

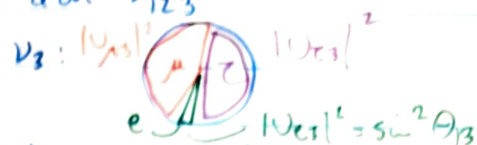
10

PROPRIÉTÉS DES ν

96

10.1 Contenus en saveur des états de masse

→ Probabilité de former un $\nu_{\mu e}$ à partir d'un ν_{123}



→ Hiérarchie de masse inconnue, résultats compatibles avec les 2.

→ 3 approches pour mesurer la masse des ν :

① La mesure directe: étude du spectre d'énergie des e^- dans la désintégration β du tritium

② Étude de double désintégration β sans ν dans l'état final, si le ν est "de Majorana".

③ Des mesure cosmologique liées à la matière noire.

10.2 Mesures directes de la m_ν

① Principe:

→ Mesure du spectre d'énergie des e^- dans la queue de désintégration du tritium:



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

↳ Si $m_{\nu_e} \neq 0$, alors $m_{\nu_e} = \frac{m_{\text{He}^3}}{m_{\text{H}^3}} (E_0 - \text{Max}(E_e)) \approx E_0 - \text{Max}(E_e)$

→ Mélange des neutrinos:

$$|\nu_e\rangle = \sum U_{ek} |\nu_k\rangle \Rightarrow m_{\nu_e}^{\text{eff}^2} = \sum |U_{ek}|^2 m_k^2$$

On mesure une combinaison de masse de ν_1, ν_2 et ν_3 .

↳ On devrait voir apparaitre des "coudeurs" dans la distribution à $E = m_{123}$.

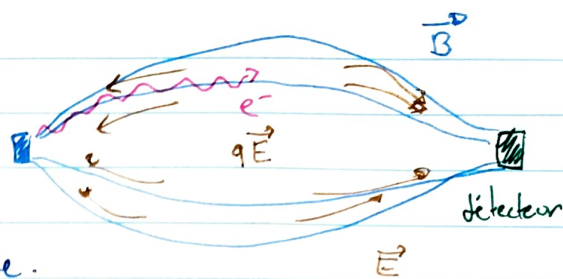
② Pourquoi le tritium:

→ E_0 basse, et $Z(^3\text{H})$ est le plus bas (structure simple)

→ Faible densité, grande activité de la source.

② L'expérience de Mainz - principe :

- Pour parvenir à traverser source de ${}^3\text{H}$ la barrière électrostatique, les e^- doivent avoir suffisamment d'énergie.
- On peut faire varier le potentiel V : on mesure le taux de comptage pour $E_e > V$



- Résultats: $m_{\nu_e}^{\text{eff}^2} = -0.6 \pm 2 \pm 2 \text{ eV}^2$ compatible avec 0

③ Expérience de Troitsk :

- Comme Mainz, avec une source de ${}^3\text{H}$ gazeux.
- Résultat: $m_{\nu_e}^{\text{eff}^2} = -0.7 \pm 2 \text{ eV}^2$

④ Expérience KATRIN (Jülich) :

- Comme Mainz, avec bcp + de précision (source intense, ...)
- Résultats: $m_{\nu_e}^{\text{eff}^2} < 0.2 \text{ eV}^2$

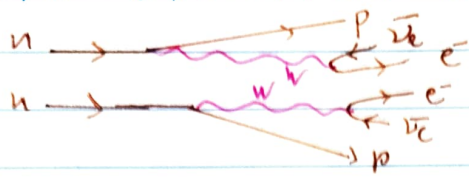
10.3 Recherche de double désintégration β sans ν

⑤ Introduction :

- Si $\nu \neq \bar{\nu}$, alors neutrino de Dirac
- Si $\nu = \bar{\nu}$, alors neutrino de Majorana
- ↳ Différences entre ν et $\bar{\nu}$:
 - hélicité ? non car $m \neq 0$
 - # leptonique ? pourrait qd n'être la m même particule, juste avec un hélicité \neq . Il faut alors faire une transfo de Lorentz pour renverser l'hélicité (jamais observé).

③ Double désintégration β avec des ν :

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

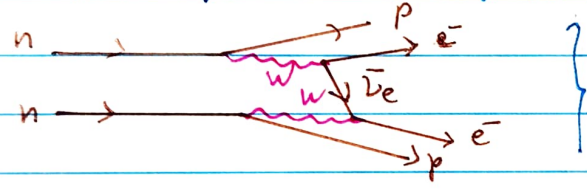


→ Pour se produire, il faut que :

- ① L'énergie de liaison $BE[(A, Z+2)] > BE[(A, Z)]$
- ② La désintégration β simple soit empêchée (si $BE[(A, Z+1)] < BE[(A, Z)]$)

④ Double désintégration β sans neutrino:

→ Interdit par le MS : $(A, Z) \rightarrow (A, Z+2) + 2e^-$ $\Delta L = 2$
mais permis si un ν de Majorana



} seulement si $\bar{\nu}_e = \nu_e$

→ Il faut aussi que $\bar{\nu}_e$ émis comme $\nu_e \rightarrow \nu_e$ absorbé comme ν_e
↳ Seulement possible si $m_\nu \neq 0$ (car l'hélicité n'est plus invariante sous transformation de Lorentz).

↳ $h(\bar{\nu}_e) = -1$ ($\bar{\nu}_e$ émis comme ν_e) et $h(\nu_e) = +1$ (ν_e émis comme ν_e)

→ Amplitude de transition d'une hélicité vers l'autre $\propto \mathcal{O}(m_\nu/E)$

→ $m_\nu \neq 0$ et le taux de désintégration $\Gamma \propto (m_{\nu_e}^{eff})^2$

$\Leftrightarrow \tau \propto (m_{\nu_e}^{eff})^{-2}$

⑤ Méthodes expérimentales:

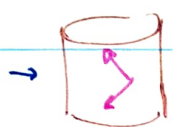
→ double- β ~~avec~~ ^{sans} ν observé pour 35 isotopes.

→ 2 approches:

semiconductor cryogenic bolometer

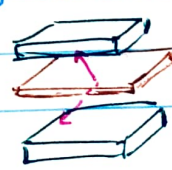
liquid scintillator

résultats + précis



source
détecteur

tracking calorimeter



détecteur
source

détecteur

101

⊙ Un seul résultat positif: (Germanium 76)

- Moscow-Heidelberg au Gran Sasso
 - ↳ 1 seule observation, non confirmée par des résultats + précis.

⊙ Exo-200: (Xenon 136)

- Détecteur sous-terrain à chambre de projection temporelle
 - Mesure de l'ionisation (par les fils de la TPC)
 - Mesure de la scintillation (par des PMT, lumière émise par le Xe liquide)
- Dans un cryostat de protection + veto sur les μ cosmiques.

⊙ KamLAND-ZEN: (Xenon 136)

- Ajout d'un ballon en nylon rempli de BT de scintillateur liquide doppé au Xe



⊙ GERDA: (Germanium 76)

- Cryostat à Ar liquide
- Résultats: incompatible avec le signal de Moscow-Heidelberg.
 - ↳ Limite inférieure sur la demi-vie du germanium associé à ce processus ($\alpha\beta\beta$): $T_{1/2}^{0\nu} > 2 \cdot 10^{26}$ ans

10.4 Limites cosmologiques

- Limites issues de la cosmologie:
 - sur la somme des masses des neutrinos:
$$m_1 + m_2 + m_3 < 0,3 \text{ eV}$$
Vient d'observables, telle que la densité de galaxies.

10.5 Conclusions et questions ouvertes

- L'observation des oscillations de ν et les mesures de $\Delta m^2 \Rightarrow$ au moins 2 ν ont une masse $\neq 0$:
 $m_i > \sqrt{\Delta m_{21}^2} = 0,009 \text{ eV}$ et $m_h > \sqrt{\Delta m_{32}^2} = 0,05 \text{ eV}$
- Mesures actuelles directes ne donnent que des limites supérieures
- Données cosmologiques: $m_1 + m_2 + m_3 < 0,3 \text{ eV}$
- Si ν de Majorana: $m_{\nu_e}^{\text{eff}} < 0,18 \text{ eV}$
- Hiérarchie encore inconnue: $m_3 \gg m_2 > m_1$ ou $m_3 \ll m_1 < m_2$?
- On ignore si violation CP, mais $\sin^2(2\theta_{13}) \neq 0$ donc on devrait pouvoir mesurer δ dans le futur.
- \exists ? ν_R ou $\bar{\nu}_L$ jamais observés?
- ν de Dirac ou de Majorana?