素粒子特論

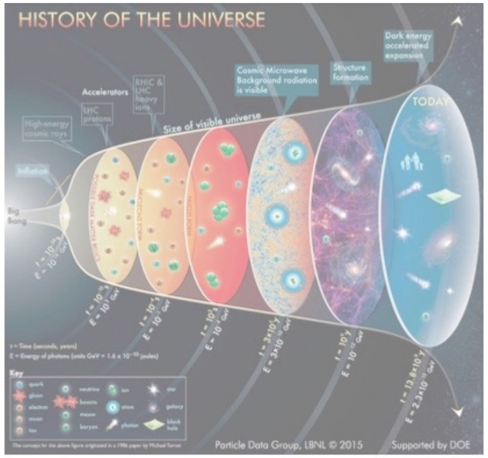


Figure credit;
Particle Data Group
at Lawrence Berkeley National Lab.

浜口幸一 (東京大学 理学系研究科 物理学専攻)

@お茶の水女子大学, 2023年夏学期

B ニュートリノ質量とseesaw機構

B-0 準備

B-1 標準模型でのフェルミオンの質量

B-2 ニュートリノ質量

B-3 Seesaw

B-4 Leptogenesis

§ B-0 準備

フェルミオンの質量について

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

Weyl (chiral) rep:

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

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

4-成分 spinor　　2成分

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

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

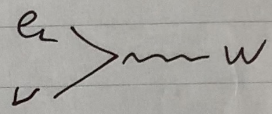
mass を組むには ~~left & right components~~
left, right 成分両方いる.

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

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

SMでは quark, lepton のL, R成分は元々別の粒子

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



そのままでは mass 組めない

$$\bar{e}_L e_R \quad \cdots\cdots \quad \text{gauge inv. ではない}$$

$$(1,2)_{1/2} \qquad (1,1)_{-1} \quad \longleftarrow \quad (SU(3), SU(2))_{U(1)_Y}$$

Higgs を通じて mass をもつ.

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

$$L = \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix} \sim (1,2)_{1/2} \qquad (1,2)_{1/2} \qquad (1,1)_{-1}$$

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

SU(2) doublet

§ β−1 標準模型でのフェルミオンの質量

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

$$\mathcal{L}^{SM}_{Yukawa} = -y_e \bar{L}\underbrace{\phi}_{\text{Higgs}} e_R - y_u \bar{Q}\cdot\tilde{\phi}\, u_R - y_d \bar{Q}\cdot\phi\, d_R + h.c.$$

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

$$\xrightarrow[\langle\phi^0\rangle\neq 0]{\text{Higgs VEV}} \underbrace{-y_e\langle\phi^0\rangle}_{= m_e}\cdot\underbrace{(\bar{e}_L e_R + \bar{e}_R e_L)}_{\bar{\Psi}\Psi}$$

$\bar{\Psi}\Psi$ Dirac

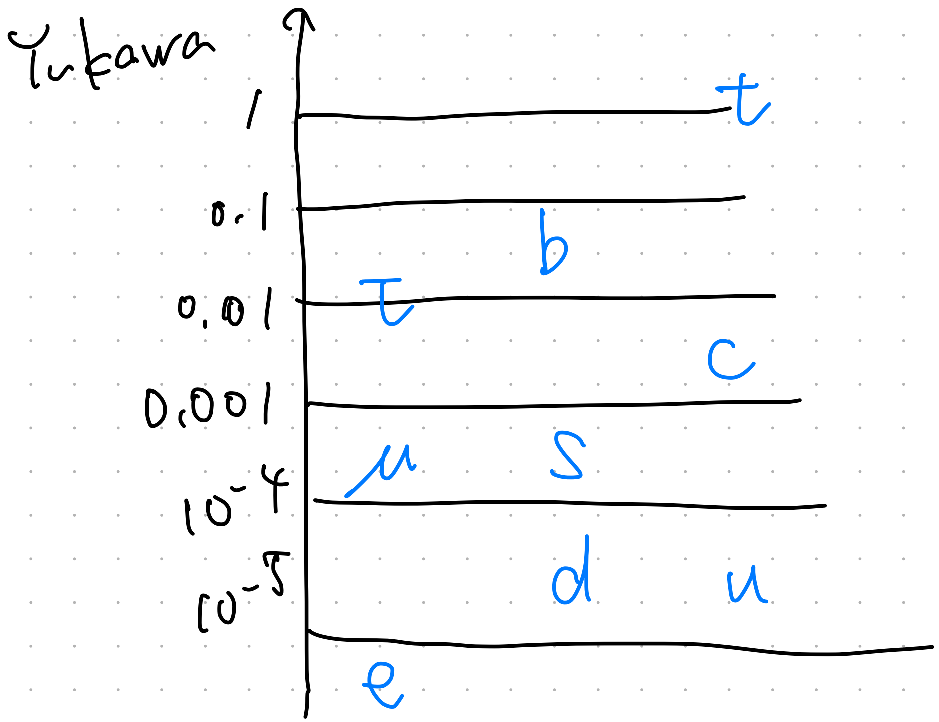
$$\Psi = \begin{pmatrix} e_L \\ e_R \end{pmatrix}$$

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

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

$$\therefore\ y_e = \frac{\overbrace{m_e}^{511\ \text{keV}}}{\underbrace{\langle\phi^0\rangle}_{174\ \text{GeV}}} \simeq 3\times 10^{-6}$$

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））

§ B-2　ニュートリノ質量

from. ν-osc
(cf. PDG review)

$$\Delta m^2_{atm} \left(= m^2_{\nu_3} - m^2_{\nu_2}\right) \simeq (0.05\,\mathrm{eV})^2$$
SK, T2K etc

$$\Delta m^2_{sol} \left(= m^2_{\nu_2} - m^2_{\nu_1}\right) \simeq (0.0086\,\mathrm{eV})^2$$
solar ν. KamLAND...

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

$$\left(\text{cf.} \begin{array}{l} 1807.06209 \\ 1907.12598 \\ 1912.08208 \\ 2105.13549 \end{array} \right)$$

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！

$$\begin{array}{l} 0.05\ \mathrm{eV} \\ 0.008\ \mathrm{eV} \end{array} < m_\nu \lesssim 0.1\ \mathrm{eV}$$

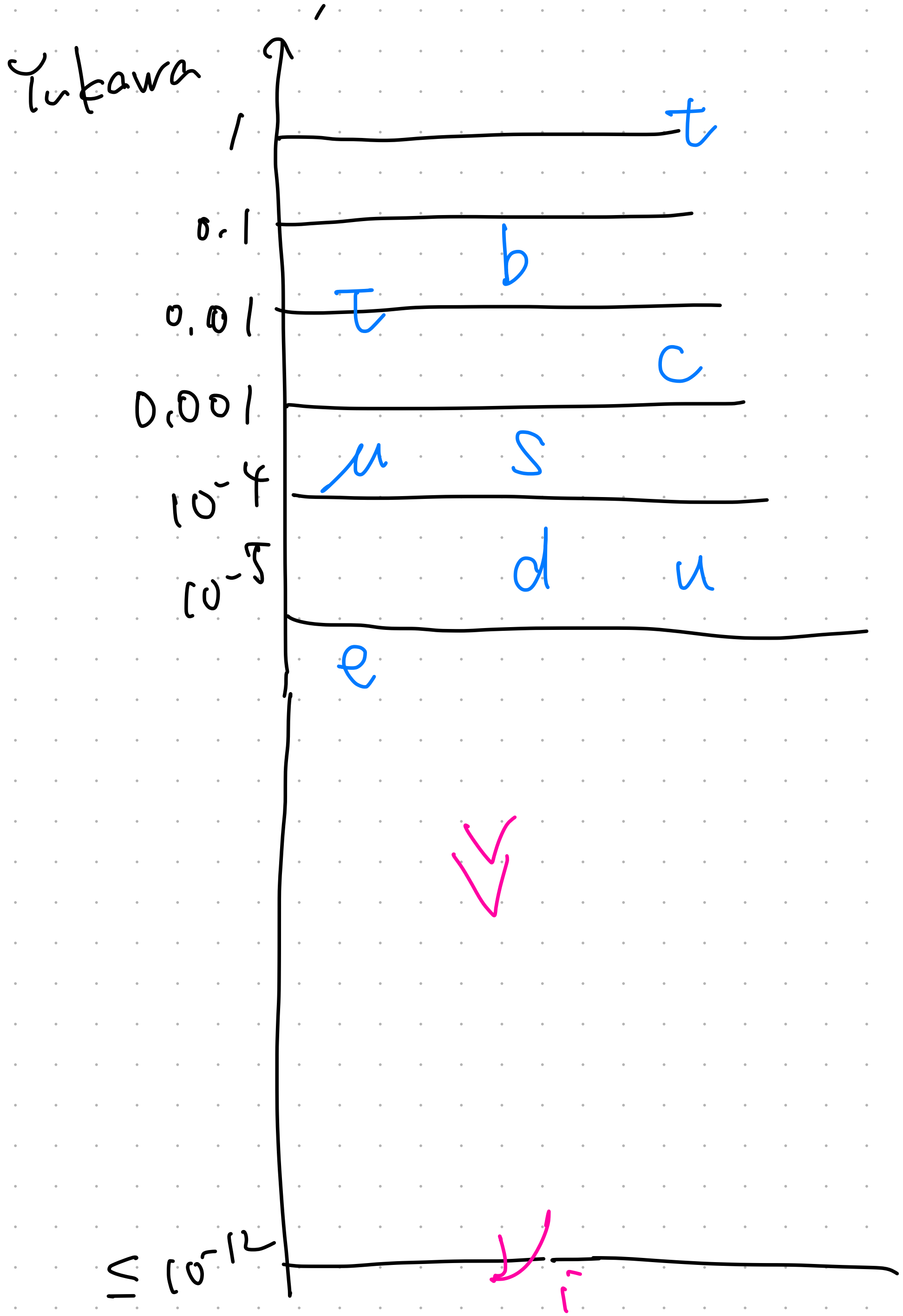
もしニュートリノの質量が他の標準模型フェルミオンと
同様にヒッグスから与えられているとしたら、、、

$$\mathcal{L}_{\nu.\mathrm{Yukawa}} = -y_\nu \cdot \bar{L}\,\tilde{\Phi}\cdot N_R + h.c. \quad \hat{1}$$

「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）
（cf. A-5 で出てきたSO(10) GUT ）

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

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



Yukawa
1
t
0.1
b
0.01
τ
c
0.001
μ
s
10^{-4}
10^{-5}
d
u
e
ν
$\le 10^{-12}$
ν_i

6日目

ここまでのあらすじ

- スライド全体像（1日目 ⊕ 2日目）

§0 SM復習（2日目）

§A GUT（3日目 ⊕ 4日目）

§B ν-mass と seesaw（4日目〜）

B-0 じゅんび

B-1 SMフェルミオンの質量

B-2 νの質量

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、、、

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

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

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

他のSMのYukawa
に比べてすごく小さい!!
不自然??

§ B-3 seesaw

ココから

Point

N_R は singlet

$$\mathcal{L} \sim \underbrace{\bar{L}}_{(1,2)_{1/2}} \underbrace{\tilde{\Phi}}_{(1,2)_{-1/2}} \underbrace{N_R}_{\boxed{(1,1)_0}}$$

gauge inv

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

新しいパラメータ

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

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。

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

$$-1 \qquad\qquad +1$$

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

ローレンツ
対称性はOK

$$-1 \qquad -1$$

でもゲージ対称性が保てない

$\overline{\nu_L}\langle\phi^0\rangle N_R$

$$\mathcal{L}_{\nu.\mathrm{Yukawa}} = -y_\nu \cdot \overline{L}\tilde{\phi}\cdot N_R + h.c. \quad ①$$

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

① + ②

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

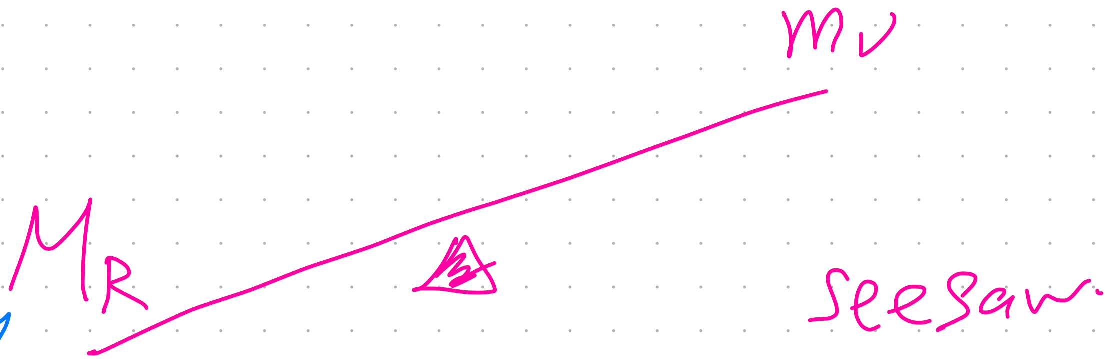
$$M_R \gg \underbrace{y_\nu\langle\phi^0\rangle}_{100\ \mathrm{GeV}}$$ を仮定すると、、

対角化すると

質量固有値は

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

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



light heavy

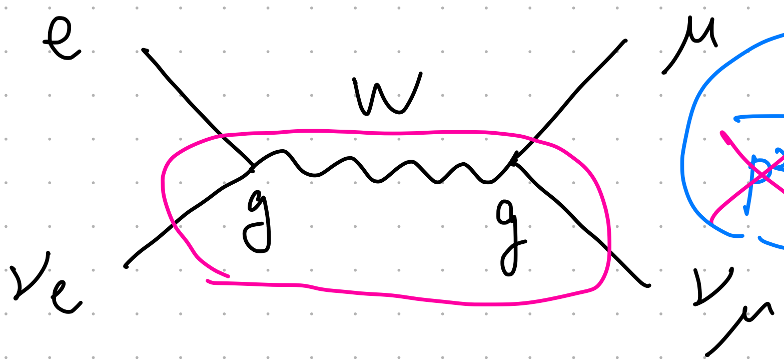
→ ν & N の両方がマヨラナ粒子になる。

(Majorana or not ?

$\longrightarrow$ $0\nu\beta\beta$ decay e.g. KamLAND-Zen)

別の見方

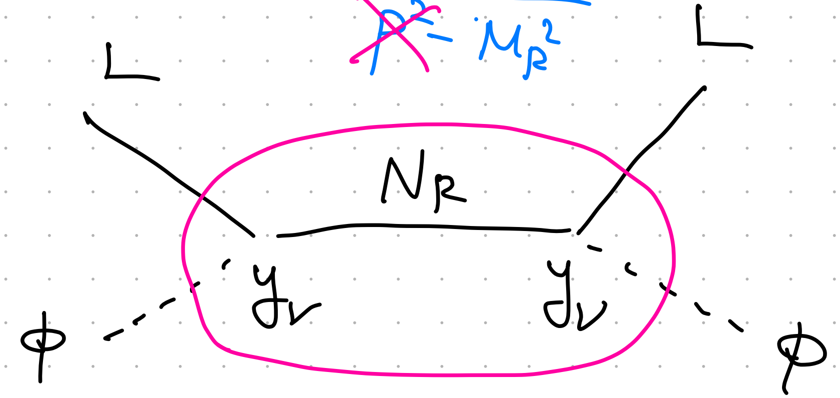
analogy : 4-Fermi



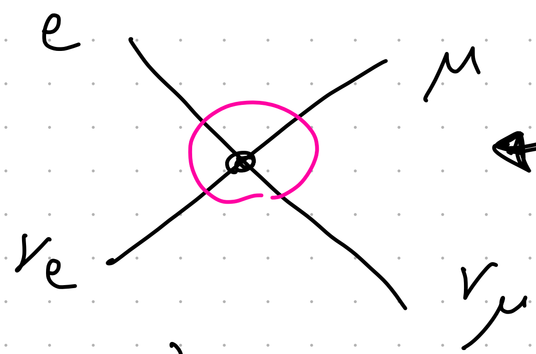
$$\frac{1}{\cancel{p^2} - m_W^2}$$

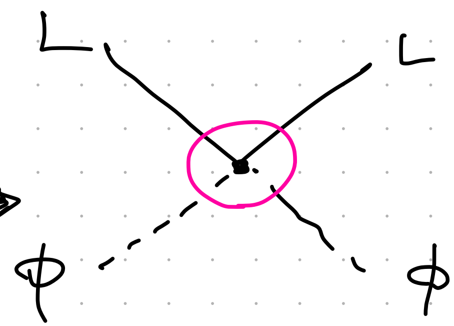
analogy

$$\frac{i(\cancel{p\!\!\!/} + M_R)}{\cancel{p^2} - M_R^2}$$



integrating out heavy W, N_R





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

$$\mathcal{L}_{\text{eff}} \sim \frac{y_\nu^2}{M_R} (\overline{L^c}\tilde{\phi})(L\tilde{\phi})$$

$$\xrightarrow{\langle\phi^0\rangle \neq 0} \quad m_\nu \simeq \frac{(y_\nu \langle\phi^0\rangle)^2}{M_R}$$

B-4 Leptogenesis

全く同じ Lagrangian

1 + 2

Leptogenesis

(→ E)

matter

anti-matter

asym.

B