

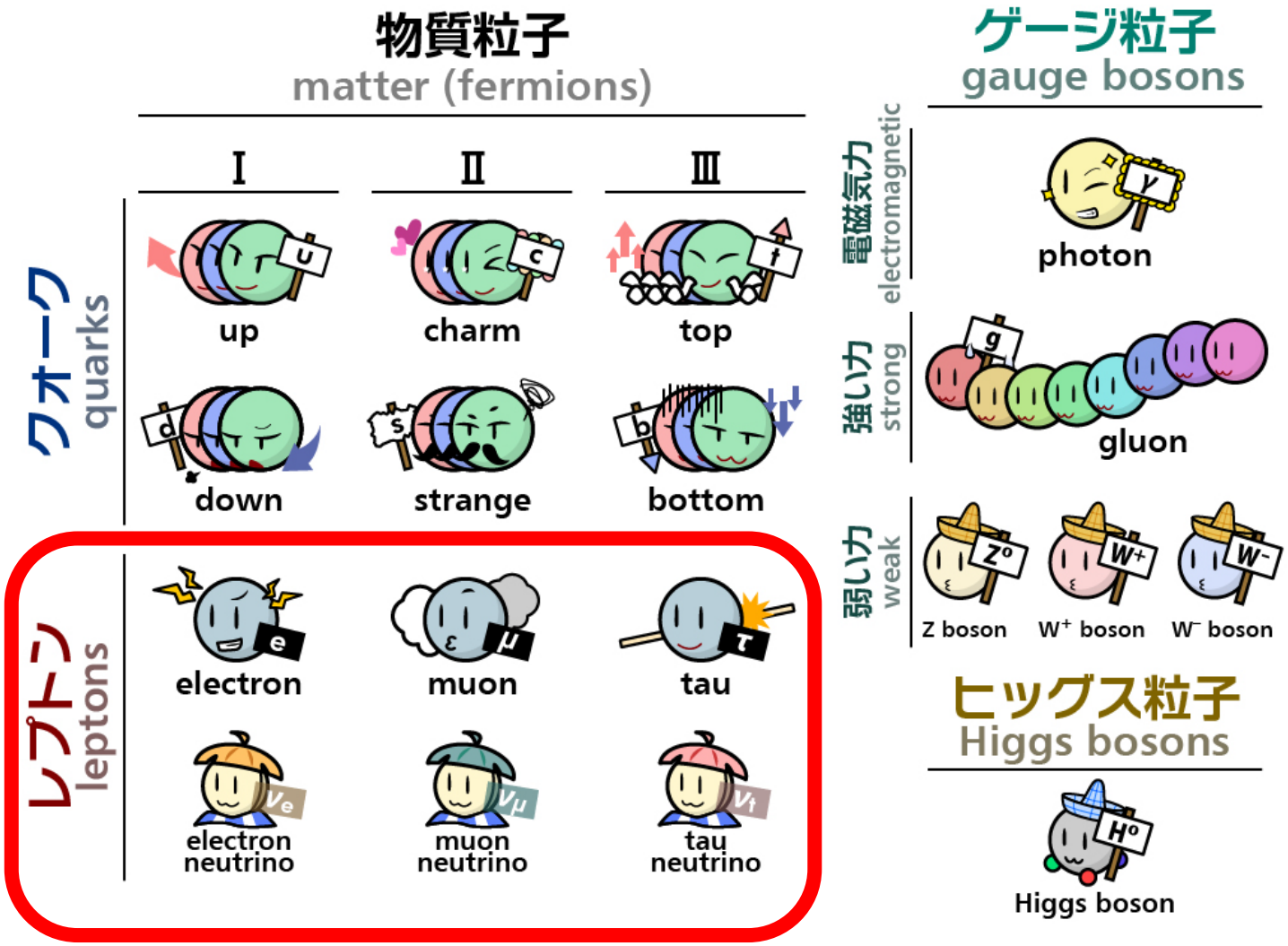
Lepton Flavor Violation (の基礎)

石田裕之(富山県立大学)

2026/11/18
@FPWS2026 in 富山

イントロダクション

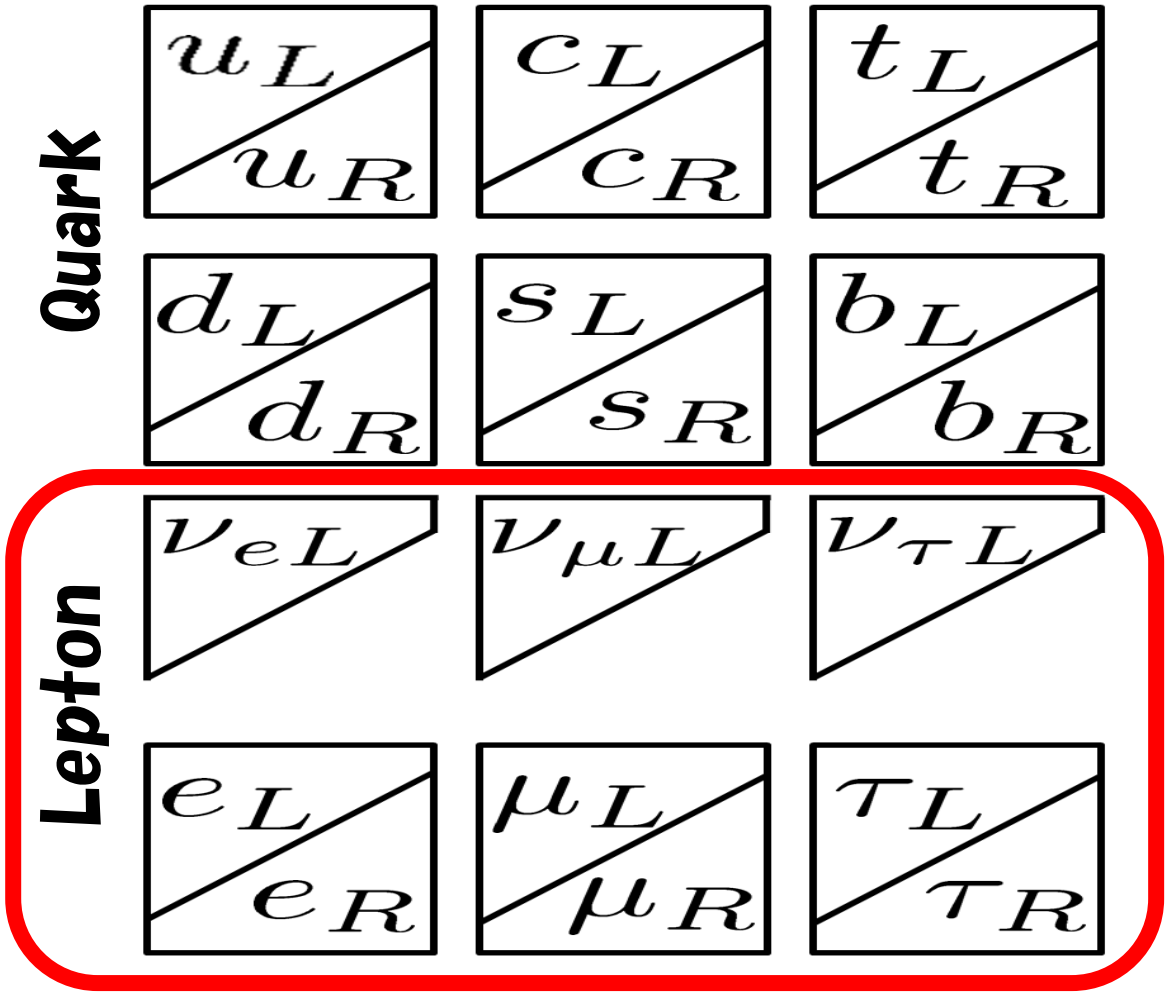
- 素粒子標準模型(詳細は谷本さんの講義に譲る)



[ひっぐすたん]

イントロダクション

- 素粒子標準模型(詳細は谷本さんの講義に譲る)



L/Rはカイラリティ(キラリティ)の違い

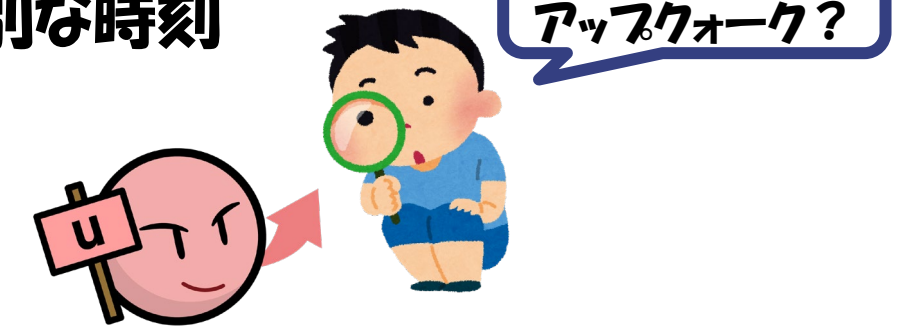
イントロダクション

- フレーバーの破れとは？(雑なイメージ)

ある時刻



別な時刻



観測するタイミングで、
異なる固有状態となっていれば、
『フレーバーが破れている』と言う

イントロダクション

- フレーバーの破れとは？(もう少し真面目に)
  - 標準模型のフェルミオンの質量獲得機構

$$-\mathcal{L}_{\text{Yukawa}} \supset \overline{Q_L} Y_u \tilde{H} u_R + \overline{Q_L} Y_d H d_R + \overline{L_L} Y_e H e_R + \text{h.c.}$$

$$\begin{aligned} -\mathcal{L}_{\text{Yukawa}} \supset & \langle H \rangle \overline{u_L} U^u U^{u\dagger} Y_u V^u V^{u\dagger} u_R \\ & + \langle H \rangle \overline{d_L} U^d U^{d\dagger} Y_d V^d V^{d\dagger} d_R \\ & + \langle H \rangle \overline{e_L} U^e U^{e\dagger} Y_e V^e V^{e\dagger} e_R + \text{h.c.} \end{aligned}$$

$$-\mathcal{L}^{\text{diag}}_{\text{Yukawa}} \supset \langle H \rangle \left(Y'_u\right)_{ii} \overline{u_i} u_i + \langle H \rangle \left(Y'_d\right)_{ii} \overline{d_i} d_i + \langle H \rangle \left(Y'_e\right)_{ii} \overline{e_i} e_i + \text{h.c.}$$

イントロダクション

- フレーバーの破れとは？(もう少し真面目に)
  - 標準模型のフェルミオンの質量獲得機構からわかること

$$-\mathcal{L}_{\text{Yukawa}} \supset \langle H \rangle \overline{u_L} U^u Y'_u V^{u\dagger} u_R + \langle H \rangle \overline{d_L} U^d Y'_d V^{d\dagger} d_R + \text{h.c.}$$

つまり、

$$u_{Li} = U^{u\dagger} u_L \,, \quad d_{Li} = U^{d\dagger} d_L$$

質量の固有状態は、フレーバーの固有状態の重ね合わせで記述される！

我々が観測している状態は、質量の固有状態なので、
確率(混ざり具合)で異なるフレーバーが顔を出すことがある！

イントロダクション

- フレーバーの破れを見つけられる相互作用
  - 荷電カレント：運動項を分解すると

まだフレーバーの固有状態

$$\mathcal{L}_{\mathrm{CC}} \supset -\frac{g}{\sqrt{2}}\overline{u_L}\gamma^\mu d_L W_\mu^+ + \mathrm{h.c.} = -\frac{g}{\sqrt{2}}\sum_{\alpha=1}^{3}\overline{u_{L\alpha}}\gamma^\mu d_{L\alpha} W_\mu^+ + \mathrm{h.c.}$$

  - 質量の固有状態で書き直して

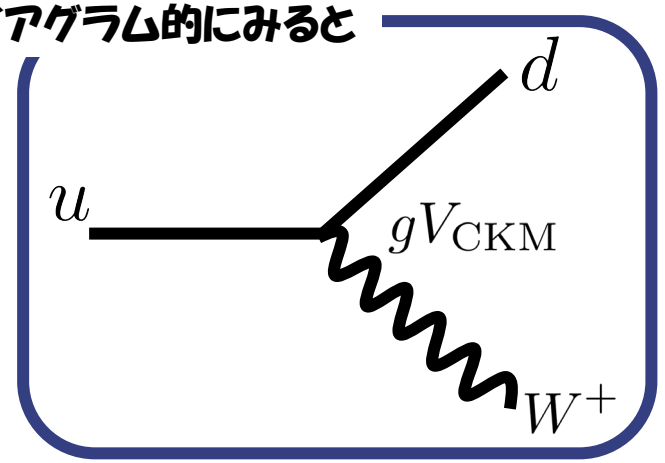
$$\mathcal{L}_{\mathrm{CC}} = -\frac{g}{\sqrt{2}}\left(\overline{u_{Li}}U^{u\dagger}\right)\gamma^\mu\left(U^d d_{Li}\right)W_\mu^+ + \mathrm{h.c.} = -\frac{g}{\sqrt{2}}\overline{u_{Li}}\gamma^\mu\left(U^{u\dagger}U^d\right)d_{Li}W_\mu^+ + \mathrm{h.c.}$$

$$= -\frac{g}{\sqrt{2}}\overline{u_{Li}}\gamma^\mu \boxed{V_{\mathrm{CKM}}} d_{Li}W_\mu^+ + \mathrm{h.c.}$$

カビボ－小林－益川行列 [Cabibbo ('63), Kobayashi, Maskawa ('73)]

異なる左巻きのクォークの混合に由来している

ダイアグラム的にみると



イントロダクション

- レプトンセクターは？

$$-\mathcal{L}_{\text{Yukawa}} \supset \overline{Q_L} Y_u \tilde{H} u_R + \overline{Q_L} Y_d H d_R + \overline{L_L} Y_e H e_R + \text{h.c.}$$

SMには荷電レプトンの湯川相互作用項しかない



アップクォークの混合に対応するものがない



SMにおいてレプトンはフレーバー混合がない！　(?)

イントロダクション

- ところが・・・

6 October 2015

The Royal Swedish Academy of Sciences has decided to award the Nobel Prize in Physics for 2015 to

Takaaki Kajita
Super-Kamiokande Collaboration
University of Tokyo, Kashiwa, Japan

and

Arthur B. McDonald
Sudbury Neutrino Observatory Collaboration
Queen's University, Kingston, Canada

[nobelprize.org]

"for the discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass"

イントロダクション

- ニュートリノ振動とは？



ニュートリノの種類が勝手に変わる

ニュートリノ振動

［ひっぐすたん］

フレーバーの破れ(雑なイメージ)と同じ現象を発見した！
つまり、レプトンにもフレーバーの破れはある！！

イントロダクション

- ニュートリノ振動を説明するためには
  - 非常に素朴には

$$-\mathcal{L}_{\text{Yukawa}} \supset \boxed{\langle H \rangle \overline{\nu_L} U^{\nu} Y'_{\nu} V^{\nu\dagger} \nu_R} + \langle H \rangle \overline{e_L} U^{e} Y'_{e} V^{e\dagger} e_R + \text{h.c.}$$

この項を書きたくなる

  - ニュートリノの質量の固有状態に時間発展を加えると

$$\nu_{Li} = U^{\nu\dagger} \nu_L \quad \Rightarrow \quad \nu_L = U^{\nu} \nu_{Li} \quad \Rightarrow \quad \nu_{L\alpha}(t) = U^{\nu}_{\alpha i} \left(U^{\nu}_{i\beta} \right)^{\dagger} e^{-iEt} \nu_{L\beta}$$

  - ニュートリノの遷移振幅

$$\langle \nu_{L\beta} | \nu_{L\alpha}(t) \rangle = U^{\nu}_{\alpha i} U^{\nu *}_{\beta i} e^{-iEt}$$

イントロダクション

- ニュートリノ振動を説明するためには
  - フレーバーαからフレーバーβへの遷移確率

$$P_{\alpha\to\beta} = \delta_{\alpha\beta} + \sum_{i,j} U^{\nu}_{\alpha i} U^{\nu *}_{\beta i} U^{\nu *}_{\alpha i} U^{\nu}_{\beta i} \left(e^{-i \frac{\Delta m^2_{ij}}{2E} t} - 1 \right)$$

$$\left(\Delta m^2_{ij} \equiv m^2_i - m^2_j \right)$$

- 質量が縮退していると起きない
- 遷移確率は振動距離 $L_{ij} = \dfrac{4\pi E}{\Delta m^2_{ij}}$ によって決まる

つまり、ただ質量があるだけではなく、質量二乗差が重要！

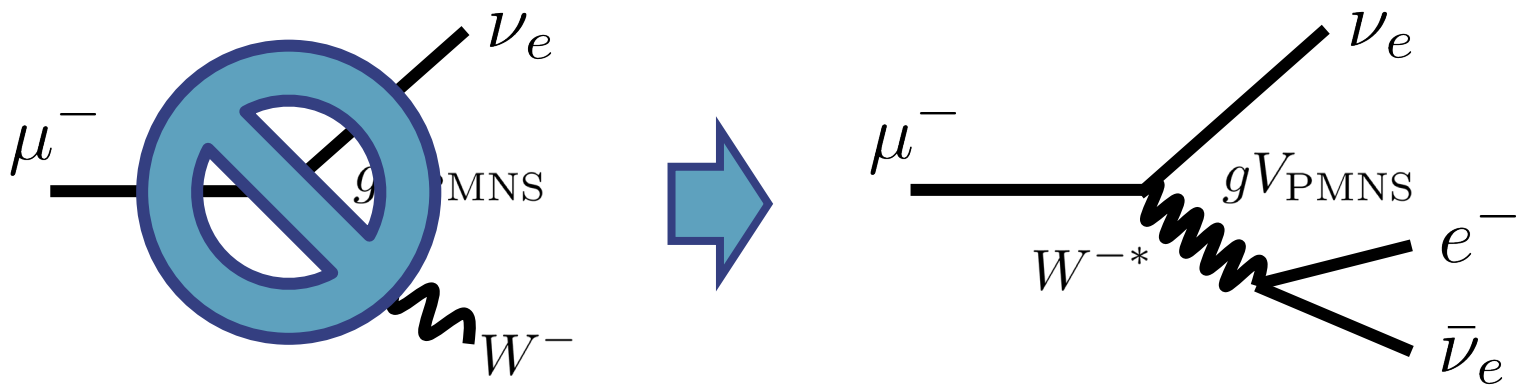
- 太陽ニュートリノ：$\Delta m^2_{21} = 7.49 \times 10^{-5} \ \ \mathrm{eV}^2$
- 大気ニュートリノ：$\Delta m^2_{3\ell} = 2.513 \times 10^{-3} \ \ \mathrm{eV}^2$ [NuFit6.0]

パラメータ	$\Delta m^2_{\mathrm{atm}}/10^{-3}\mathrm{eV}^2$	$\Delta m^2_{\mathrm{sol}}/10^{-5}\mathrm{eV}^2$
最適値	2.35	7.58
3σ	2.06 - 2.67	6.99 - 8.18

[Fogli et al. (2011)]

イントロダクション

- では荷電レプトンではどうか？(よく見るのは $\mu \to e + \gamma$ だけど)



[Pontecorvo ('68), Maki, Nakagawa, Sakata ('62)]

ところが…

$$\mathcal{A}_{\mu\to\nu_e+e+\bar{\nu}_e} \propto \sum_{i=1}^{3} \left(V^*_{PMNS}\right)_{\mu i} \left(V_{PMNS}\right)_{ei} \frac{m_i^2}{m_\mu^2}$$

より、$\dfrac{m_i}{m_\mu} \sim \dfrac{10^{-10}\ \mathrm{GeV}}{10^{-1}\ \mathrm{GeV}} \sim 10^{-9} \ll 1$ なので、

最終的に、

$$\mathrm{BR}\left(\mu \to \nu_e e \bar{\nu}_e\right) \sim \mathcal{O}\left(10^{-38}\right)$$

イントロダクション

- 標準模型+ニュートリノ質量におけるフレーバーの破れのまとめ

  - クォークセクター
    - CKM行列を通じて、荷電カレントにフレーバーの破れが入っている

  - レプトンセクター
    - PMNS行列を通じて、荷電カレントにフレーバーの破れが入っている

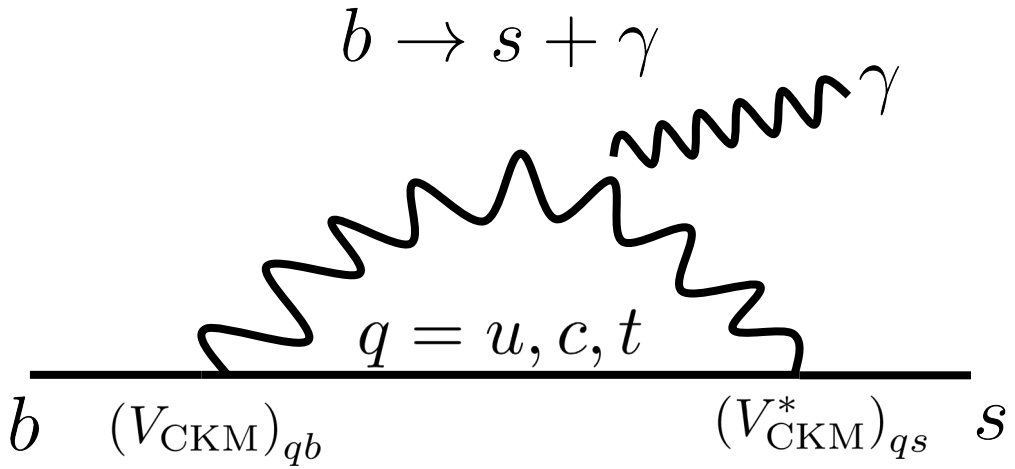
      が、

      物理過程を計算する際、必ずニュートリノ質量が入るせいで全部小さい

      物理過程において、クォークとレプトンで何が違うのか？

イントロダクション

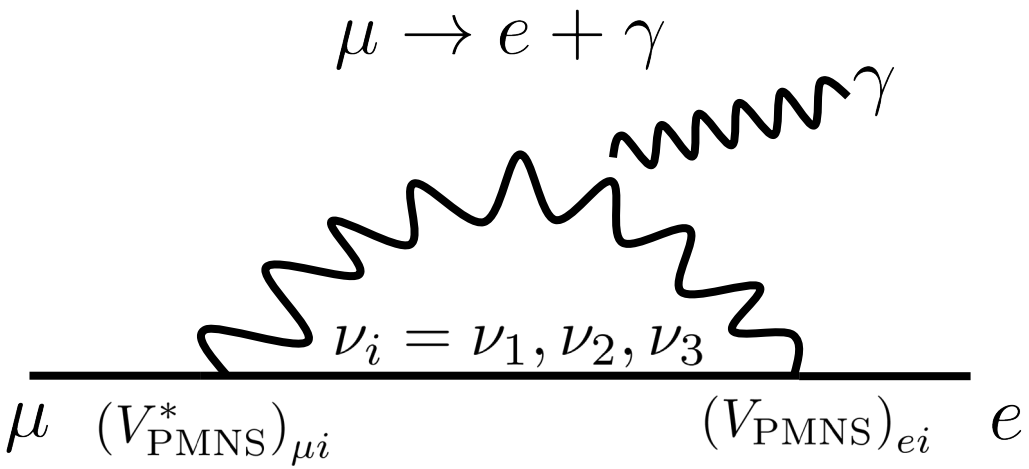
- 標準模型+ニュートリノ質量におけるフレーバーの破れのまとめ



$$\mathcal{A}_{b\to s+\gamma} \propto \sum_{i=1}^{3} (V^*_{CKM})_{qs} (V_{CKM})_{qb} F(x_q)$$

$x_q \equiv \frac{m_q^2}{m_W^2}$ で、m_t のときのみ $x_q \gg 1$

$F(x_t) \simeq -\frac{1}{3}$ となる定数



$$\mathcal{A}_{\mu\to e+\gamma} \propto \sum_{i=1}^{3} (V^*_{PMNS})_{\mu i} (V_{PMNS})_{ei} F(x_i)$$

$x_i = \frac{m_i^2}{m_W^2} \ll 1$ で、すべて同等に寄与

$F(x_i) \simeq \frac{5}{6} - \frac{1}{4} x_i$

イントロダクション

- 標準模型+ニュートリノ質量におけるフレーバーの破れのまとめ

$$b \to s + \gamma$$

$$\mathcal{A}_{b\to s+\gamma} \propto \sum_{i=1}^{3} \left(V^*_{CKM}\right)_{qs} \left(V_{CKM}\right)_{qb} F(x_q)$$

$$\simeq -\frac{1}{3} \left(V^*_{CKM}\right)_{ts} \left(V_{CKM}\right)_{tb} \equiv A$$

$$\mu \to e + \gamma$$

$$\mathcal{A}_{\mu\to e+\gamma} \propto \sum_{i=1}^{3} \left(V^*_{PMNS}\right)_{\mu i} \left(V_{PMNS}\right)_{ei} F(x_i)$$

$$\simeq \sum_{i=1}^{3} \left(V^*_{PMNS}\right)_{\mu i} \left(V_{PMNS}\right)_{ei} \left(\cancel{c} - \frac{1}{4} x_i\right) \equiv B$$

GIM機構

[Glashow, Iliopoulos, Maiani ('70), Inami, Lim ('81)]

適当に寄与を比較すると

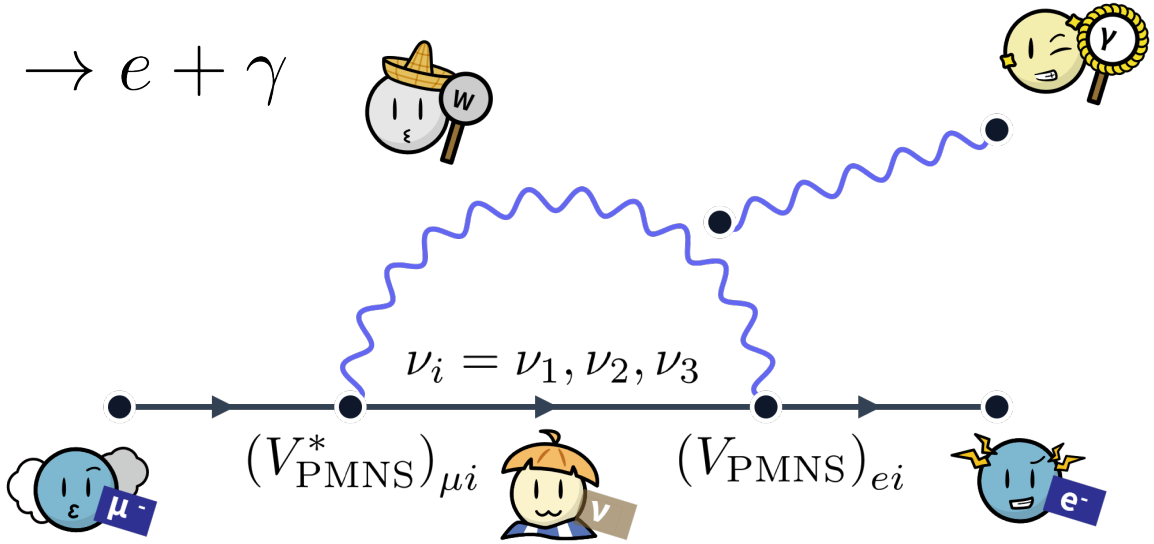
$$\frac{B}{A} \sim 3 \times 10^{-25}$$

荷電レプトンのフレーバーの破れが如何に小さいかがわかる！！

イントロダクション

- 荷電レプトンのフレーバーの破れを見たい場合

$$\mu \to e + \gamma$$



[ファインマンずたん]

① レプトンのフレーバーを破る演算子を新たに加える

② 内線粒子を取り換え、さらに質量階層性をもたせる

③ 変換行列をユニタリー行列でなくする

(GIM機構を働かなくする)

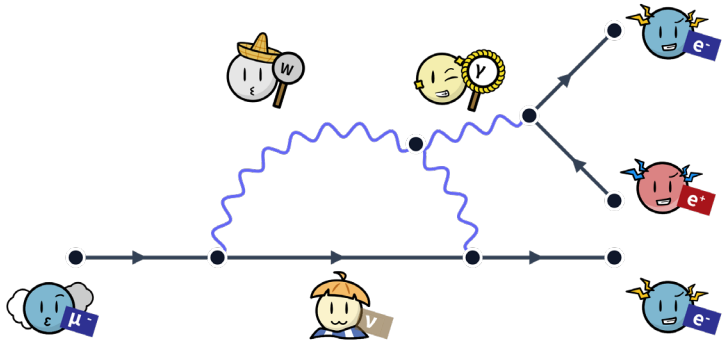
ISS, SUSY, 2HDM
ALP, LRSM
GUT models
Leptoquark
Dark sector(U(1)')
etc...

あとはあなたの好きな模型ではどうなるかを考えてください

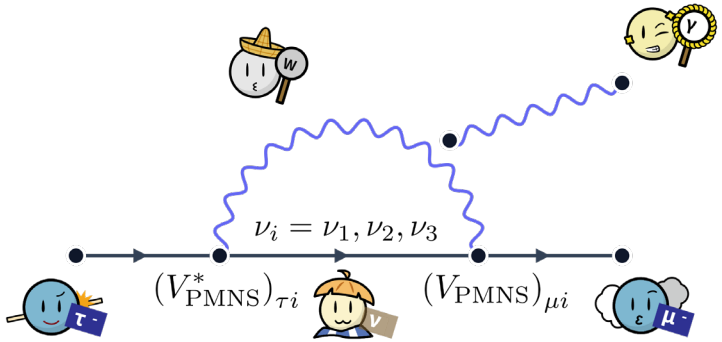
イントロダクション

- 他にもあるレプトンのフレーバーの破れ過程（これも一部）

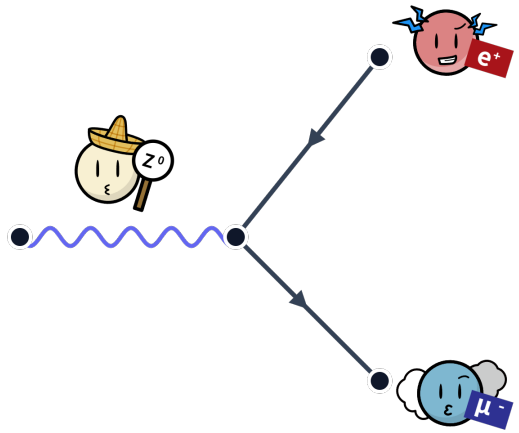
$\mu \to 3e$



$\tau \to \mu + \gamma$



$Z \to e + \mu$



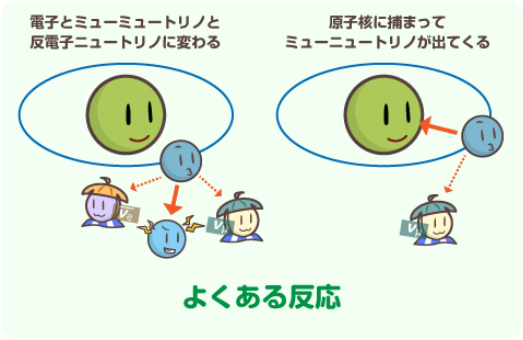
$\mu - e$ **転換**

［ファインマンずたん，ひっぐすたん］



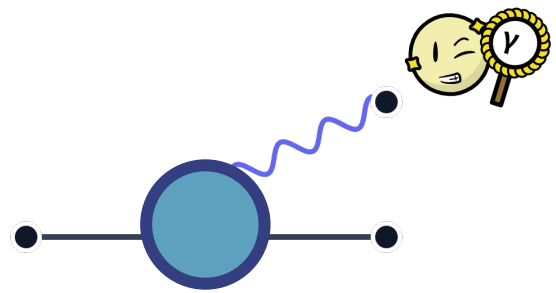
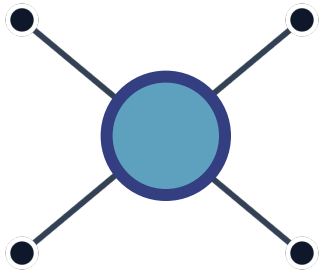






イントロダクション

- 今後の発展

	代表的実験	SMの予言	将来の実験感度	期待される新物理
$\mu \to e + \gamma$	MEG IIなど	$\sim \mathcal{O}\left(10^{-54}\right)$	$\sim \mathcal{O}\left(10^{-14}\right)$	
$\tau \to \mu + \gamma$	Belle IIなど	$\sim \mathcal{O}\left(10^{-54}\right)$	$\sim \mathcal{O}\left(10^{-9}\right)$	
$\tau \to e + \gamma$	Belle IIなど	$\sim \mathcal{O}\left(10^{-54}\right)$	$\sim \mathcal{O}\left(10^{-9}\right)$	
$\mu \to 3e$	Mu3eなど	$\sim \mathcal{O}\left(10^{-56}\right)$	$\sim \mathcal{O}\left(10^{-16}\right)$	
$\tau \to 3\mu$	Belle IIなど	$\sim \mathcal{O}\left(10^{-56}\right)$	$\sim \mathcal{O}\left(10^{-10}\right)$	
$\mu - e$転換	COMETなど	$\sim \mathcal{O}\left(10^{-57}\right)$	$\sim \mathcal{O}\left(10^{-17\sim18}\right)$	

当然今後の発展には期待だが、他の制限を回避しつつこれらを増幅する模型が必要

レプトンフレーバーの破れ＝荷電レプトンのフレーバーの破れ？

イントロダクション

- ニュートリノ振動とは？



ニュートリノの種類が勝手に変わる

ニュートリノ振動

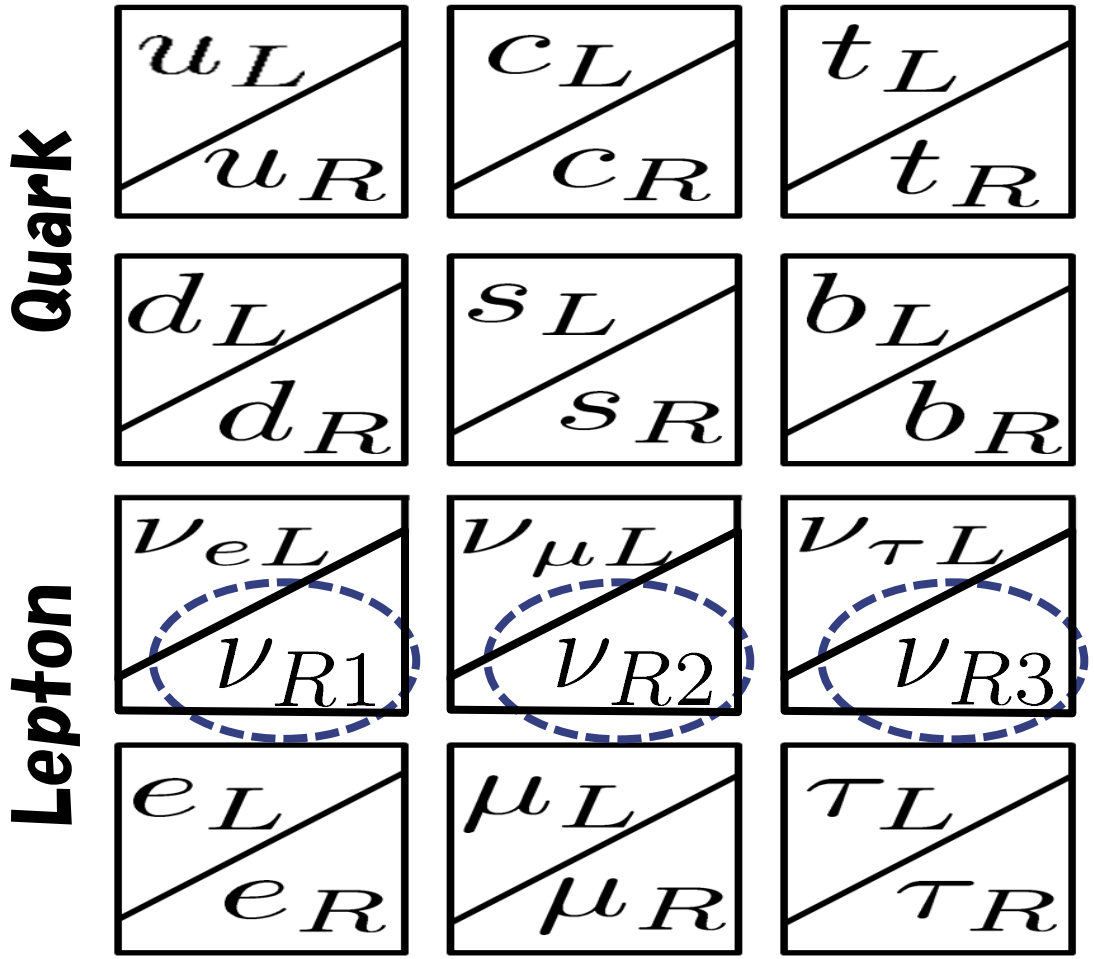


［ひっぐすたん］

フレーバーの破れ(雑なイメージ)と同じ現象を発見した！
つまり、レプトンにもフレーバーの破れはある！！

イントロダクション

- 標準模型に不足していた最後のピース



SM+右巻きニュートリノでできること

ちょっと横道

SM+右巻きニュートリノ

- 右巻きニュートリノが特別なこと

$$-\mathcal{L}_{\text{Yukawa}} \supset \overline{L_L} Y_\nu \tilde{H} \nu_R + \overline{L_L} Y_e H e_R + \text{h.c.}$$

谷本さんの講義をよく聞いていたみなさんなら…

ν_R が標準模型の電荷をもたないことはすぐにわかる！！

$$-\mathcal{L}_{\text{mass}} \supset \frac{M_M}{2} \overline{\nu_R^c} \nu_R$$

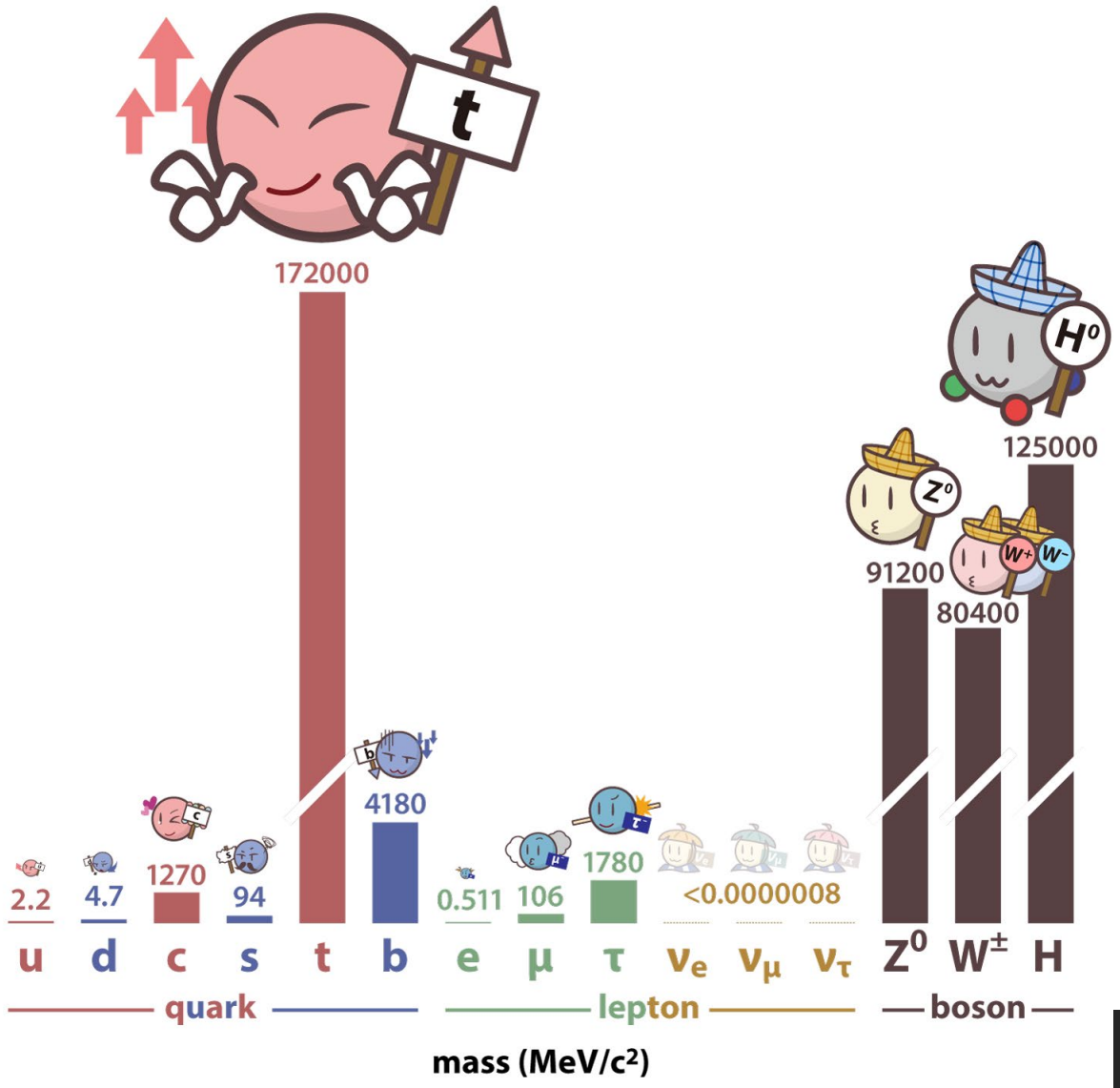
右巻きニュートリノをマヨラナ粒子と呼び、質量項をもつ

[Majorana ('37)]

マヨラナ粒子：粒子＝反粒子（何も区別できるものがない）

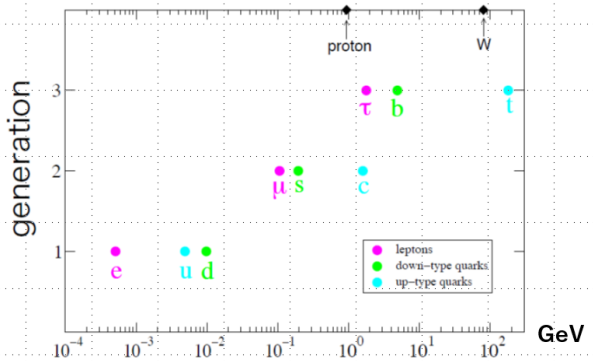
SM+右巻きニュートリノ

- ニュートリノ質量の異様な小ささ



［初日の谷本さんのスライド］

フレーバーセクターは理解できているか



なぜ　Yukawa couplingの大きさはこんなに違うのか？

Gauge couplings (2024 PDG)

$g_1 = 0.461227^{+0.000025}_{-0.000027}$, $g_2 = 0.65096^{+0.00004}_{-0.00004}$, $g_3 = 1.2118^{+0.0045}_{-0.0047}$

25

SM+右巻きニュートリノ

- 右巻きニュートリノがいるとできること：ニュートリノ質量
  - ニュートリノには2種類の質量

ディラック質量：$M_D \equiv Y_\nu \langle H \rangle$　　マヨラナ質量：M_M

  - ニュートリノの質量行列の対角化：シーソー機構

[Minkowski (1977); Yanagida(1979); Gell-Mann,Ramond,Slansky (1979); Glashow (1980); Mohapatra,Senjanovic(1980)]

$$\hat{M} = \begin{pmatrix} 0 & M_D \\ M_D^T & M_M \end{pmatrix} \xrightarrow[M_D \ll M_M]{\text{diagonalization}} \begin{pmatrix} M_\nu & 0 \\ 0 & M_I \end{pmatrix}$$

ここで、$M_\nu \simeq -M_D M_M^{-1} M_D^T$

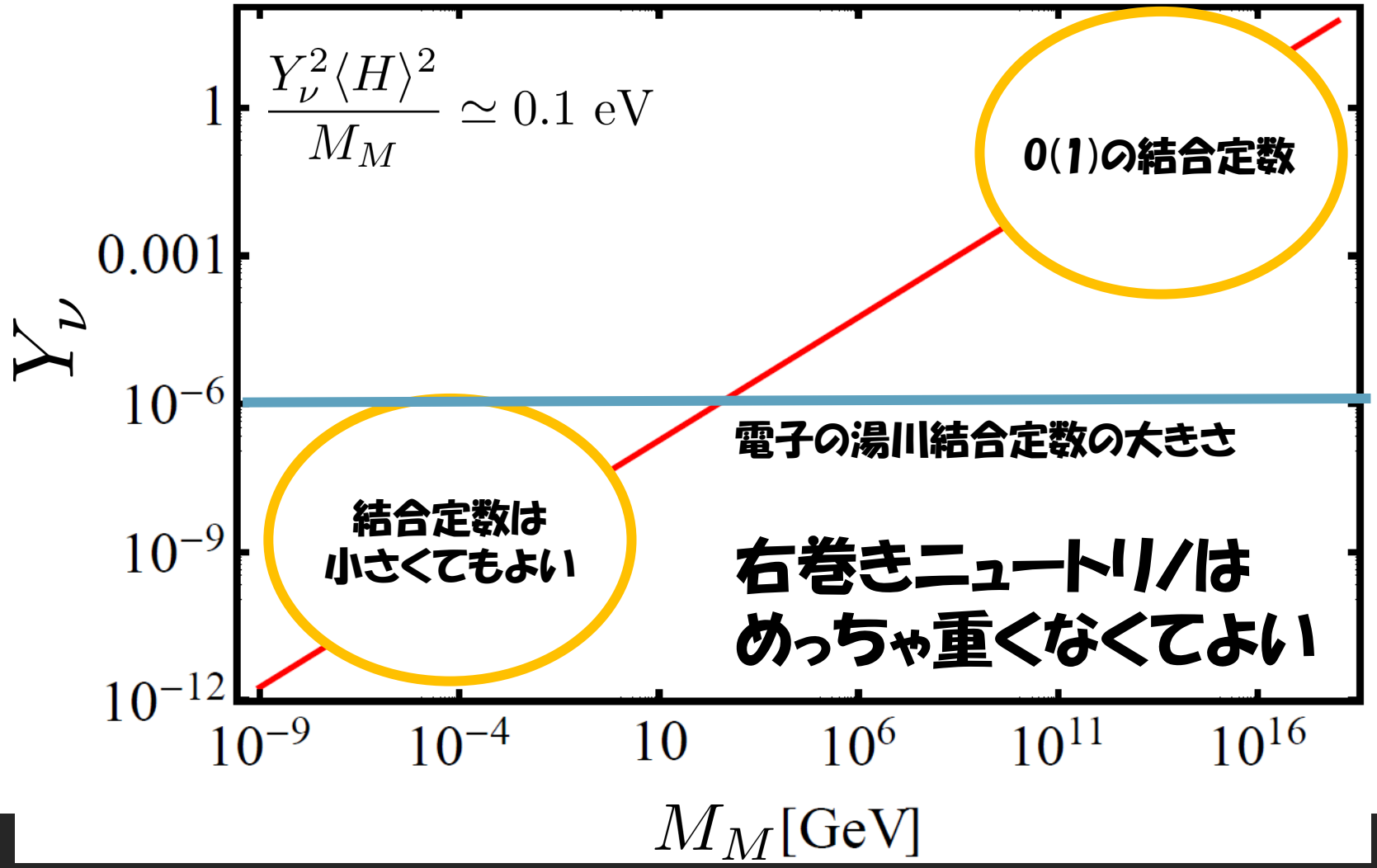
つまり、

ディラック質量とマヨラナ質量の間の階層性が重要



SM+右巻きニュートリノ

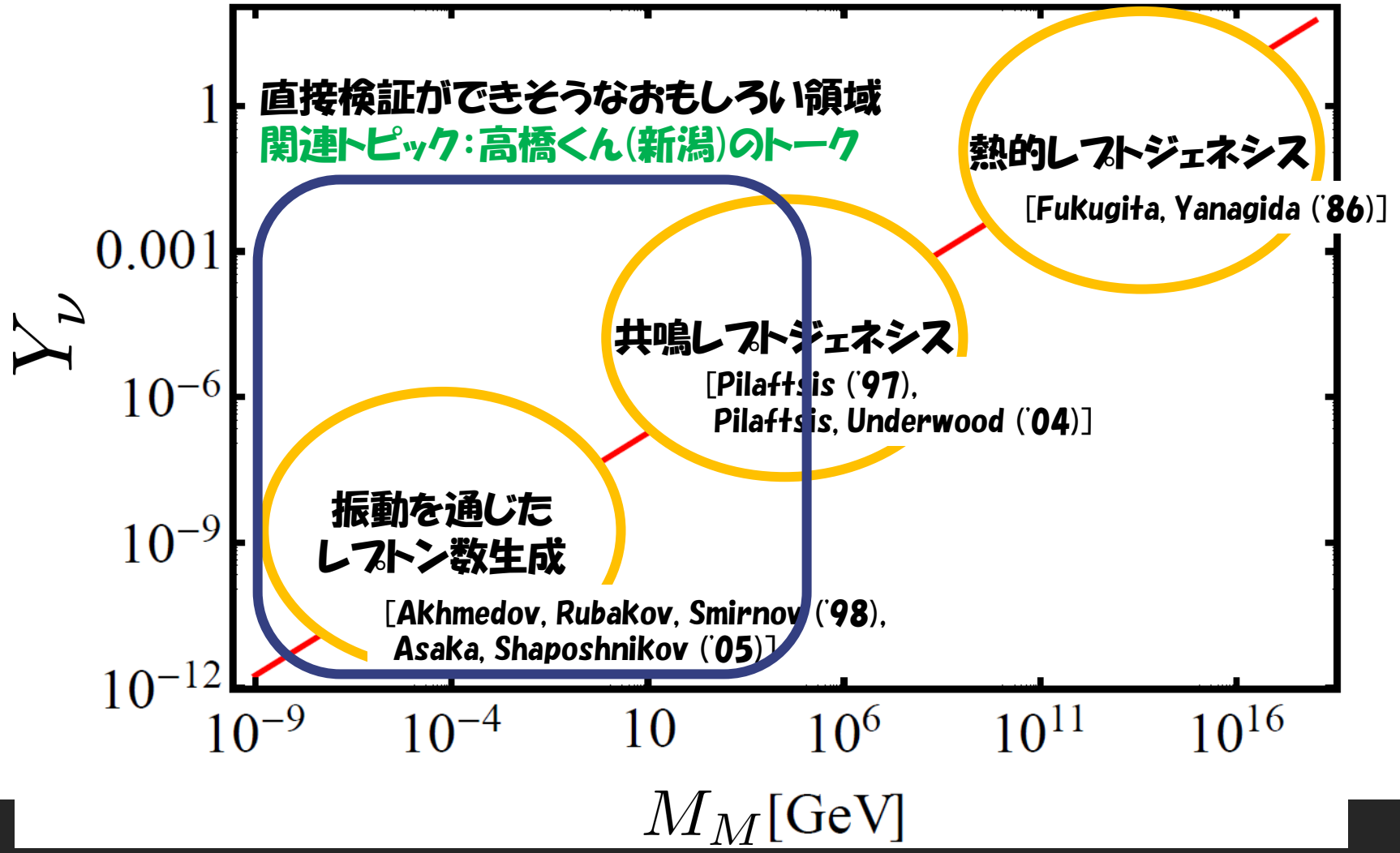
- 右巻きニュートリノがいるとできること：シーソー機構



SM+右巻きニュートリノ

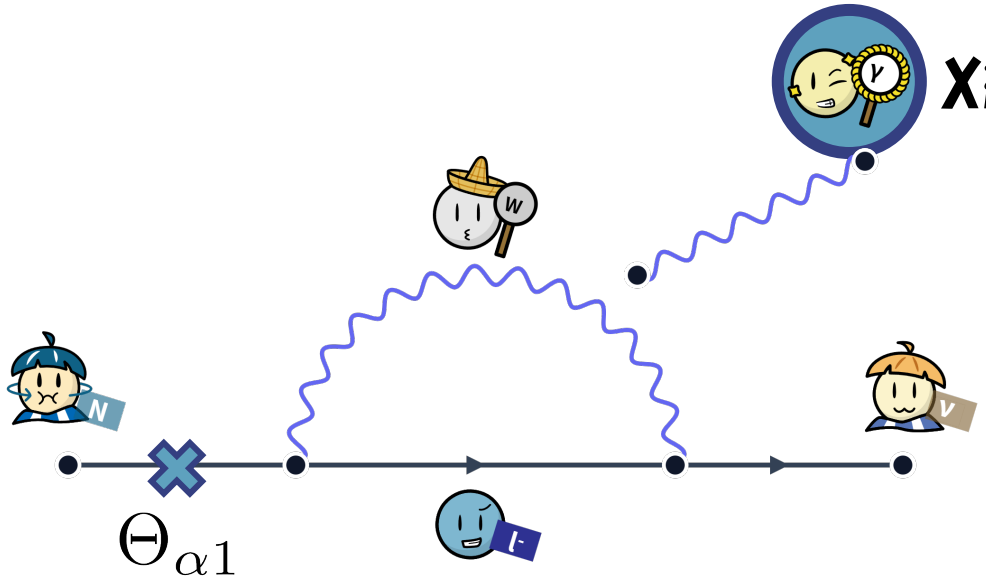
- 右巻きニュートリノがいるとできること：バリオン数非対称性生成（レプトン数の破れ）

［去年の滋賀さんのスライドも参照してください］



SM+右巻きニュートリノ

- 右巻きニュートリノがいるとできること：暗黒物質候補



X線観測による制限

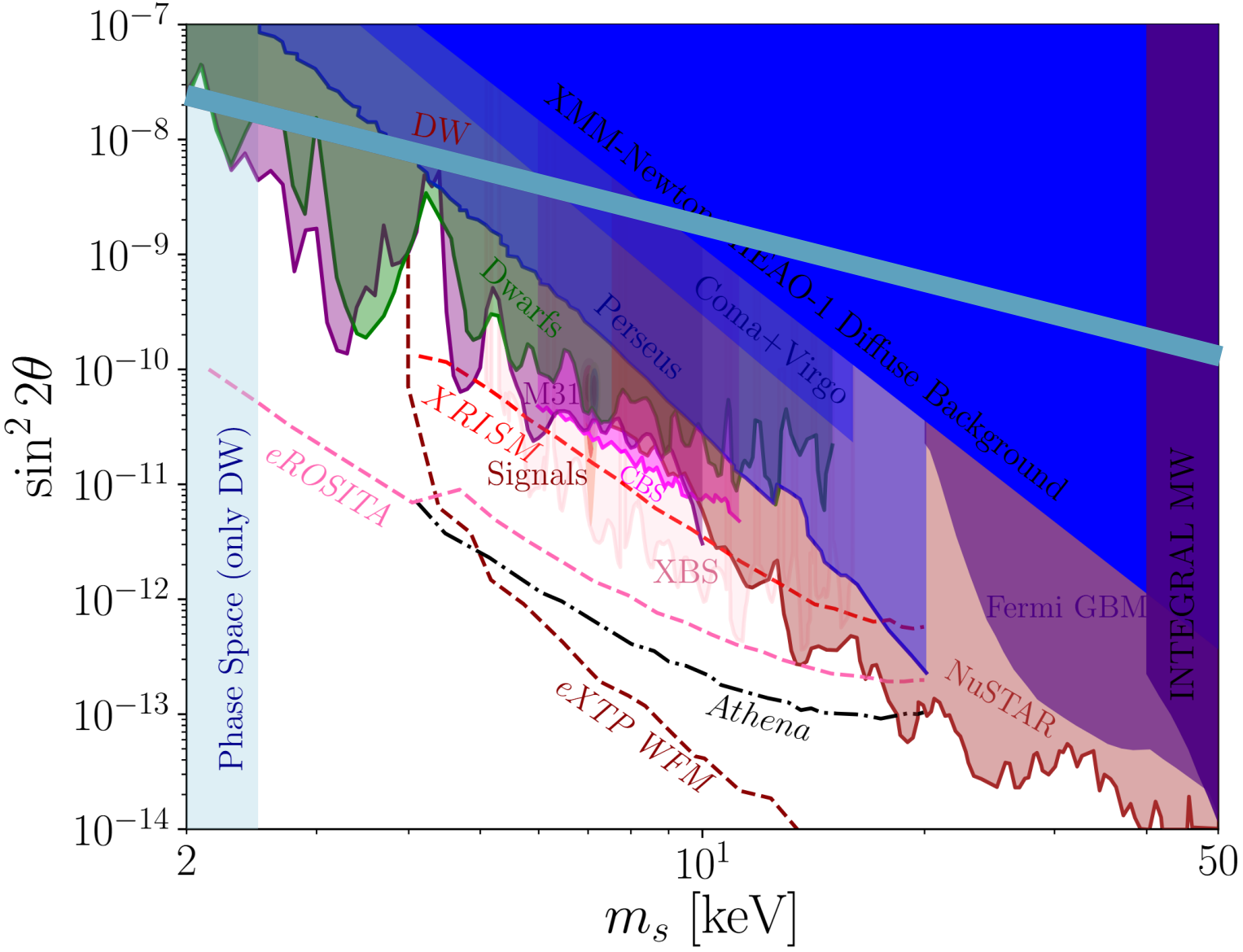
［ファインマンずたん］

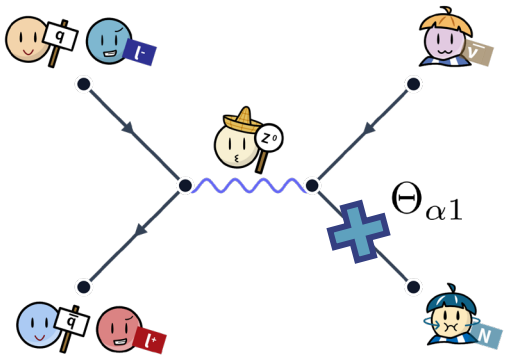
運動学的に崩壊は禁止できない

崩壊する暗黒物質候補

SM+右巻きニュートリノ

- 右巻きニュートリノがいるとできること：暗黒物質候補





[Dodelson, Widrow ('93)]

[Gerbino et al. ('22)]

SM+右巻きニュートリノ

- SMにおける未解決問題
  - ニュートリノの極微質量
  - 宇宙バリオン数非対称性
  - 暗黒物質候補

  右巻きニュートリノのみで説明可能(？)
  - インフレーション
  - 電荷の量子化
  - 強いCP問題
  - 宇宙項問題
  - クォークとレプトンのフレーバー構造(質量階層性)
  - 電弱スケールとプランクスケールの階層性問題
  - ゲージ結合定数の統一

  などなど

SM＋何かの新物理

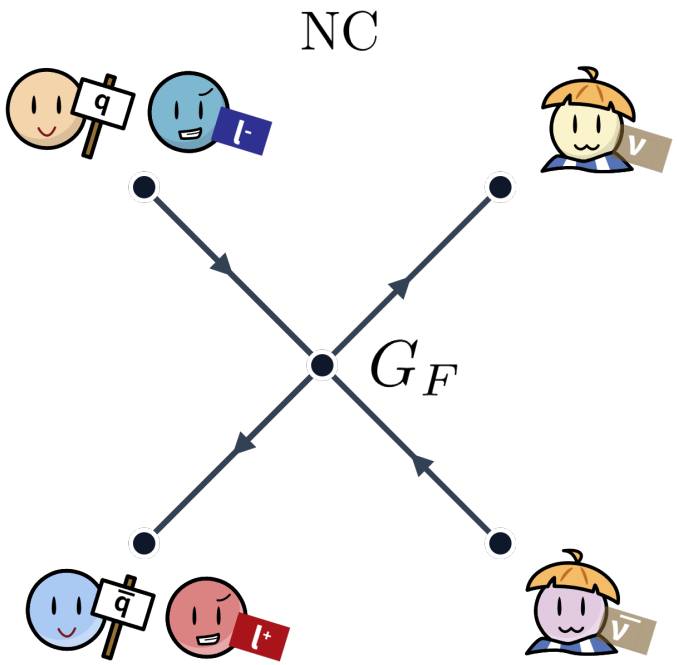
ニュートリノに関する有効相互作用（Effective Field Theory（EFT））

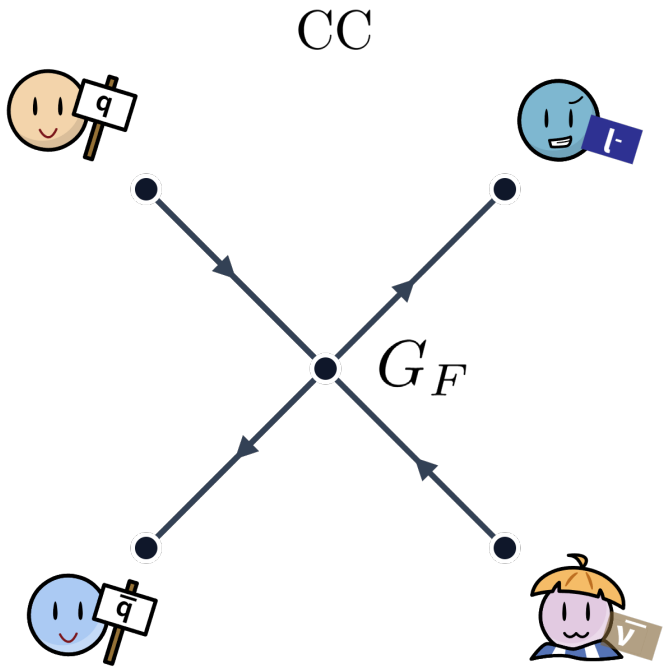
- SMで弱い相互作用のゲージボソンを積分すると(低エネルギー観測量を見たいと思うと)

$$\mathcal{L}_{\rm NC}^{\rm SM} = -2\sqrt{2}G_F \sum_{f,\alpha} (\overline{\nu_\alpha}\gamma^\mu P_L \nu_\alpha) \left[g_L^f (\overline{f}\gamma_\mu P_L f) + g_R^f (\overline{f}\gamma_\mu P_R f) \right] \qquad (f = e, u, d)$$

$$\mathcal{L}_{\rm CC}^{\rm SM} = -2\sqrt{2}G_F \sum_{\alpha,i,j} (V_{\rm CKM})_{ij}^* \, (\overline{\nu_\alpha}\gamma^\mu P_L \ell_\alpha)(\overline{d_j}\gamma_\mu P_L u_i) + \text{h.c.} \qquad \begin{pmatrix} g_L^f = T_3^f - Q_f \sin^2\theta_W \\ g_R^f = -Q_f \sin^2\theta_W \end{pmatrix}$$

要するに





ニュートリノの非標準相互作用 (Non-Standard Interaction (NSI))

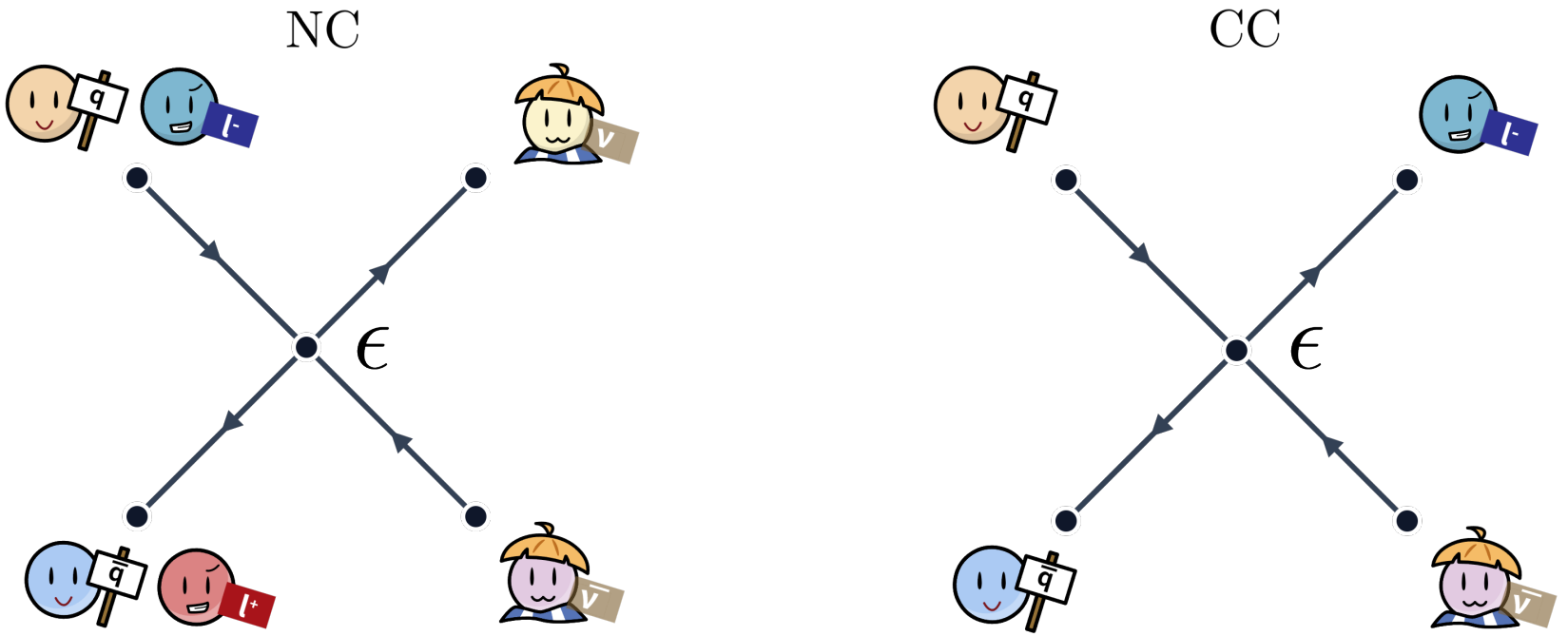
- SMに何かしらの重たい新物理の寄与があったと思うと　例えば次のレビューを参照[Dev et al. ('19)]

※次元6のみに着目

$$\mathcal{L}_{\mathrm{NC}} = -2\sqrt{2}G_F \sum_{f,P,\alpha,\beta} \epsilon^{f,P}_{\alpha\beta} \left(\overline{\nu_\alpha}\gamma^\mu P_L \nu_\beta\right)\left(\overline{f}\gamma_\mu P f\right)$$

$$\mathcal{L}_{\mathrm{CC}} = -2\sqrt{2}G_F \sum_{f,P,\alpha,\beta} \epsilon^{f,P}_{\alpha\beta} \left(\overline{\nu_\alpha}\gamma^\mu P_L \ell_\beta\right)\left(\overline{f'}\gamma_\mu P f\right) \qquad \left(f = e, u, d \; P = P_{L/R}\right)$$

新たに



ニュートリノの非標準相互作用 (Non-Standard Interaction (NSI))

- ニュートリノ振動実験への影響

$$H = \frac{1}{2E}\left[U_{\mathrm{PMNS}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Delta m^2_{21} & 0 \\ 0 & 0 & \Delta m^2_{31} \end{pmatrix} U^{\dagger}_{\mathrm{PMNS}} + a \begin{pmatrix} 1+\epsilon_{ee} & \epsilon_{e\mu} & \epsilon_{e\tau} \\ \epsilon^*_{e\mu} & \epsilon_{\mu\mu} & \epsilon_{\mu\tau} \\ \epsilon^*_{e\tau} & \epsilon^*_{\mu\tau} & \epsilon_{\tau\tau} \end{pmatrix} \right]$$

$\left(a \equiv 2\sqrt{2}\, G_F N_e E\right)$

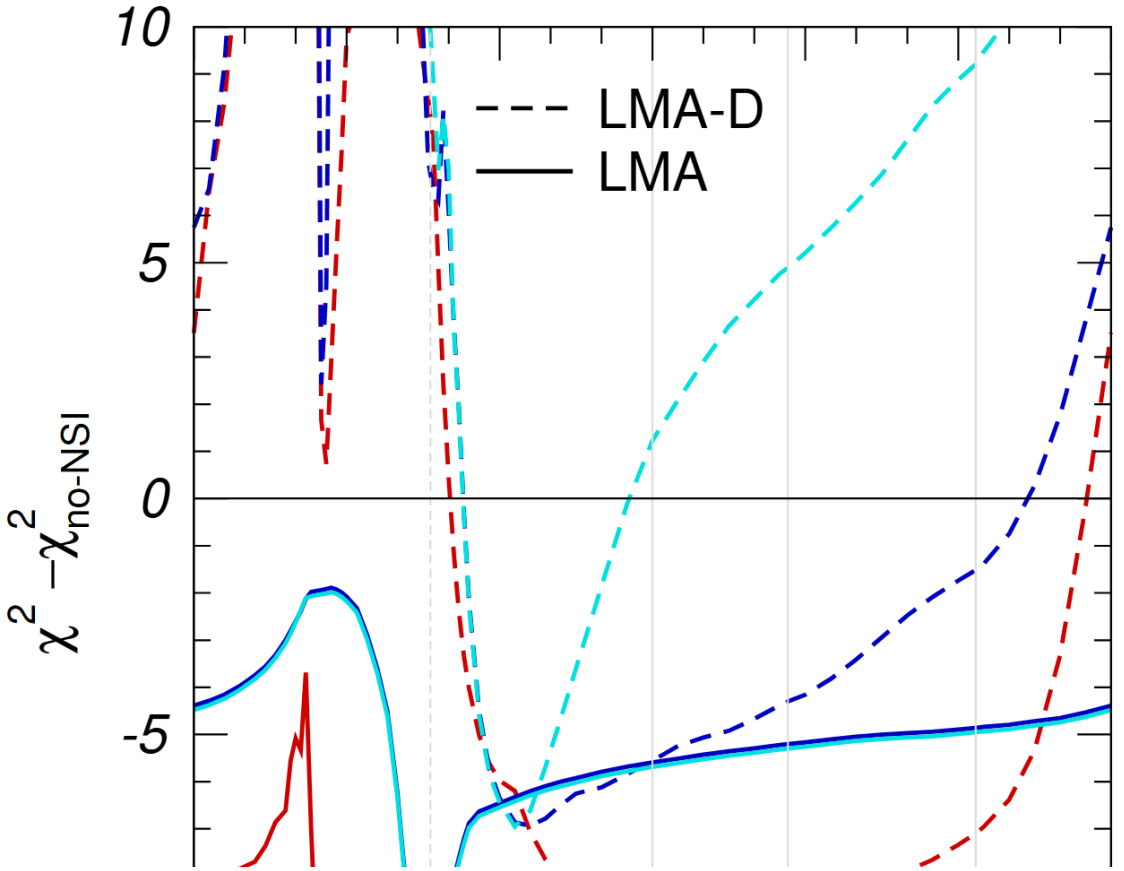
SMの寄与

新しい相互作用がニュートリノ振動に影響を及ぼす

→ εに対する制限が得られる or 新物理の発見

ニュートリノの非標準相互作用 (Non-Standard Interaction (NSI))

- e.g. 太陽ニュートリノ振動実験への影響

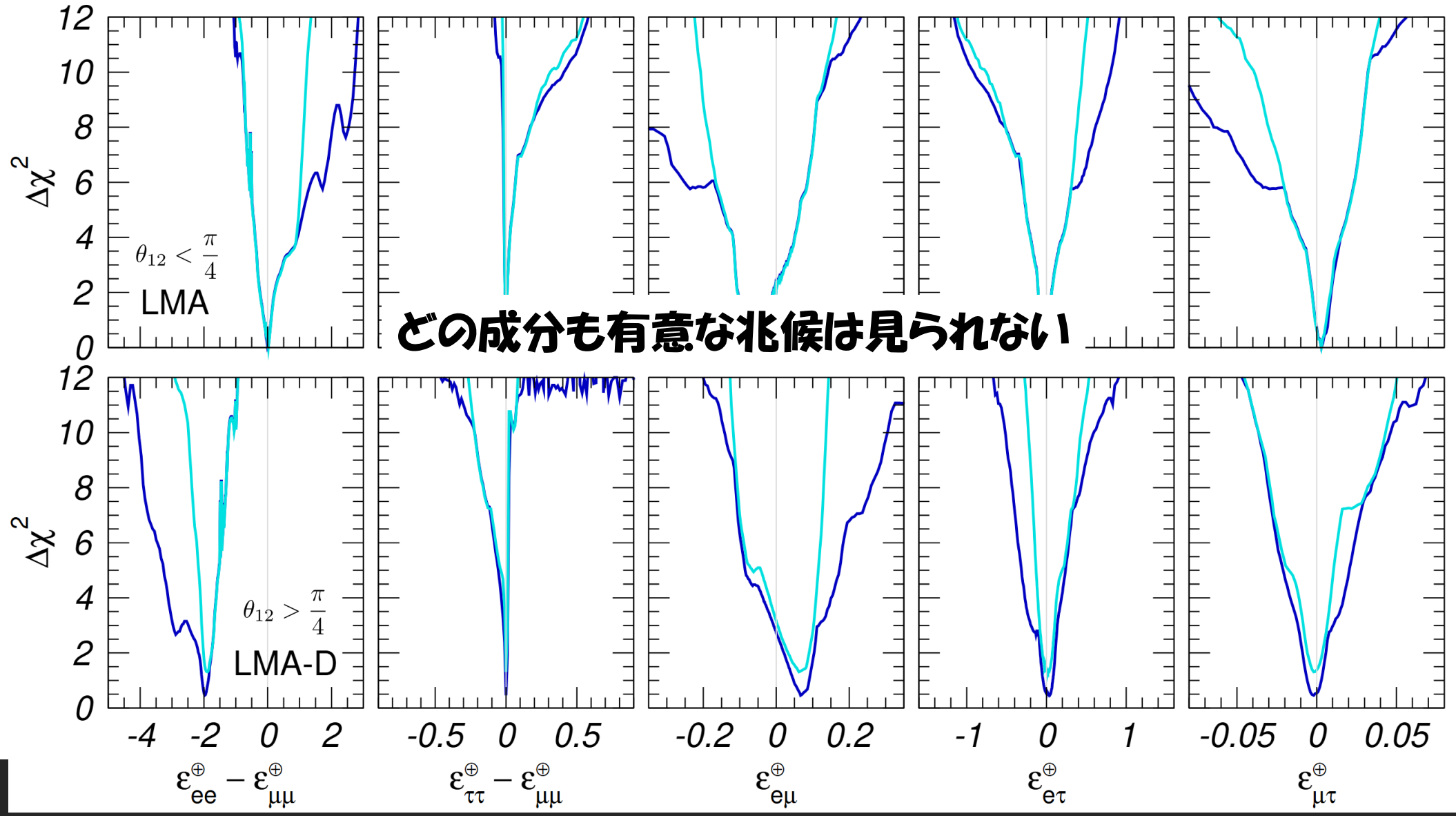


η：陽子と中性子のどちらに強く結合するか

このままではεの大きさまではわからないが、
少なくともこれまでの観測と無矛盾の大きさにしなくてはいけない

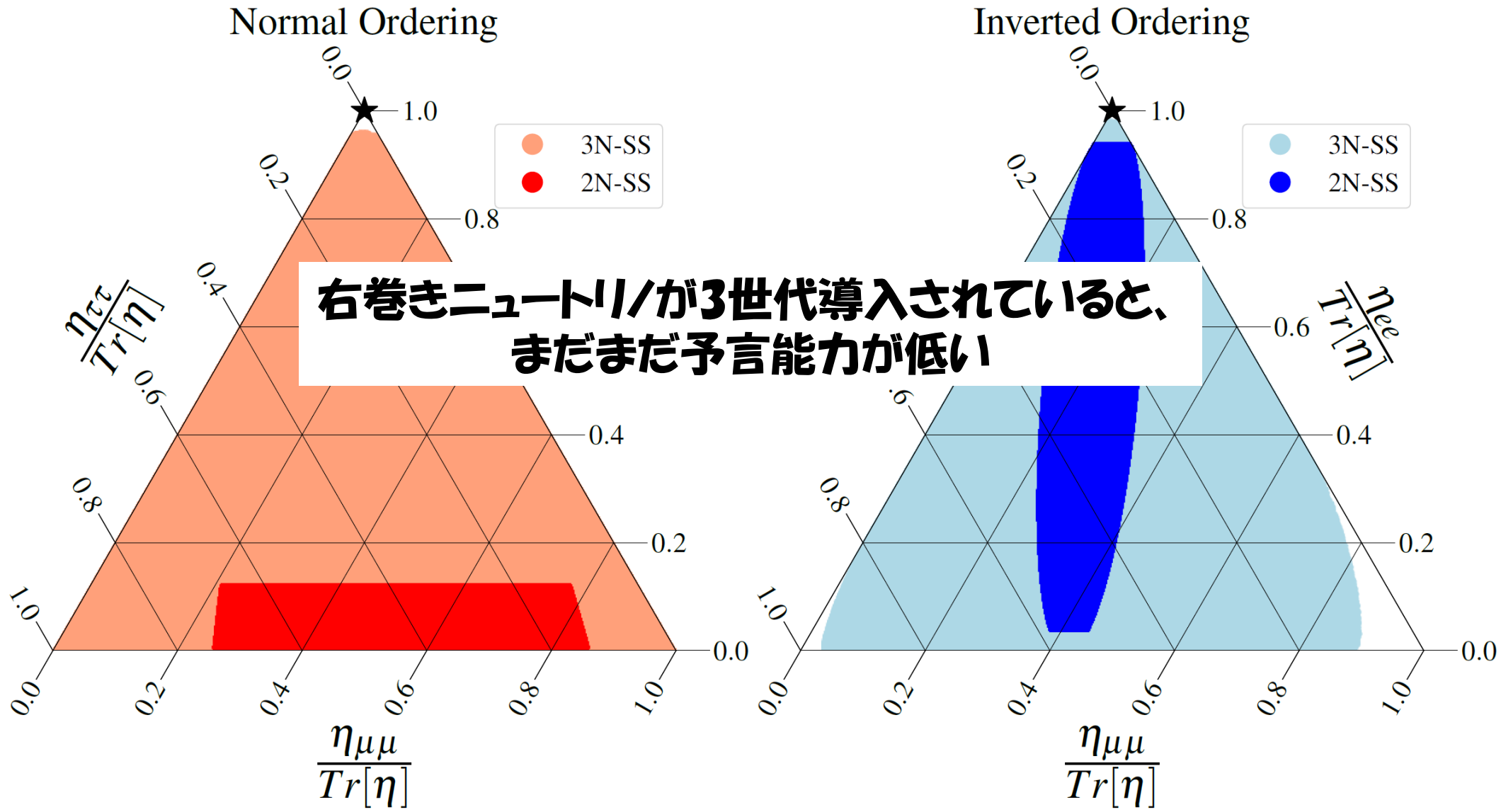
ニュートリノの非標準相互作用 (Non-Standard Interaction (NSI))

- θ_{12}のoctantへの感度



ニュートリノの非標準相互作用 (Non-Standard Interaction (NSI))

- グローバルフィットの現状 (ηをεとして読み替えてよい)



右巻きニュートリノが3世代導入されていると、
まだまだ予言能力が低い

まとめ

- 素粒子標準模型の不満足点の一部
  - ニュートリノの極微質量
  - 宇宙バリオン数非対称性
  - 暗黒物質候補

⇒ 右巻きニュートリノ(?)

- 不満足点解消の検証（右巻きニュートリノに限らず）：レプトンのフレーバーの破れ
  - 荷電レプトンのフレーバーの破れ(?)
    - 標準模型では観測できないほど小さい
    - つまり、見つかれば間違いなく新物理
  - ニュートリノの非標準相互作用(?)
    - 高次元演算子を用いると、新物理の詳細に依らない解析ができる
    - 今後の実験によってさらに明らかに
  - レプトンの世代で相互作用が違う？ ⇒ Lepton Flavor Universality（明日の講義）

ご清聴ありがとうございます