

レプトンフレーバー対称性に基づく 暗黒物質・ニュートリノ模型

Coh Miyao (宮尾 光)

東京理科大学

Workshop on Muon LFV and Beyond @ 東大理化学館

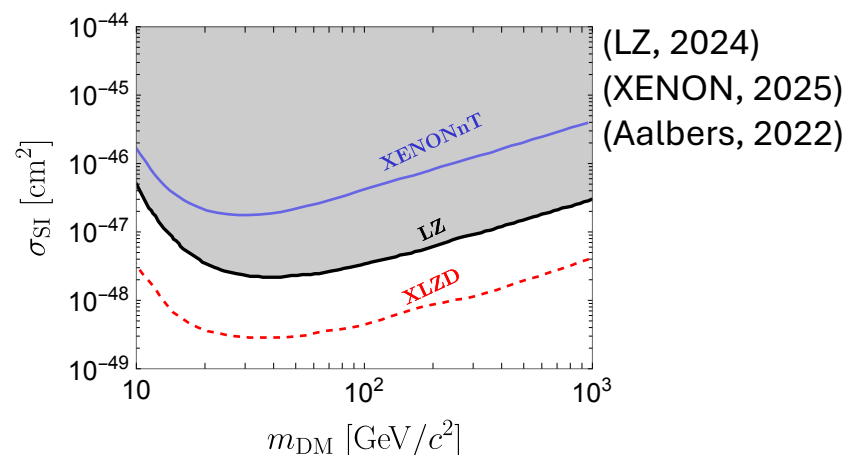
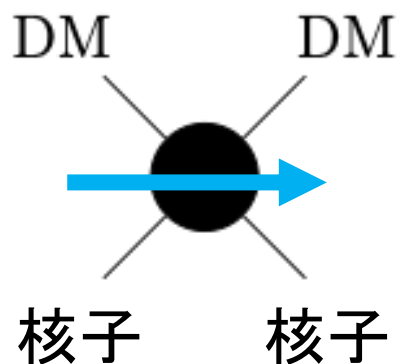
7. 8. 26

Based on

- *K. Asai, C.M., S. Okawa, K. Tsumura, Phys. Rev. D 106 (2022) 3, 035017*
- *C.M., Ph.D. Thesis*

暗黒物質(DM)について

- 地球を通過するDMによる原子核反跳を探索.
- 現時点で有意な信号は未発見.
- DM-核子散乱断面積に強い上限.



なぜDM-核子散乱が小さいのか？

→ 結合が小さい, 対称性でtree level散乱が禁止, ...

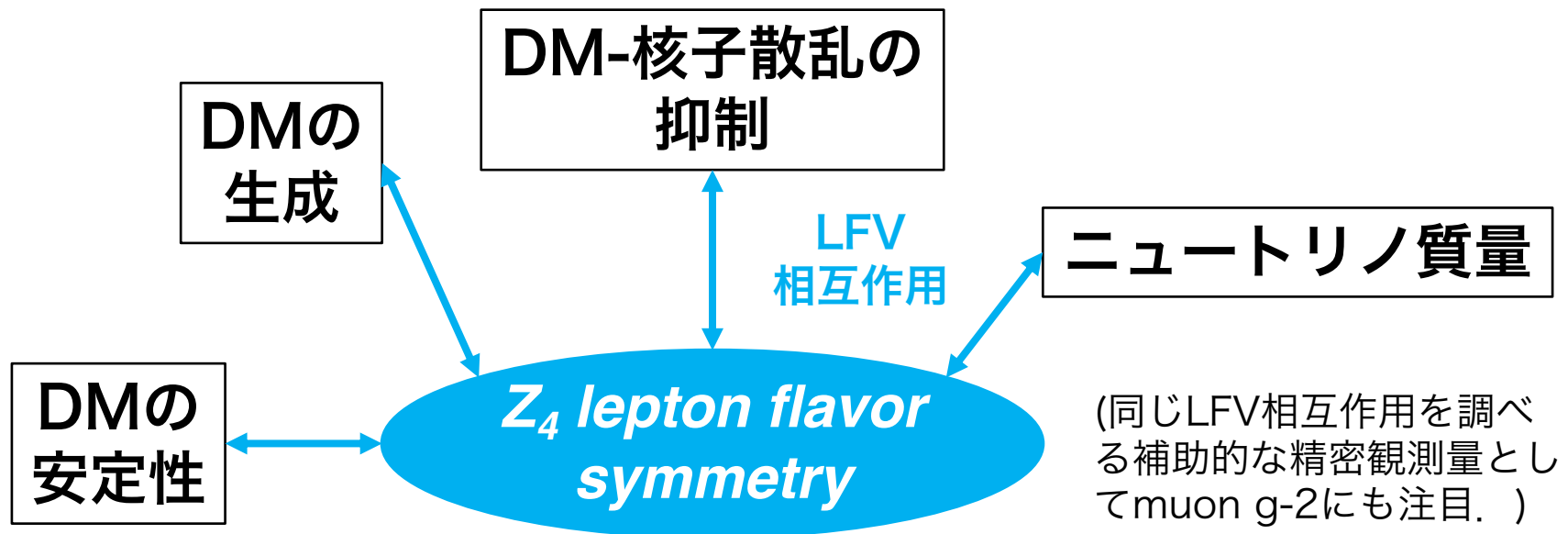
ニュートリノについて

- 標準模型(SM)では質量が記述できない.
- ニュートリノ振動実験は, 少なくとも二つのニュートリノがnon-zero質量を持つことを示す.
→ 質量の記述とその起源の理解のためには,
SMを拡張する必要がある.
- ニュートリノ振動データはフレーバー基底におけるニュートリノ質量行列の構造を制限.

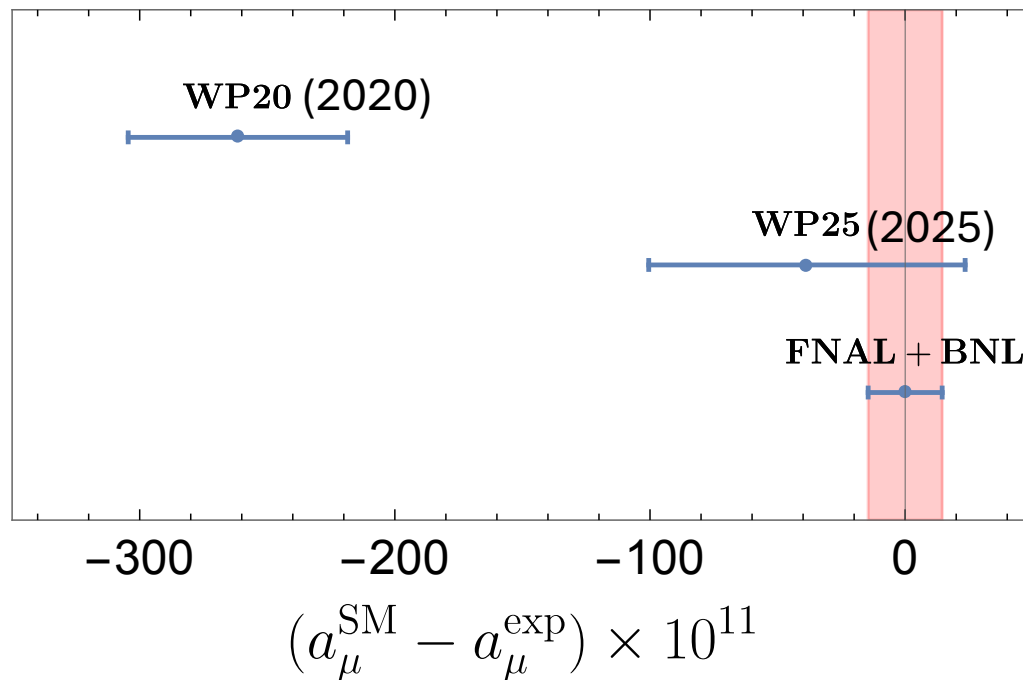
解決したいこと

問い：

- フレーバー対称性によって、DMの安定化・熱的生成・直接検出抑制を同時に実現できるか？
- さらに、現実的なニュートリノ質量・混合と両立できるか？



ミューオンg-2の乖離問題の 現在の位置付け



$$a_\mu^{\text{exp}} = 116592071.5(14.5) \times 10^{-11}$$
$$a_\mu^{\text{SM,WP20}} = 116591810(43) \times 10^{-11}$$
$$a_\mu^{\text{SM,WP25}} = 116592033(62) \times 10^{-11}$$

(Aguillard, 2025)

(Aoyama, 2020)

(Aliberti, 2025)

- WP25のlattice-basedな結果は実験値と整合.
- WP20のdata-drivenな結果は実験値と乖離.

WP20の乖離→電弱スケールの新物理への感度

問いへの答え：できる

- Z_4 レプトンフレーバー対称性がDMの安定性とLFV相互作用を与える.
- この相互作用でDMの生成・(ループレベルの)直接検出・muon g-2が関係づく.
- 厳密な Z_4 対称性ではニュートリノ振動と矛盾.
- Softに破れた Z_4 対称性と厳密なDMの Z_2 対称性を分離すればニュートリノ質量も記述可能.

Z₄対称なDM模型

- 各粒子のcharge assignmentは以下.

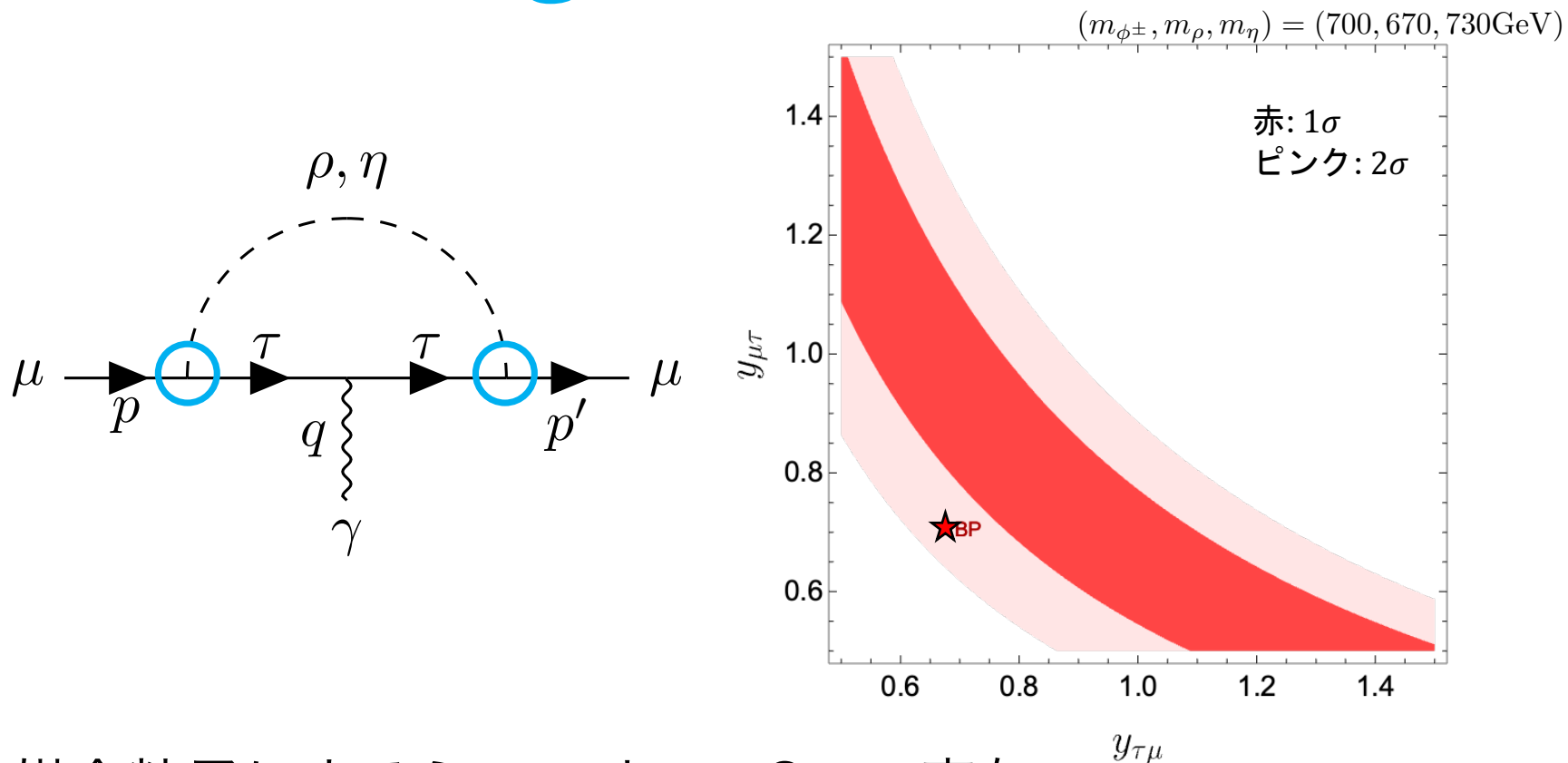
SM charge :
(SU(3)_C, SU(2)_L)_{U(1)_Y}

particle	(L _e , L _μ , L _τ)	(e _R , μ _R , τ _R)	H	Φ	Σ
SM	(1, 2) _{-1/2}	(1, 1) ₋₁	(1, 2) _{1/2}	(1, 2) _{1/2}	(1, 1) ₀
Z ₄	(1, i, -i)	(1, i, -i)	1	-1	i

$$-\mathcal{L}_{Yukawa} \supset \bar{L} \cdot \begin{pmatrix} y_e H & & \\ & y_\mu H & y_{\mu\tau} \Phi \\ & y_{\tau\mu} \Phi & y_\tau H \end{pmatrix} l_R + \text{h.c.}, \quad \mathcal{V} \supset \kappa [(H^\dagger \Phi) \Sigma^2 + \text{h.c.}]$$

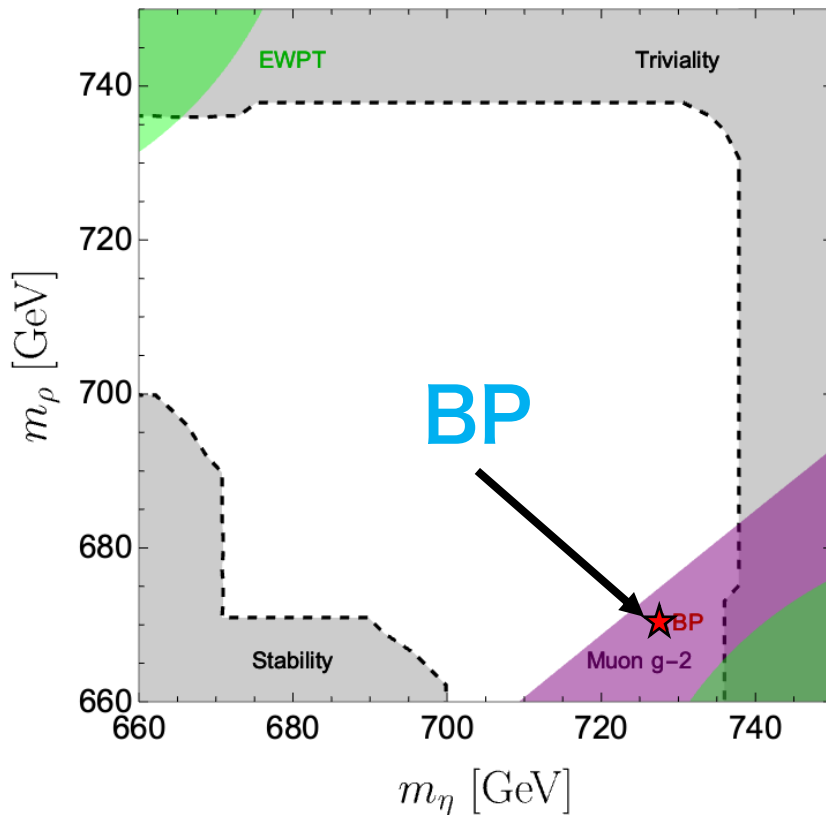
- スカラー $\Phi = \left(\phi^+ \quad \frac{\rho + i\eta}{\sqrt{2}} \right)^T$ は μ と τ をつなぐ媒介粒子.
- Σ は複素スカラー DM.
- Z₄対称性によって相互作用の構造が決定.
- Tree levelで Σ と quark は相互作用しない.

ミューオンg-2への補正



- 媒介粒子によるミューオンg-2への寄与.
- 右図の赤い領域がWP20の乖離を説明できる領域.
- 本発表ではBP選択の補助的なプローブとして扱う.

BPの整合性



$$(m_\phi, m_\rho, m_\eta, y_{\mu\tau}, y_{\tau\mu}) \\ = (700 \text{ GeV}, 670 \text{ GeV}, 730 \text{ GeV}, 0.7, 0.7)$$

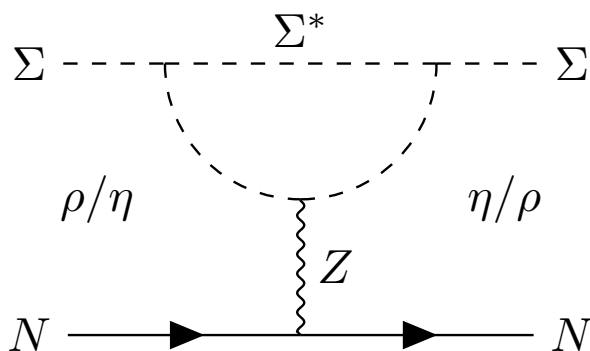
- ✓ 電弱精密測定
- ✓ Potential Stability
- ✓ Triviality
- ✓ Collider search

muon g-2 → WP20説明可

- 灰色と緑色の領域は, Stability・Triviality・EWPTによって排除.
- 紫の領域はmuon g-2を 2σ で説明可能.

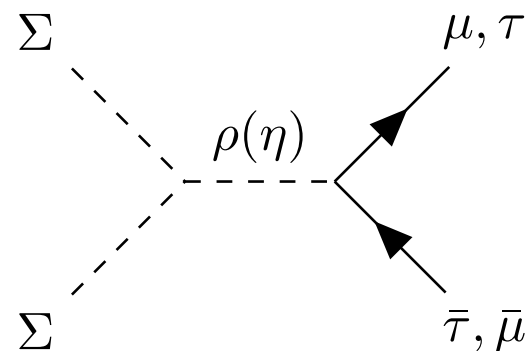
直接検出(DD)と間接検出(ID)

DD



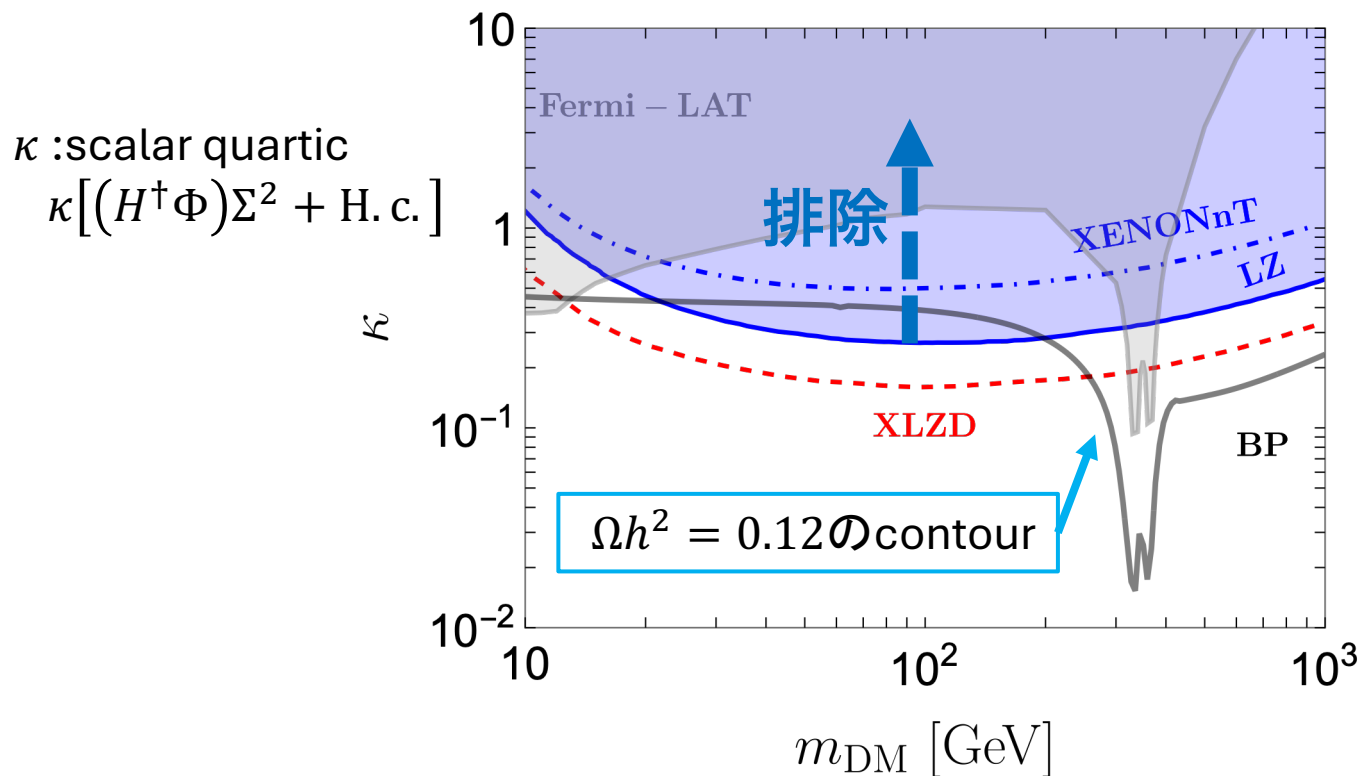
- Tree-levelの散乱は Z_4 対称性により禁止.
- Leadingな寄与は上図.

ID



- DMは $\mu\tau$ へ対消滅.
- 銀河中心からのガンマ線観測により制限あり.

現在の制限と将来感度



- 残存量を再現するパラメータ領域の大部分はLZ実験の結果によって排除.
- 採用した設定では, 軽いDM質量領域は将来感度で検証可能.

ニュートリノ模型への (素朴な)拡張

- このDM模型はそのままではニュートリノ質量（振動）が説明できない.
- 重い右巻きニュートリノを追加.

particle	(N_e, N_μ, N_τ)
SM	$(1, 1)_0$
Z_4	$(1, i, -i)$

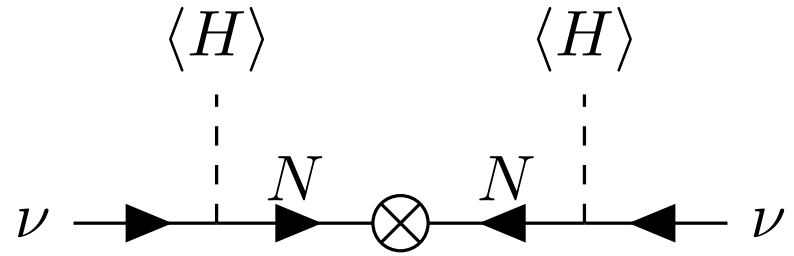
SM charge : $(SU(3)_C, SU(2)_L)_{U(1)_Y}$

Nの質量行列

$$\mathcal{M}_R(Z_4 \text{ parity}) : \begin{pmatrix} 1 & \cancel{i} & \cancel{i} \\ \cancel{i} & \cancel{1} & 1 \\ \cancel{i} & 1 & \cancel{1} \end{pmatrix}$$

- ニュートリノ質量はシーソー機構によって質量を記述.

シーソー機構



- 以下の式でニュートリノ質量は計算できる：

$$\mathcal{M}_{\nu_L} \simeq -\mathcal{M}_D \mathcal{M}_R^{-1} \mathcal{M}_D^T = \begin{pmatrix} * & 0 & 0 \\ 0 & 0 & * \\ 0 & * & 0 \end{pmatrix}$$

- ゼロが入った成分はニュートリノ振動パラメータに相関を与える.
- ゼロが多い質量行列構造は相関が強過ぎて、振動データに矛盾. [Kitagawa et al. '26]

厳密な Z_4 対称性の下では観測された
ニュートリノ混合を説明できない.

ニュートリノ模型への拡張2

particle	(N_e, N_μ, N_τ)
SM	$(1, 1)_0$
Z_4	$(1, i, -i)$

$$\mathcal{M}_R(Z_4 \text{ parity}) : \begin{pmatrix} 1 & i & -i \\ i & \cancel{1} & 1 \\ -i & 1 & \cancel{1} \end{pmatrix}$$

SM charge : $(SU(3)_C, SU(2)_L)_{U(1)_Y}$

- DMの安定性を保証する Z_2 を新たに課す.
- ニュートリノ振動を説明するためにソフトに $Z_4 \rightarrow Z_2$ へ破る項を追加.

シーソー機構 

$$\mathcal{M}_\nu^{-1} = -\frac{2}{v_{EW}^2} \begin{pmatrix} \frac{M_{ee}}{Y_e^2} & \frac{M_{e\mu}}{Y_e Y_\mu} & \frac{M_{e\tau}}{Y_e Y_\tau} \\ \frac{M_{e\mu}}{Y_e Y_\mu} & 0 & \frac{M_{\mu\tau}}{Y_\mu Y_\tau} \\ \frac{M_{e\tau}}{Y_e Y_\tau} & \frac{M_{\mu\tau}}{Y_\mu Y_\tau} & 0 \end{pmatrix}$$

C Minor型となりニュートリノ混合を再現可能. [Kitagawa et al. '26]

- DM模型の構造を保ちつつニュートリノを説明.

Summary

- Z_4 レプトンフレーバー対称性がDMの安定性とLFV相互作用を与える.
- 同じ相互作用によってDMの熱的生成・(ループレベルの)直接検出・muon $g-2$ が相関.
- 厳密な Z_4 対称性ではニュートリノ質量行列を制限し過ぎて、混合を再現できない.
- Softに破れた Z_4 対称性と厳密なDMの Z_2 対称性を分離することで、現実的なニュートリノ質量を実現可能.