

ここまでのあらすじ

- § 1 標準模型と標準模型を超える物理についての概要 (4/15 + 4/22、スライドで)
- § 2 今後の予定
- § 3 場の量子論入門 (5/13~)
 - § 3.1 はじめに
 - § 3.2 自由スカラー場 (5/20)
 - § 3.3 相互作用するスカラー場 (5/27~)
 - § 3.3.1 概略
 - § 3.3.2 S 行列と散乱振幅 $\mathcal{M}$
 - § 3.3.3 遷移確率：一般論
 - § 3.3.4 $n = 2$ の場合、散乱断面積 σ
 - § 3.3.5 散乱振幅 $\mathcal{M}$ の計算の概要
- § 4 標準宇宙論入門 $6/3, 6/5, 6/10$
- § 5 暗黒物質 $6/17 \sim 7/1$
- § 6 素粒子の標準模型、ヒッグス機構 $7/8, 15$
- § 7 ニュートリノ質量とseesaw機構

§ 7.0. 準備

§ 7.1. 標準模型でのフェルミオンの質量

§ 7.2. ニュートリノ質量

§ 7.3. seesaw機構

§ 7.4. Leptogenesis

§7-0 準備

フェルミオンの質量は 7.1.2

$$\mathcal{L} = \bar{\psi}(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi$$

Weyl (chiral) rep:

$$\gamma^\mu = \begin{pmatrix} 0 & \sigma^\mu \\ \bar{\sigma}^\mu & 0 \end{pmatrix} \quad \begin{aligned} \sigma^\mu &= (I, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) \\ \bar{\sigma}^\mu &= (I, -\sigma_1, -\sigma_2, -\sigma_3) \end{aligned}$$

$$\psi = \begin{pmatrix} \chi \\ \eta \end{pmatrix} \quad \psi^\dagger = (\chi^\dagger \eta^\dagger) \quad \bar{\psi} = \psi^\dagger \gamma^0 = (\chi^\dagger \eta^\dagger) \begin{pmatrix} 0 & I \\ I & 0 \end{pmatrix} = (\eta^\dagger \chi^\dagger)$$

↑ 1-ferm spin 2-ferm spin

Mass term: $m\bar{\psi}\psi = m(\eta^\dagger \chi^\dagger) \begin{pmatrix} \chi \\ \eta \end{pmatrix} = m(\eta^\dagger \chi + \chi^\dagger \eta^\dagger)$

mass は 7.1.2

left, right 成分 両方 あり.

$$\psi_L = P_L \psi = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \chi \\ \eta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \chi \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\psi_R = P_R \psi = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \chi \\ \eta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \eta \end{pmatrix}$$

$$m(\bar{\psi}_R \psi_L + \bar{\psi}_L \psi_R)$$

SM 2.1.2 quark の L, R 成分は 別な粒子
lepton

① 電子 $\begin{cases} e_L \cdots SU(2) \text{ doublet} \\ e_R \cdots SU(2) \text{ singlet} \end{cases}$ $e_L \rightarrow W$

2.1.2 mass は 7.1.2

$$\bar{e}_L e_R \cdots \text{gauge inv. 2.1.2}$$

(1, 2)_{1/2} (1, 1)₋₁ ← (SU(3), SU(2))_{u(1)F}

Higgs は 7.1.2 mass は 7.1.2

$$\mathcal{L} = -y_e \bar{L} \cdot \Phi e_R \cdots \text{gauge inv.}$$

(1, 2)_{1/2} (1, 2)_{1/2} (1, 1)₋₁

$$L = \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix}$$

$$= -y_e (\bar{\nu}_L \bar{e}_L) \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix} e_R$$

↑
SU(2) doublet

§ 7-1 標準模型でのフェルミオンの質量

$$\hat{\phi}_a = \epsilon_{ab} \phi_b^*$$

$\mathcal{L}_{\text{Yukawa}}^{\text{SM}}$

$$\mathcal{L}_{\text{Yukawa}} = \underbrace{-y_e \bar{L} \phi e_R - y_u \bar{Q} \cdot \tilde{\phi} u_R}_{\text{Higgs}} - y_d \bar{Q} \cdot \phi d_R - y_e (\bar{\nu} \bar{e}_L) \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix} e_R + \text{h.c.} + \text{h.c.}$$

Higgs VEV
 $\langle \phi^0 \rangle \neq 0$

$$\underbrace{-y_e \langle \phi^0 \rangle}_{m_e} \cdot (\bar{e}_L e_R + \bar{e}_R e_L)$$

$$\bar{\Psi} \Psi \quad \text{Dirac} \quad \Psi = \begin{pmatrix} e_L \\ e_R \end{pmatrix}$$

$$\bar{\Psi} = (\bar{e}_R \bar{e}_L)$$

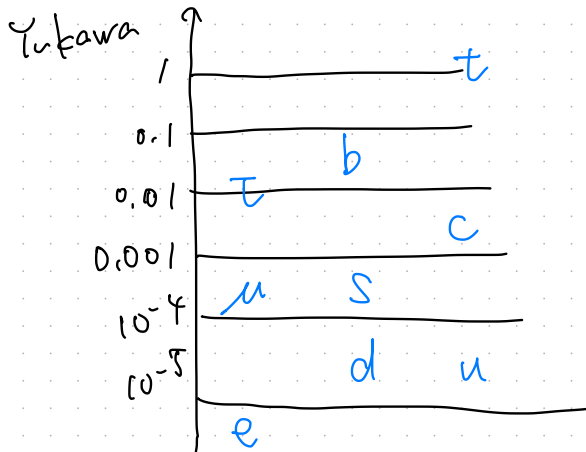
$$\langle \phi^0 \rangle \simeq 174 \text{ GeV}$$

511 keV

$$\therefore y_e = \frac{m_e}{\langle \phi^0 \rangle} = 3 \times 10^{-6}$$

174 GeV

同様にして、...



どうしてこんな風になっているのか？

...これ自体が標準模型における最大の謎の一つ

(でもこの講義では掘り下げない)

§ 7-2 ニュートリノ質量

from. ν -osc

(cf. PDG review)

$$\Delta m_{atm}^2 (= m_{\nu_3}^2 - m_{\nu_2}^2) \simeq (0.05 \text{ eV})^2$$

SK, T2K etc

$$\Delta m_{sol}^2 (= m_{\nu_2}^2 - m_{\nu_1}^2) \simeq (0.0086 \text{ eV})^2$$

solar ν . KamLAND...

$$\sum_i m_{\nu_i} \lesssim 0.12 \sim 0.16 \text{ eV} \quad (\text{Planck} + \alpha)$$

少なくとも2つのニュートリノはゼロでない質量を持っている!

$$0.05 \text{ eV} < m_\nu \lesssim 0.1 \text{ eV}$$

もしニュートリノの質量が他の標準模型フェルミオンと同様にヒッグスから与えられているとしたら、...

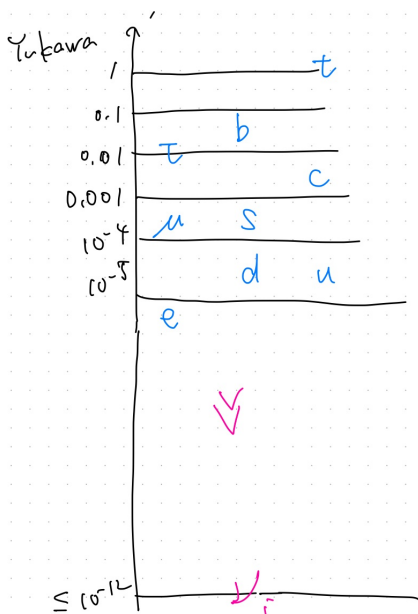
$$\mathcal{L}_{\nu, \text{Yukawa}} = -y_\nu \bar{L} \tilde{\phi} N_R + \text{h.c.} \quad (1)$$

「右巻きニュートリノ」

標準模型にはなかった新しい場 (新しい自由度)

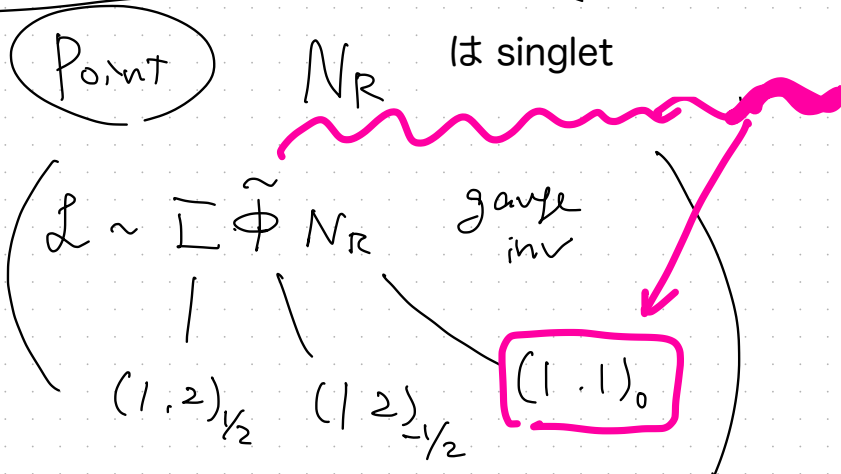
$$m_\nu^{(\text{Dirac})} = y_\nu \langle \phi^0 \rangle$$

$$y_\nu = \frac{m_\nu}{\langle \phi^0 \rangle} \lesssim \frac{0.1 \text{ eV}}{100 \text{ GeV}} \sim 10^{-12}$$



他の SM の Yukawa
に比べる2桁くらい小さい!!
不自然??

§ 7-3 seesaw



このような singlet の場合 (このような場合に限る)、
自分自身で「マヨラナ質量」を持てる。

新しいパラメータ

$$\mathcal{L}_{\text{mass}}^{N_R} = - \frac{1}{2} M_R \overline{N_R^c} N_R + \text{h.c.} \quad (2)$$

singlet でない場合 (電荷を持っている場合) このような
マヨラナ質量項を持つことは出来ない。

$$e_R \xleftrightarrow{CP} e_R^c \leftarrow \text{left-handed}$$

(-1) $(+1)$

$$\mathcal{L} = m \overline{e_R^c} e_R$$

(-1) (-1)

ローレンツ
対称性はOK

でもゲージ対称性が保てない

$$\overline{\nu}_L \langle \phi^0 \rangle N_R$$

$$\mathcal{L}_{\nu, \text{Yukawa}} = - y_\nu \cdot \overline{\nu}_L \tilde{\phi} \cdot N_R + \text{h.c.} \quad (1)$$

$$\mathcal{L}_{\text{mass}}^{N_R} = - \frac{1}{2} M_R \overline{N_R^c} N_R + \text{h.c.} \quad (2)$$

① + ②

$$\mathcal{L} = - \frac{1}{2} (\overline{\nu}_L \quad \overline{N_R^c}) \begin{pmatrix} 0 & y_\nu \langle \phi^0 \rangle \\ y_\nu \langle \phi^0 \rangle & M_R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_L^c \\ N_R \end{pmatrix} + \text{h.c.}$$

$M_R \gg y_\nu \langle \phi^0 \rangle$ (100 GeV) を仮定すると、

対角化すると

質量固有値は

$$\begin{cases} M_N \simeq M_R \\ m_\nu \simeq \frac{(y_\nu \langle \phi^0 \rangle)^2}{M_R} \end{cases}$$

$$m_\nu \simeq 0.1 \text{ eV} \quad y_\nu^2 \left(\frac{10^{14} \text{ GeV}}{M_R} \right)$$

さらに

light ν & heavy N

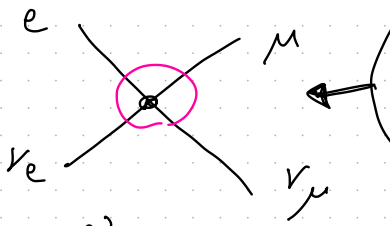
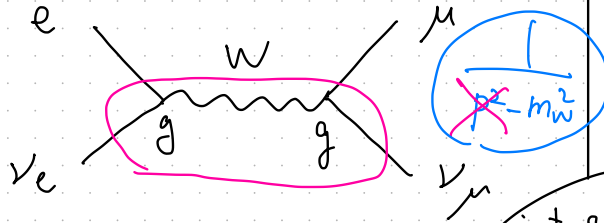
の両方がマヨラナ粒子になる。

seesaw

(Majorana or not ?
 $\rightarrow$ $0\nu\beta\beta$ decay e.g. KamLAND- $\bar{\nu}$ en)

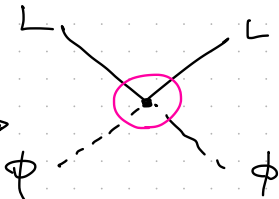
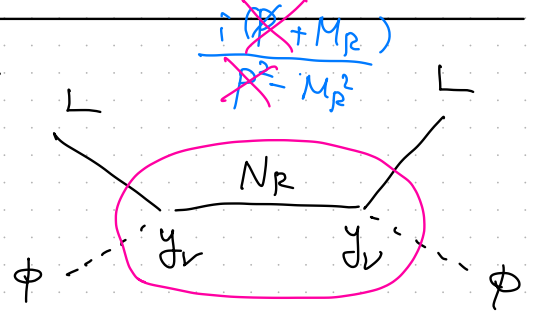
別の見方

analogy : 4-Fermi



$$\text{Left} \sim \frac{g^2}{m_W^2} (\bar{e} \gamma_\mu P_L \nu_e) (\bar{\nu}_\mu \gamma^\mu P_L \mu)$$

analogy



integrating out heavy W, N_R

$$\text{Left} \sim \frac{y_\nu^2}{M_R} (\bar{L}^c \hat{\phi})(L \hat{\phi})$$

$$\langle \phi \rangle \neq 0$$

$$m_\nu \simeq \frac{(y_\nu \langle \phi \rangle)^2}{M_R}$$

7-4 leptogenesis

全く同じ Lagrangian

$$(1) + (2) \quad \phi_1^\mu \dots$$

$\rightarrow$

matter
anti-matter
asym.

Leptogenesis

$$(\rightarrow \delta \delta_{(??)})$$

$\uparrow$
 $\delta \gamma$
 $\sim \sim \sim \sim$