

Concept of Elementary Particle Physics

§20 Neutrino Masses and Mixings

KEK 班

Kobe university

November 17, 2025

目次

- ① §20.0 Prologue
- ② §20.1 Neutrino mass and β decay
- ③ §20.2 Adding neutrino mass to the Standard Model
- ④ §20.3 Measurements of neutrino flavor mixing

目次

- ① §20.0 Prologue
- ② §20.1 Neutrino mass and β decay
- ③ §20.2 Adding neutrino mass to the Standard Model
- ④ §20.3 Measurements of neutrino flavor mixing

ニュートリノ質量と世代間混合

- 今まで
 - ▶ 標準模型でニュートリノの質量が 0 と仮定していた
 - ▶ よい仮定であったが…
- ニュートリノが質量をもつ可能性
 - ▶ 直接観測は難しい
 - ▶ ニュートリノのフレーバー転換
 - ★ $K^0 - \bar{K}^0$ 系や $B^0 - \bar{B}^0$ 系にみられる量子干渉により観測
 - ★ 数 km から数千 km にわたる

目次

- ① §20.0 Prologue
- ② §20.1 Neutrino mass and β decay
- ③ §20.2 Adding neutrino mass to the Standard Model
- ④ §20.3 Measurements of neutrino flavor mixing

ニュートリノ質量と β 崩壊

- β 崩壊の研究により、 ν_e の質量は、少なくとも非常に小さいはず
 - ▶ ν_e の質量に対する制限
 - ★ β 崩壊の電子のエネルギー分布の端点を調べることにより得られる（後述）
- 原子核 A から B への β 崩壊率は、

$$\Gamma(A \rightarrow Be^- \bar{\nu}) = \frac{1}{2m_A} \int \frac{d^3 p_B d^3 p_e d^3 p_\nu}{(2\pi)^9 \cdot 2E_B \cdot 2E_e \cdot 2E_\nu} (2\pi)^4 \delta^{(4)}(p_A - p_B - p_e - p_\nu) |\mathcal{M}|^2$$

- ▶ 相対論的位相空間積分
- ▶ 保存則が成り立っているときだけ足し上げる
- ▶ $|\mathcal{M}|^2$ は、行列要素の自乗

ニュートリノ質量と β 崩壊～近似（1）

- 原子核 B が反跳運動量を持ち去り、ニュートリノと電子の方向に相関がないと近似
 - A, B の質量 m_A, m_B に対して、 $m_A, m_B \gg |m_A - m_B|$ ゆえ、よい近似¹
- この近似のもと、電子とニュートリノのエネルギー和は

$$E_e + E_\nu = m_A - m_B = \Delta m_{AB}$$

となり

$$\Gamma \simeq \frac{1}{2m_A} \frac{1}{(2\pi)^5 \cdot 2m_B} \int \frac{\mathrm{d}p_e p_e^2}{2E_e} \int \frac{\mathrm{d}p_\nu p_\nu^2}{2E_\nu} \delta(\Delta m_{AB} - E_e - E_\nu) |\mathcal{M}|^2$$

- $E_B \simeq m_B$
- 極座標変換の玉ねぎ積分 $\int \mathrm{d}^3x = \int \mathrm{d}r 4\pi r^2$

¹ $|m_A - m_B|$ は典型的には数 MeV ほど

ニュートリノ質量と β 崩壊～近似（2）

- 電子のエネルギースペクトルの端点で、行列要素を定数に近似できる
- $d p_e p_e = dE_e E_e, \quad d p_\nu p_\nu = dE_\nu E_\nu$
- Γ は

$$\Gamma \simeq \int_{m_e}^{\Delta m_{AB}} dE_e E_e (\Delta m_{AB} - E_e)^2$$

- ニュートリノの質量を 0 と仮定すると

$$\frac{d\Gamma}{dE_e} \simeq (\Delta m_{AB} - E_e)^2$$

エネルギー分布のプロット法～Kurie plot

- エネルギー分布は、Kurie plot で表される
 - エネルギーの函数として事象反応率の平方根をプロット
- ニュートリノ質量が 0 の場合には、直線
- ニュートリノが質量をもつと、 $E_e = \Delta m_{AB} - m_\nu$ で減少

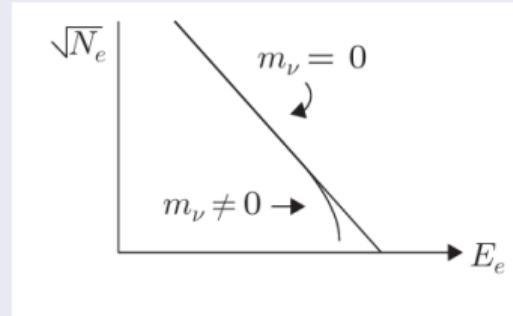


Figure 1: Kurie plot の概形。ニュートリノに質量があると、運動学的端点 $E_e = \Delta m_{AB} - m_\nu$ で減少。

ニュートリノの質量上限についての探索（1）

- β 崩壊の測定により, $m_{\nu_e} \leq$ 数 eV
- 分布の解釈時, β 電子のエネルギー損失を考慮する
 - ▶ 原子からとびだすとき, eV オーダーのエネルギー損失
 - ▶ 物質中で数 eV/mm のエネルギー損失
- 右図は, Mainz と Troitsk で行われた超低温トリチウムフィルムを用いた実験のプロットを示している。この実験では, m_{ν_e} の評価として

$$m_{\nu_e} < 2.05 \text{ eV}$$

となっている。

- 白抜き円は, roughening と呼ばれるエネルギー損失を考慮していなかったために, エネルギー損失の見積もりが誤っていた, 初期の実験データである

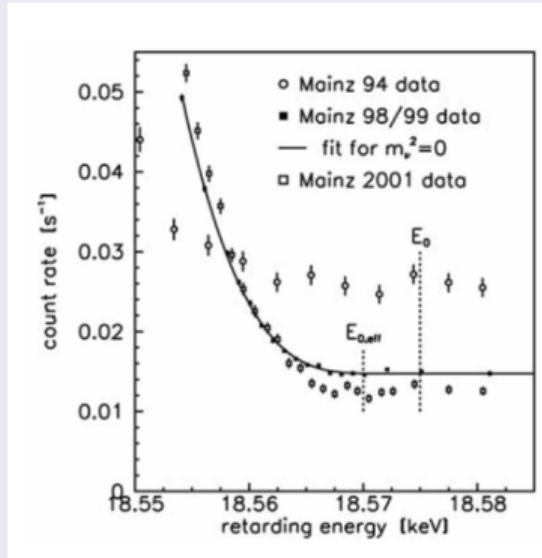


Figure 2: トリチウムの β 崩壊における, 電子のエネルギースペクトルの端点の測定。縦軸が計測数 [s^{-1}], 横軸は阻止エネルギー [keV]。

ニュートリノの質量上限についての探索 (2)

- $m_{\nu_\mu}, m_{\nu_\tau}$ についての評価は弱い
- しかし、 $m_{\nu_e}, m_{\nu_\mu}, m_{\nu_\tau}$ は互いに 1eV の範囲にある事がわかっている（後述）
- m_ν に対するもう一つの制限
 - ▶ 初期宇宙で相対論に運動する質量をもつニュートリノはエネルギーを伝搬し、宇宙の構造を”ならして”しまう
 - ▶ m_{ν_i} が十分大きいとき、銀河系について異なる分布を与える
 - ▶ この効果がないことから

$$\sum_{i=1,2,3} m_{\nu_i} < 0.23 \text{ eV}$$

と評価されている！

backup