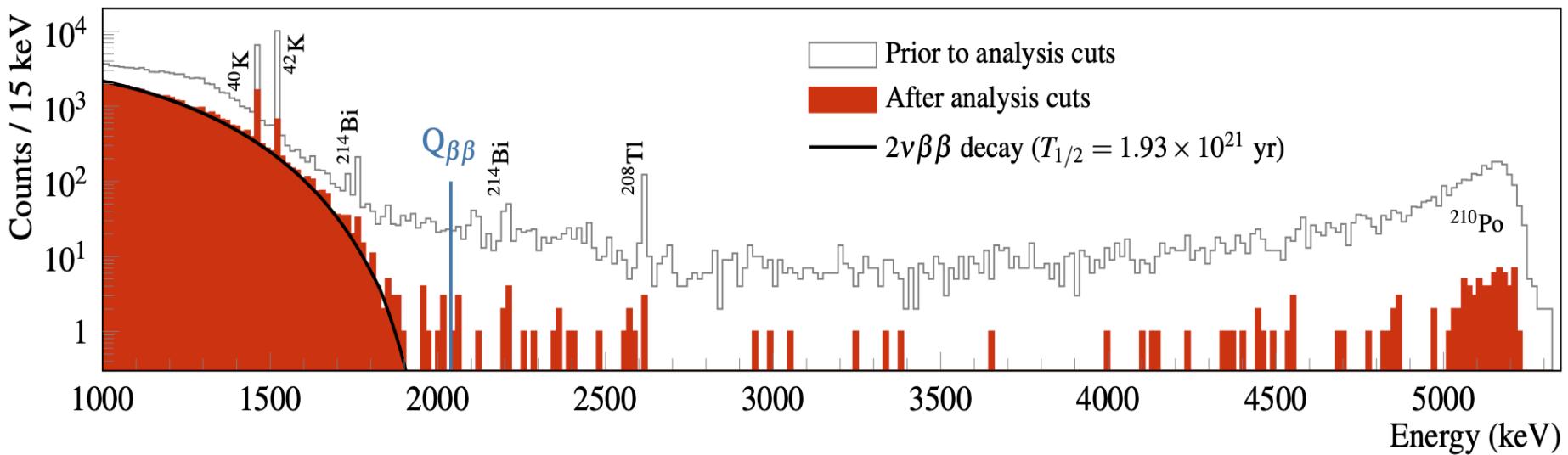
Prise des données depuis 2015

Neutrino2020 conference :

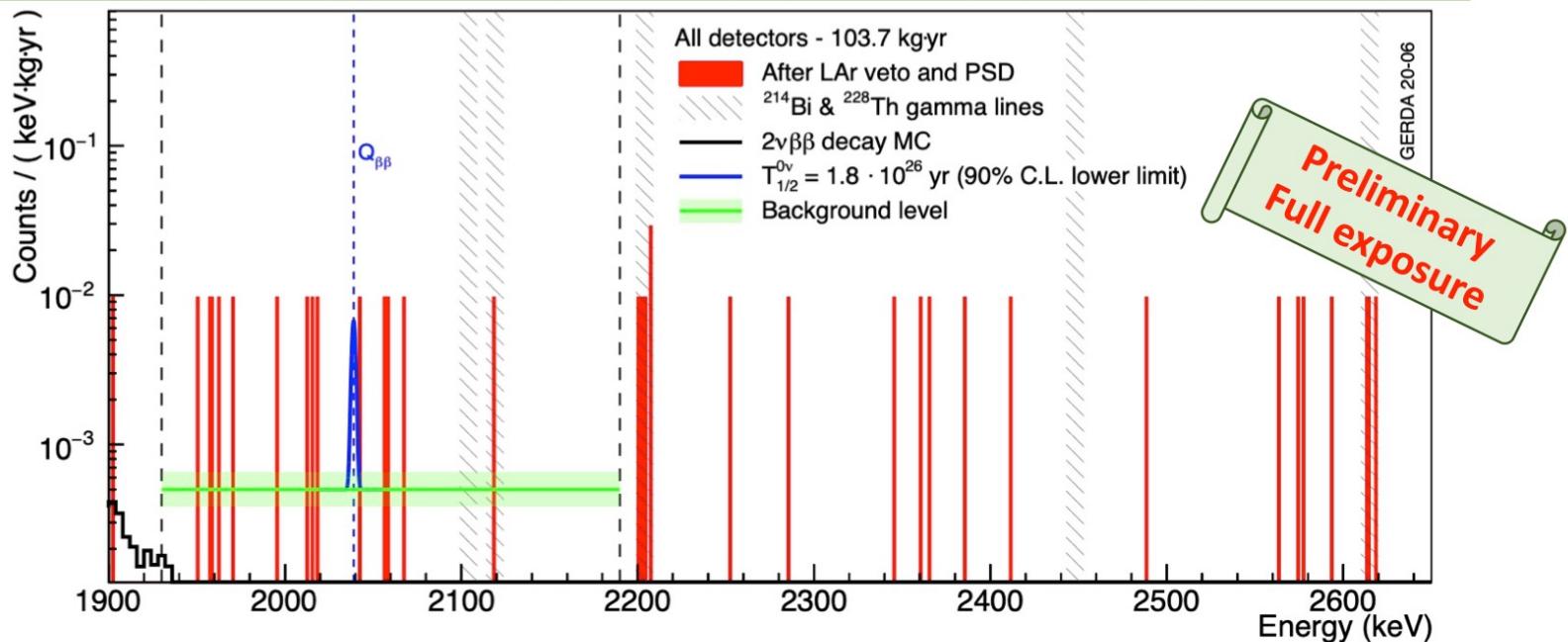
GERDA data taking
completed in Dec. 2019
– 104 kg.yr collected
no signal observed



$$Q_{\beta\beta} = 2039.06 \text{ keV}$$



$$Q_{\beta\beta} = 2039.06 \text{ keV}$$



Frequentist analysis*:

- Median sensitivity for limit setting:
 $1.8 \times 10^{26} \text{ yr (90\% C.L.)}$
 - Best fit → no signal
 - 90% C.L. lower limit:
 $T_{1/2}^{0\nu} > 1.8 \times 10^{26} \text{ yr}$

Bayesian analysis with uniform prior*:

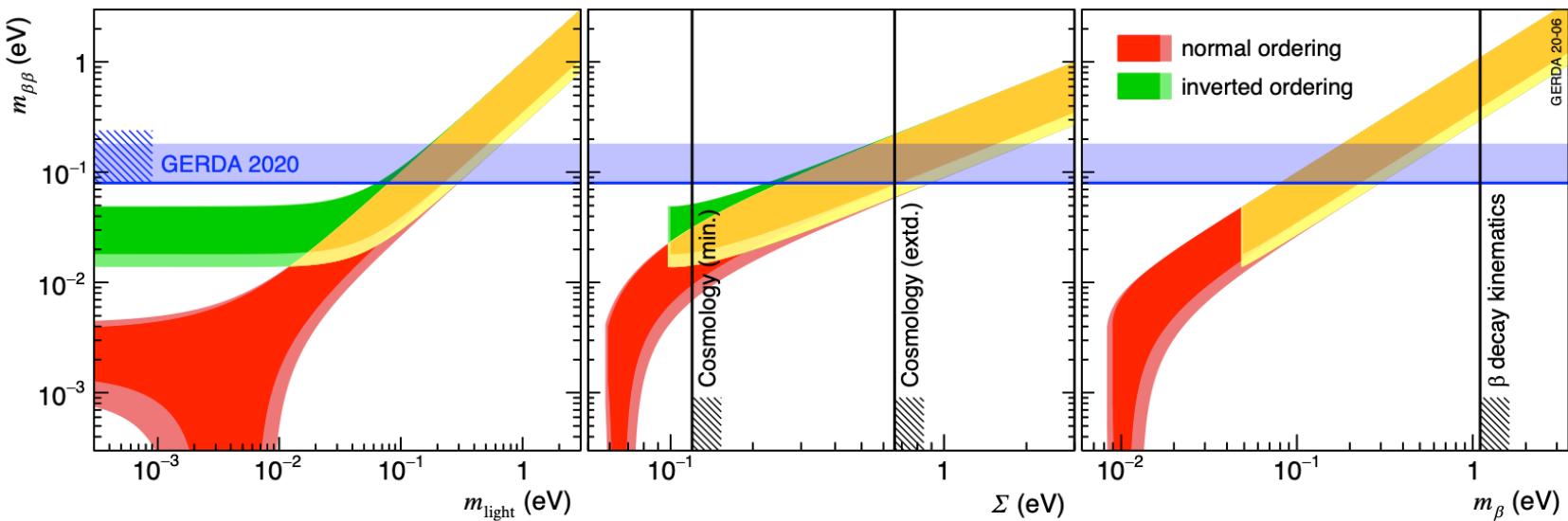
- Median sensitivity for limit setting:
 $1.4 \times 10^{26} \text{ yr (90\% C.I.)}$
 - $T_{1/2}^{0\nu} > 1.4 \times 10^{26} \text{ yr (90\% C.I.)}$

arXiv:2009.06079 (nucl-ex)
[Sep 2020]

Upper limit on $m_{\beta\beta}$ within 3 ν flavor model

$$1/T_{1/2}^{0\nu} = g_A^4 G^{0\nu} |M^{0\nu}|^2 \frac{\langle m_{\beta\beta} \rangle^2}{m_e^2}$$

- Lower 90% C. L. limit: $T_{1/2}^{0\nu} > 1.8 \times 10^{26} \text{ yr}$
- Converted into upper limit on: $m_{\beta\beta} < [80 - 182] \text{ meV}$
- Other inputs:
 - $g_A = 1.27$
 - ${}^{76}\text{Ge NME} \in [2.66 - 6.04]$ min NME from Coraggio et al. 2020
max NME from Song et al. 2017



Chapitre X: Propriétés des neutrinos

■ X.4. Limites cosmologiques

Les limites imposées par les mesures cosmologiques sont le sujet d'un cours de cosmologie, trop complexe pour être traité ici, mais trop important pour être tu car le modèle cosmologique du big-bang et les nombreuses mesures cosmologiques permettent de mettre une limite sur la somme des masses des neutrinos:

Voir slide 26 :

$$m_1 + m_2 + m_3 < 0.12-0.3 \text{ eV/c}^2$$

arXiv:2102.00594v2

Dépend des
modèles
cosmologiques!

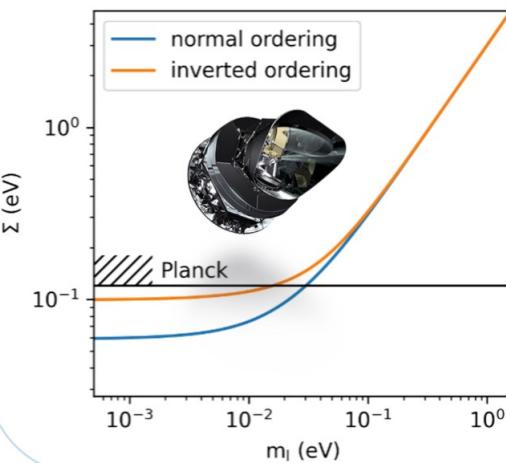
Très grossièrement, ces limites sont déduites de la mesure de certaines observables telles que la densité de galaxies. Comme les neutrinos étaient très nombreux au moment de la formation des agrégats de matière, ils ont dû avoir une influence sur ces observables, qui dépend de leur masse.

Chapitre X: Propriétés des neutrinos

Neutrino mass(es)

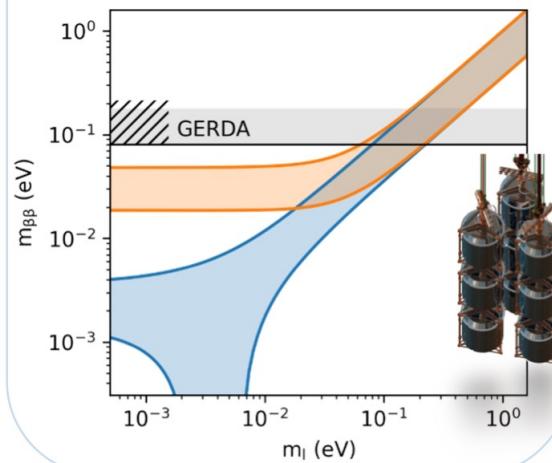
Cosmology

$$\Sigma = \sum_i m_i$$



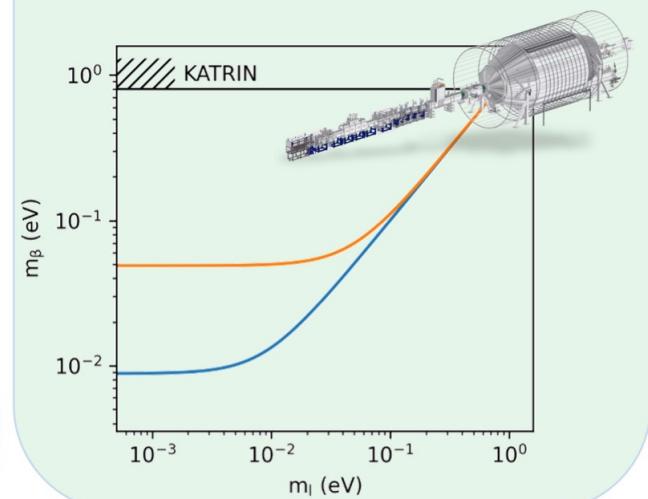
Neutrinoless $\beta\beta$ decay

$$m_{\beta\beta} = \sum_i |U_{ei}|^2 \cdot m_i$$



β -decay kinematics

$$m_\nu^2 / \beta = \sum_i |U_{ei}|^2 \cdot m_i^2$$



Chapitre X: Propriétés des neutrinos

■ X.5. Conclusions et questions ouvertes

- L'observation des oscillations de neutrinos et la mesure des Δm^2 implique qu'au moins 2 neutrinos ont une masse non nulle:

$$m_i > \sqrt{\Delta m_{21}^2} = 0.009 \text{ eV}$$

$$m_k > \sqrt{|\Delta m_{32}^2|} = 0.05 \text{ eV}$$

- Les mesures directes ne donnent encore que des limites supérieures de l'ordre de 0.8 eV (90%CL)
- Les données cosmologiques sont plus contraignantes mais dépendent de modèles complexes

$$m_1 + m_2 + m_3 < 0.12-0.3 \text{ eV/c}^2$$

- Si le ν est de Majorana $m_{\nu_\nu}^{eff} < 0.18 \text{ eV}$

Chapitre X: Propriétés des neutrinos

■ X.5. Conclusions et questions ouvertes

- Hiérarchie de masse encore inconnue:
 $m_3 \gg m_2 > m_1$ OU $m_3 \ll m_1 < m_2$?
- On ignore s'il y a violation de CP: $\delta = 0$?
Mais $\sin^2(2\theta_{13})$ étant mesuré différent de zéro, il devrait être possible de mesurer δ dans des expériences futures.
- Y a-t-il des neutrinos droits ou des anti-neutrinos gauches qu'on n'aurait jamais observés, parce qu'ils sont stériles ou trop massifs?
- Le neutrino est-il identique à son antiparticule (de Majorana) ou pas (de Dirac)?