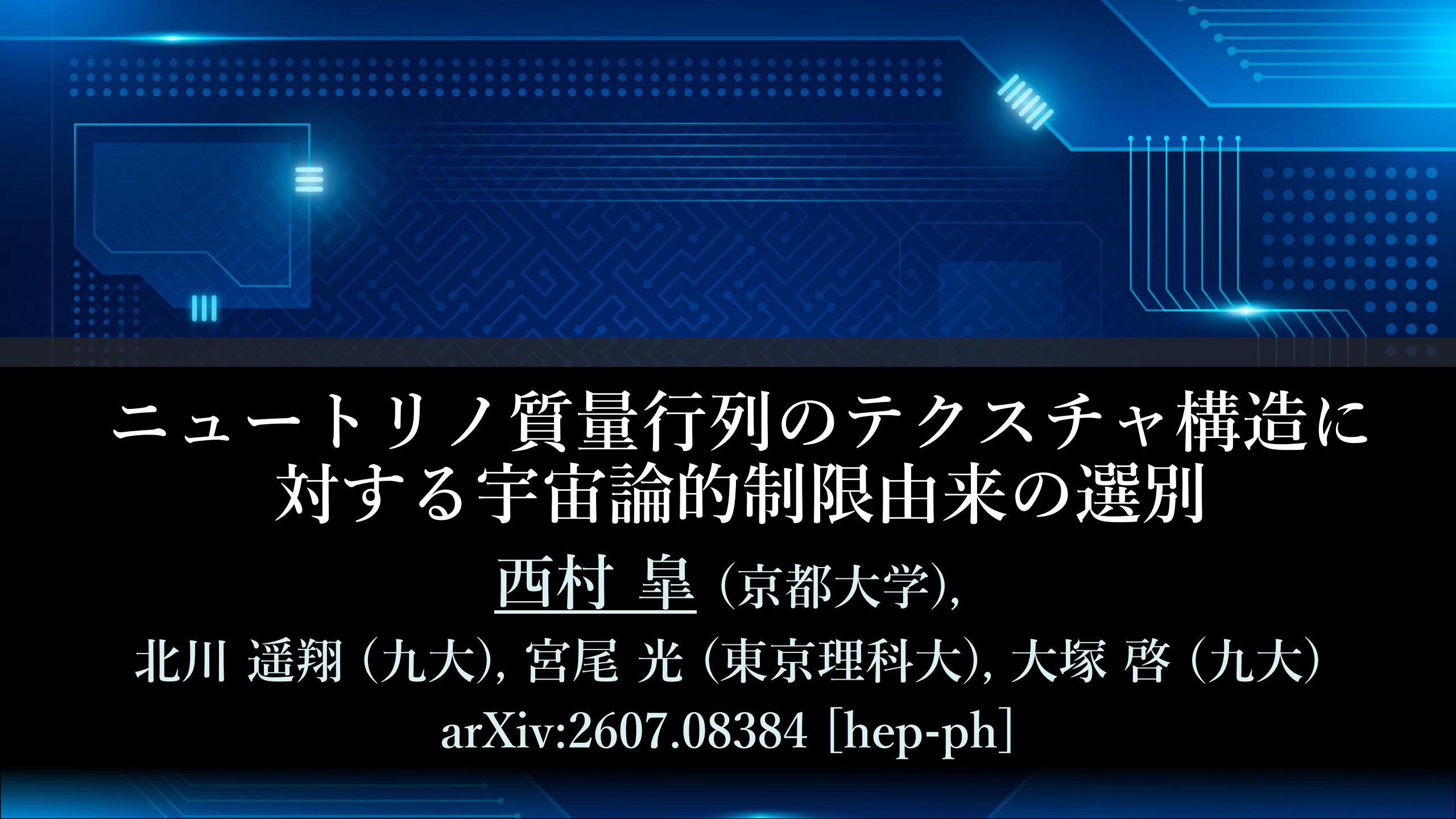




ニュートリノ質量行列のテクスチャ構造に 対する宇宙論的制限由来の選別

西村 皐 (京都大学),

北川 遥翔 (九大), 宮尾 光 (東京理科大), 大塚 啓 (九大)

arXiv:2607.08384 [hep-ph]

本研究の要点

- ニュートリノ質量行列のテクスチャ構造を、最新の宇宙論的観測を踏まえて再検討。
- two-zero texture : 質量和制限により強く制限。
one-zero texture : 生成 A I が導く広い解空間と解析的制限が無矛盾なことを確認し、許容構造を分類した。
- 非可逆選択則による one-zero texture の実現可能性も議論。

ニュートリノ質量とBSM

- 標準模型は高精度だが、ニュートリノ質量の起源は謎。

Majorana 質量を Weinberg operator によって記述：

$$\frac{c_{ij}}{\Lambda}(L_i\tilde{H})(L_j\tilde{H})$$

係数 c_{ij} の構造には、高エネルギーのフレーバー物理が反映。

→ ニュートリノ質量行列のゼロ構造は、
BSMの模型を分類する有効な入口。

two-zero texture の分類

- 荷電レプトン質量行列を対角化した基底を考える。

対称な質量行列に 2 個のゼロ成分を課す

→ 15 種類の構造

- 2 個のゼロ成分 = 2 本の複素方程式

→ 物理量の間に関係性を定める

$A_1 : \begin{pmatrix} 0 & 0 & * \\ 0 & * & * \\ * & * & * \end{pmatrix} \quad A_2 : \begin{pmatrix} 0 & * & 0 \\ * & * & * \\ 0 & * & * \end{pmatrix}$	
$B_1 : \begin{pmatrix} * & * & 0 \\ * & 0 & * \\ 0 & * & * \end{pmatrix}$	$B_2 : \begin{pmatrix} * & 0 & * \\ 0 & * & * \\ * & * & 0 \end{pmatrix}$
$B_3 : \begin{pmatrix} * & 0 & * \\ 0 & 0 & * \\ * & * & * \end{pmatrix}$	$B_4 : \begin{pmatrix} * & * & 0 \\ * & * & * \\ 0 & * & 0 \end{pmatrix}$
$C : \begin{pmatrix} * & * & * \\ * & 0 & * \\ * & * & 0 \end{pmatrix}$	
$D_1 : \begin{pmatrix} * & * & * \\ * & 0 & 0 \\ * & 0 & * \end{pmatrix}$	$D_2 : \begin{pmatrix} * & * & * \\ * & * & 0 \\ * & 0 & 0 \end{pmatrix}$
$E_1 : \begin{pmatrix} 0 & * & * \\ * & 0 & * \\ * & * & * \end{pmatrix}$	$E_2 : \begin{pmatrix} 0 & * & * \\ * & * & * \\ * & * & 0 \end{pmatrix}$
$E_3 : \begin{pmatrix} 0 & * & * \\ * & * & 0 \\ * & 0 & * \end{pmatrix}$	
$F_1 : \begin{pmatrix} * & 0 & 0 \\ 0 & * & * \\ 0 & * & * \end{pmatrix}$	$F_2 : \begin{pmatrix} * & 0 & * \\ 0 & * & 0 \\ * & 0 & * \end{pmatrix}$
$F_3 : \begin{pmatrix} * & * & 0 \\ * & * & 0 \\ 0 & 0 & * \end{pmatrix}$	

two-zero texture の解析方法 (1)

- PMNS 行列のマヨラナ位相を除いた各成分 V を用いて、質量行列を以下のように書き下す。

$$(M_{\nu}^{\text{flavor}})^*_{ij} = V_{i1}V_{j1}m_1 + e^{i\alpha_2}V_{i2}V_{j2}m_2 + e^{i\alpha_3}V_{i3}V_{j3}m_3$$

- 2つのゼロ成分 $(M_{\nu}^{\text{flavor}})^*_{\alpha\beta} = 0, (M_{\nu}^{\text{flavor}})^*_{\rho\sigma} = 0$ により、

$$e^{i\alpha_2} = \frac{m_1}{m_2} \frac{-V_{\alpha 3}V_{\beta 3}V_{\rho 1}V_{\sigma 1} + V_{\alpha 1}V_{\beta 1}V_{\rho 3}V_{\sigma 3}}{V_{\alpha 3}V_{\beta 3}V_{\rho 2}V_{\sigma 2} + V_{\alpha 2}V_{\beta 2}V_{\rho 3}V_{\sigma 3}} \equiv \frac{m_1}{m_2} R_2(\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}, \delta_{\text{CP}})$$

two-zero texture の解析方法 (2)

- 両辺の絶対値を取り、質量二乗の差で整理。

$$|e^{i\alpha_2}| = 1 \leftrightarrow \frac{m_2}{m_1} |R_2| = 1, \quad \Delta m_{21}^2 = m_2^2 - m_1^2 = m_1^2 (|R_2|^2 - 1)$$

- 順階層の場合、

$$m_1^2 = \frac{\Delta m_{21}^2}{|R_2|^2 - 1} = \frac{\Delta m_{31}^2}{|R_3|^2 - 1}, \quad m_2^2 = \frac{\Delta m_{21}^2 |R_2|^2}{|R_2|^2 - 1}, \quad m_3^2 = \frac{\Delta m_{31}^2 |R_3|^2}{|R_3|^2 - 1}$$

この和は宇宙観測から制限 → 可能なテクスチャの選別

ニュートリノ質量和の制限

- DESI の観測データに基づき、
宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) のみを考慮した上限

$$\Sigma_i m_i < 0.21 \text{ eV}$$

- バリオン音響振動 (BAO) を考慮した各階層での上限

$$\text{NO} \quad : \Sigma_i m_i < 0.113 \text{ eV}$$

$$\text{IO} \quad : \Sigma_i m_i < 0.145 \text{ eV}$$

two-zero texture の解析方法 (3)

- 比較的高精度な観測量 $\theta_{12}, \theta_{13}, \Delta m_{21}^2, \Delta m_{3l}^2$ を best-fit に固定。

$$R_2, R_3(\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}, \delta_{CP}) \rightarrow R_2, R_3(\theta_{23}, \delta_{CP})$$

- 以下の関係式により δ_{CP} を θ_{23} の関数として決定可能。

$$\frac{\Delta m_{21}^2}{|R_2(\theta_{23}, \delta_{CP})|^2 - 1} = \frac{\Delta m_{3l}^2}{|R_3(\theta_{23}, \delta_{CP})|^2 - 1}$$

two-zero texture の解析方法 (4)

- R の定義式から Majorana CP 位相も決定し、以下を導く。
 - 電子ニュートリノの有効質量 $m_{\nu_e}^{\text{eff}}$
 - $0\nu\beta\beta$ 崩壊の有効質量 $\langle m_{ee} \rangle$

$$e^{i\alpha_2} \equiv \frac{m_1}{m_2} R_2(\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}, \delta_{\text{CP}}) = \frac{m_1}{m_2} R_2(\theta_{23})$$

- KATRIN 実験 (トリチウム中の β 崩壊) と $0\nu\beta\beta$ 探索が制限を与える。

two-zero texture の選別結果

- CMB :

NO - $A_1, A_2, B_1, B_2, B_3, B_4$

IO - B_1, B_3, C

- CMB+BAO :

NO - A_1, A_2

Structure		A_1	A_2	B_1	B_2	B_3	B_4	C
CMB	NO	○	○	○	○	○	○	×
	IO	×	×	○	×	○	×	○
CMB+BAO	NO	○	○	×	×	×	×	×
	IO	×	×	×	×	×	×	×

Structure		D_1	D_2	E_1	E_2	E_3	F_1	F_2	F_3
CMB	NO	×	×	×	×	×	×	×	×
	IO	×	×	×	×	×	×	×	×
CMB+BAO	NO	×	×	×	×	×	×	×	×
	IO	×	×	×	×	×	×	×	×

A-series texture の特徴

- $0\nu\beta\beta$ については $\langle m_{ee} \rangle \cong 0$ を示すが、
 Σm_i が 0.065-0.068 eV 程度に集中し、将来観測で検証可能。
 δ_{CP} の範囲が異なり、 θ_{23} の精密測定と合わせて識別可能。

Structure	$\langle m_{ee} \rangle$ [eV]	$m_{\nu_e}^{\text{eff}}$ [eV]	$\Sigma_i m_i$ [eV]	δ_{CP}/π
A_1 texture (NO)	~ 0	~ 0.021	0.065 – 0.068	0.6 – 1.4
A_2 texture (NO)	~ 0	~ 0.021	0.065 – 0.068	0.0 – 0.5, 1.5 – 2.0
B_1 texture (NO)	> 0.058	> 0.064	> 0.19	$\sim 0.5, \sim 1.5$
B_2 texture (NO)	> 0.048	> 0.054	> 0.16	$\sim 0.5, \sim 1.5$
B_3 texture (NO)	> 0.061	> 0.067	> 0.20	$\sim 0.5, \sim 1.5$
B_4 texture (NO)	> 0.051	> 0.057	> 0.17	$\sim 0.5, \sim 1.5$

B-series texture の特徴

- CMB のみでは許容されるが、CMB+BAO の制限と衝突。

$\delta_{\text{CP}} \cong \pi/2, 3\pi/2$ を好み、 $\langle m_{ee} \rangle$ も比較的大きい。

宇宙論制限が緩和されるシナリオでは、 $0\nu\beta\beta$ で検証可能。

Structure	$\langle m_{ee} \rangle$ [eV]	$m_{\nu_e}^{\text{eff}}$ [eV]	$\sum_i m_i$ [eV]	δ_{CP}/π
A_1 texture (NO)	~ 0	~ 0.021	$0.065 - 0.068$	$0.6 - 1.4$
A_2 texture (NO)	~ 0	~ 0.021	$0.065 - 0.068$	$0.0 - 0.5, 1.5 - 2.0$
B_1 texture (NO)	> 0.058	> 0.064	> 0.19	$\sim 0.5, \sim 1.5$
B_2 texture (NO)	> 0.048	> 0.054	> 0.16	$\sim 0.5, \sim 1.5$
B_3 texture (NO)	> 0.061	> 0.067	> 0.20	$\sim 0.5, \sim 1.5$
B_4 texture (NO)	> 0.051	> 0.057	> 0.17	$\sim 0.5, \sim 1.5$

one-zero texture の分類

- 荷電レプトン質量行列を対角化した基底を考える。

対称な質量行列に 1 個のゼロ成分を課す

→ 6 種類の構造

- one-zero texture は自由度が多く、
解析式だけで全体像を把握しにくい。

→ 生成 A I を活用して分析

$G_1 : \begin{pmatrix} 0 & * & * \\ * & * & * \\ * & * & * \end{pmatrix}$	$G_2 : \begin{pmatrix} * & * & * \\ * & 0 & * \\ * & * & * \end{pmatrix}$	$G_3 : \begin{pmatrix} * & * & * \\ * & * & * \\ * & * & 0 \end{pmatrix}$
$H_1 : \begin{pmatrix} * & 0 & * \\ 0 & * & * \\ * & * & * \end{pmatrix}$	$H_2 : \begin{pmatrix} * & * & 0 \\ * & * & * \\ 0 & * & * \end{pmatrix}$	$H_3 : \begin{pmatrix} * & * & * \\ * & * & 0 \\ * & 0 & * \end{pmatrix}$

生成 A I の活用：関連研究（1）

- 拡散モデルを用いて、タイプ I シーソー模型や S'_4 モジュラーフレーバー模型を解析。
- 実験値を指定すると、それを再現する質量行列を次々に生成。
従来は観察困難だった模型の性質（自発的 CP 対称性の破れ）を導くなど、連続パラメータ探索における効率的な手法を提案。

S. Nishimura, H. Otsuka, H. Uchiyama,

- PRD 113, 055030, (2026). [arXiv:2503.21432 [hep-ph]]

- PTEP 2026, 053B08, (2026). [arXiv:2504.00944 [hep-ph]]

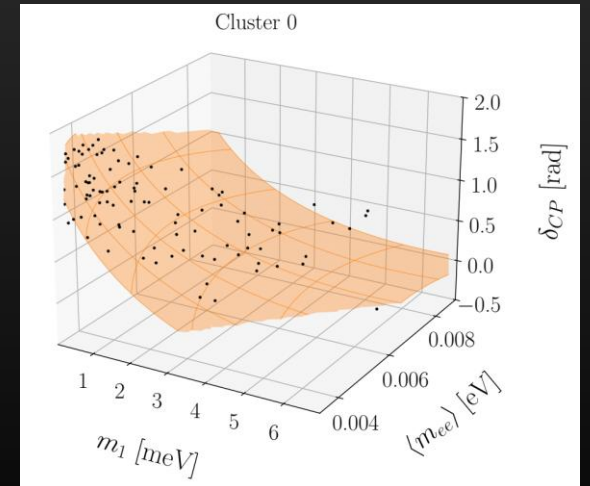
2026/08/24-28

PPP2026

生成 A I の活用：関連研究（2）

- 最適輸送理論に基づくフローマッチングを用いて、実験結果を再現するパラメータの生成を更に高速・高精度化。
- オートエンコーダを組み合わせた解析により、ニュートリノ関連の物理量に定まる非自明な相関関係を抽出（cf. 8/25 北川遥翔さんの発表）

H. Kitagawa, S. Nishimura, H. Otsuka,
- arXiv:2608.15042 [hep-ph]



one-zero texture の選別結果

- CMB :

NO - G_1 , H_1 , H_2

IO - G_2 , G_3 , H_1 , H_2 , H_3

- CMB+BAOも同様の状況で、
自由度が大きいone-zeroも
一部は排除される。

Structure		G_1	G_2	G_3	H_1	H_2	H_3
CMB	NO	○	×	×	○	○	×
	IO	×	○	○	○	○	○
CMB+BAO	NO	○	×	×	○	○	×
	IO	×	○	○	○	○	○

NO one-zero texture の特徴

- NO で許容される G_1 , H_1 , H_2 は、軽い質量和を予言する。
中でも G_1 の $\langle m_{ee} \rangle, \Sigma m_i$ は、 H_1 , H_2 よりも小さい。
 H_1 , H_2 の δ_{CP} は広い範囲に分布する。
→ 将来の宇宙論観測と $0\nu\beta\beta$ 探索の両面から検証可能。

Structure	$\langle m_{ee} \rangle$ [eV]	$m_{\nu_e}^{\text{eff}}$ [eV]	$\Sigma_i m_i$ [eV]	δ_{CP}/π
G_1 texture (NO)	0.004 – 0.010	0.008 – 0.013	0.0590 – 0.0721	0.5 – 1.5
H_1 texture (NO)	0.007 – 0.022	0.009 – 0.023	0.064 – 0.098	0.0 – 2.0
H_2 texture (NO)	0.007 – 0.021	0.010 – 0.022	0.065 – 0.094	0.0 – 2.0

IO one-zero texture の特徴

- IO では G_2, G_3, H_1, H_2, H_3 が許容され、
 $\langle m_{ee} \rangle, m_{\nu_e}^{\text{eff}}$ は NO より大きく、重複しない範囲に分布。

- 特に H_1, H_2 では、
 $\delta_{\text{CP}} \cong \pi/2, 3\pi/2$

Structure	$\langle m_{ee} \rangle$ [eV]	$m_{\nu_e}^{\text{eff}}$ [eV]	$\sum_i m_i$ [eV]	δ_{CP}/π
G_2 texture (IO)	0.047 – 0.053	0.049 – 0.054	0.111 – 0.135	0.0 – 2.0
G_3 texture (IO)	0.052 – 0.061	0.054 – 0.063	0.136 – 0.166	0.0 – 2.0
H_1 texture (IO)	0.047 – 0.059	0.047 – 0.059	0.0975 – 0.1541	0.42 – 0.58 1.4 – 1.6
H_2 texture (IO)	0.047 – 0.063	0.048 – 0.063	0.0997 – 0.1668	0.44 – 0.56 1.4 – 1.6
H_3 texture (IO)	0.049 – 0.056	0.051 – 0.058	0.1228 – 0.1467	0.0 – 2.0

one-zero texture の解析的確認 (1)

- 生成 A I からの結果を踏まえつつ、one-zero 条件と三角不等式を用いて許容範囲を独立に検証する。

$$(M_{\nu}^{\text{flavor}})^*_{ij} = V_{i1}V_{j1}m_1 + e^{i\alpha_2}V_{i2}V_{j2}m_2 + e^{i\alpha_3}V_{i3}V_{j3}m_3 = 0$$

$$-V_{i1}V_{j1}m_1 = e^{i\alpha_2}V_{i2}V_{j2}m_2 + e^{i\alpha_3}V_{i3}V_{j3}m_3$$

$$\left| |V_{i2}V_{j2}m_2| - |V_{i3}V_{j3}m_3| \right| \leq |V_{i1}V_{j1}m_1| \leq \left| |V_{i2}V_{j2}m_2| + |V_{i3}V_{j3}m_3| \right|$$

one-zero texture の解析的確認 (2)

- $\theta_{13}, \Delta m_{21}^2, \Delta m_{3l}^2$ などを NuFIT の best-fit に固定。

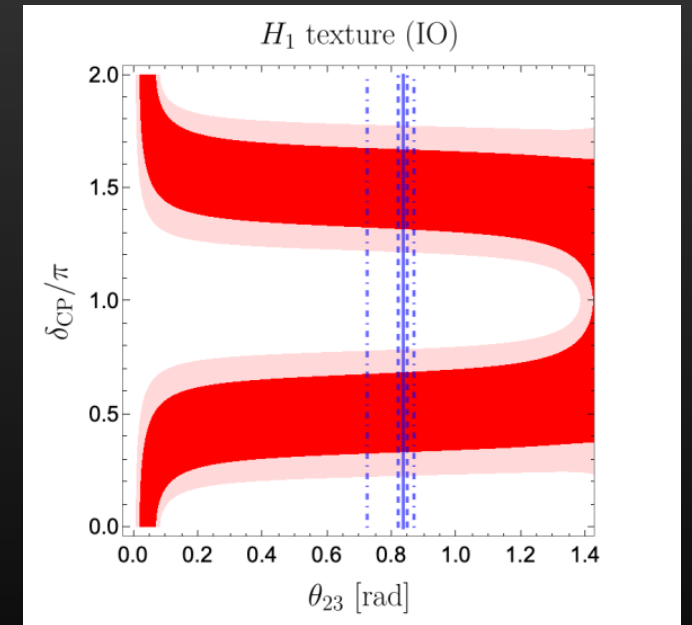
Σm_i を宇宙論的に許された範囲内で動かし、

$\delta_{\text{CP}}-\theta_{23}$ 平面における許容領域を描く。

- 例) H1 (IO)

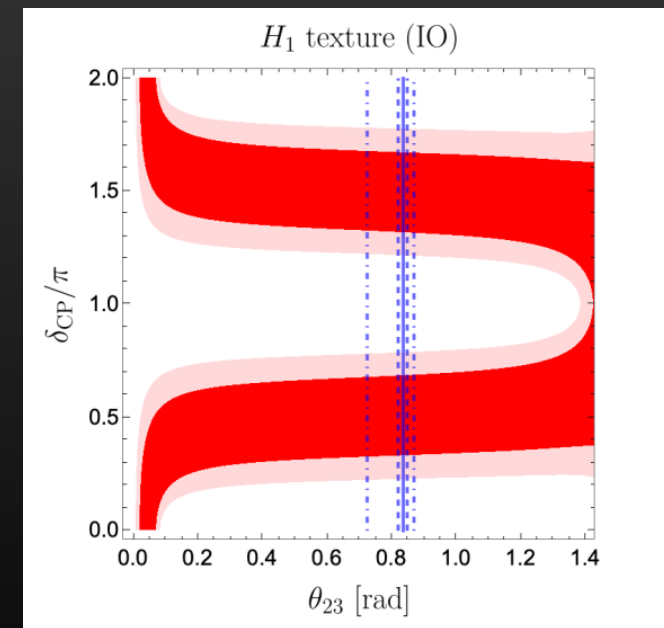
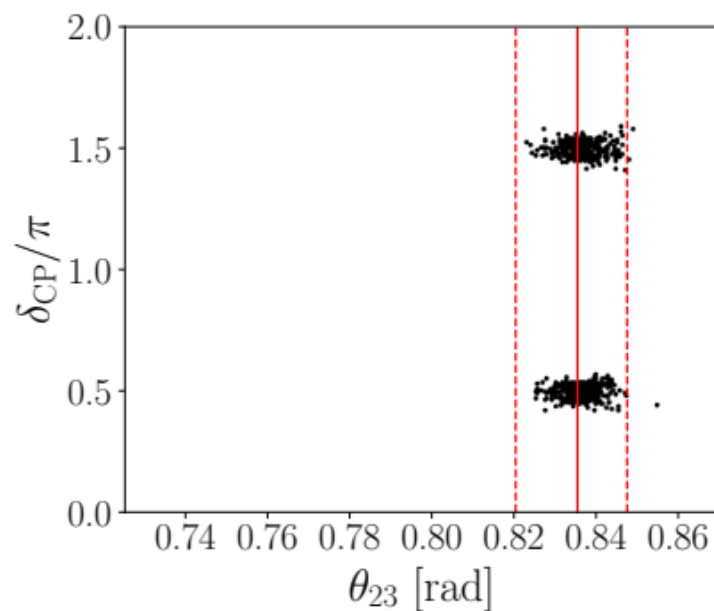
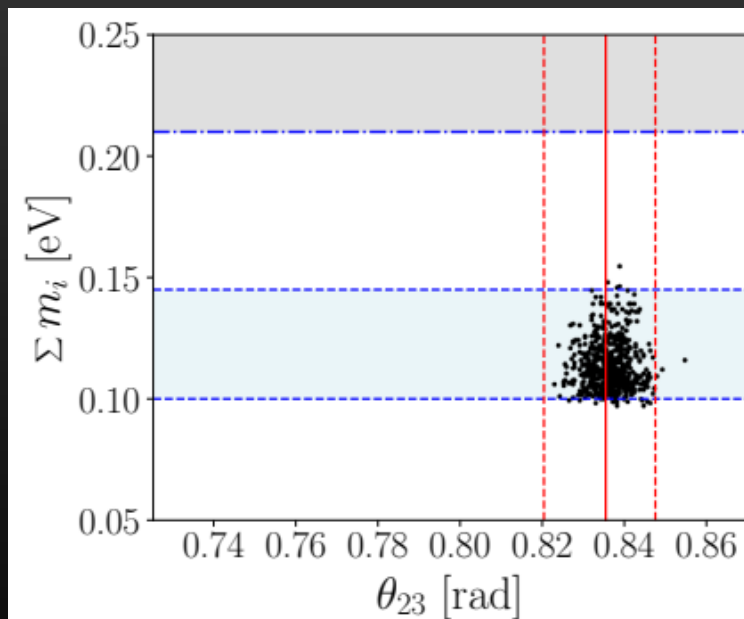
薄い赤 : $\Sigma_i m_i < 0.21 \text{ eV}$ (CMB)

濃い赤 : $\Sigma_i m_i < 0.145 \text{ eV}$ (CMB+BAO)



one-zero texture の解析的確認 (3)

- 両者の結果は確かに無矛盾で、H1 の $\delta_{\text{CP}} \cong \pi/2, 3\pi/2$ 等も再現。



Minor 構造の検討

- 逆行列のゼロ成分を考える

Minor 構造も同様に解析できる。

- CMB+BAOを考える上では、

two-zero : D1, D2 (NO)

one-zero : 様々許容

Structure		A_1	A_2	B_1	B_2	B_3	B_4	C
CMB	NO	×	×	○	○	○	○	○
	IO	×	×	×	○	×	○	×
CMB+BAO	NO	×	×	×	×	×	×	×
	IO	×	×	×	×	×	×	×

Structure		D_1	D_2	E_1	E_2	E_3	F_1	F_2	F_3
CMB	NO	○	○	×	×	×	×	×	×
	IO	×	×	×	×	×	×	×	×
CMB+BAO	NO	○	○	×	×	×	×	×	×
	IO	×	×	×	×	×	×	×	×

Structure		G_1	G_2	G_3	H_1	H_2	H_3
CMB	NO	×	○	○	○	○	○
	IO	○	○	○	○	○	×
CMB+BAO	NO	×	○	○	○	○	○
	IO	○	×	×	○	○	×

texture zero の起源

- one-zero texture が許容 → なぜその成分だけがゼロ？
- 非可逆的対称性に基づく実現可能性を考える。
非可逆な選択則の下では、場は単一の群電荷ではなく、
複数の元を含む「クラス」によって特徴づけられる。

非可逆選択則の例

- Z_3 対称性の Z_2 gauging を考えると、2つのクラスで計算規則が定まり、通常の群論的議論と異なる描像を実現。

$$[g^0] = \{g_0\}, \quad [g^1] = \{g_1, g_2\}$$

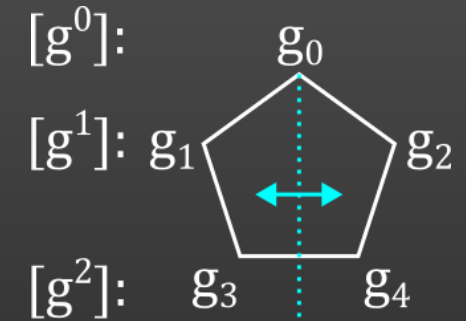
$$[g^0] \cdot [g^0] = [g^0]$$

$$[g^0] \cdot [g^1] = [g^1]$$

$$[g^1] \cdot [g^1] = [g^0] \oplus [g^1]$$

H-series の実現

- Z_2 gauging of Z_5 :
3つのクラス $[g^0], [g^1], [g^2]$ が現れる。
- Two Higgs doublet 模型または
MSSM 型の Higgs 構造を考えると、
H1, H2, H3 texture を実現できる。



	$L_i = E_i$	H_u	H_d
H_1	$\{[g^0], [g^1], [g^2]\}$	$[g^1]$	$[g^0]$
	$\{[g^0], [g^2], [g^1]\}$	$[g^2]$	$[g^0]$
	$\{[g^1], [g^0], [g^2]\}$	$[g^1]$	$[g^0]$
	$\{[g^2], [g^0], [g^1]\}$	$[g^2]$	$[g^0]$
H_2	$\{[g^0], [g^1], [g^2]\}$	$[g^2]$	$[g^0]$
	$\{[g^0], [g^2], [g^1]\}$	$[g^1]$	$[g^0]$
	$\{[g^1], [g^2], [g^0]\}$	$[g^1]$	$[g^0]$
	$\{[g^2], [g^1], [g^0]\}$	$[g^2]$	$[g^0]$
H_3	$\{[g^1], [g^0], [g^2]\}$	$[g^2]$	$[g^0]$
	$\{[g^1], [g^2], [g^0]\}$	$[g^2]$	$[g^0]$
	$\{[g^2], [g^0], [g^1]\}$	$[g^1]$	$[g^0]$
	$\{[g^2], [g^1], [g^0]\}$	$[g^1]$	$[g^0]$

G-series の実現

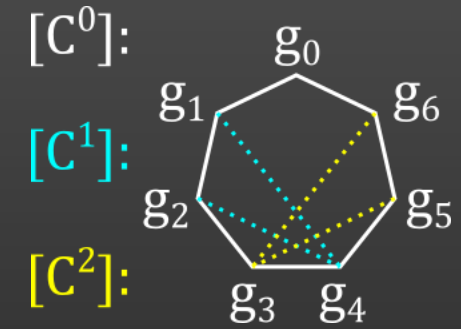
- Z_3 gauging of Z_7 :

3つのクラス C^0, C^1, C^2 が現れ、

C^1, C^2 の間で S_2 入れ替え対称性が成立。

- 適切なクラスを各場に割り当てれば、

G1, G2, G3 texture を実現できる。



	L_i	E_i	H_u	H_d
G_1	$\{C^0, C^1, C^2\}$	$\{C^0, C^2, C^1\}$	C^1	C^0
	$\{C^0, C^1, C^2\}$	$\{C^0, C^2, C^1\}$	C^2	C^0
	$\{C^0, C^2, C^1\}$	$\{C^0, C^1, C^2\}$	C^1	C^0
	$\{C^0, C^2, C^1\}$	$\{C^0, C^1, C^2\}$	C^2	C^0
G_2	$\{C^1, C^0, C^2\}$	$\{C^2, C^0, C^1\}$	C^1	C^0
	$\{C^1, C^0, C^2\}$	$\{C^2, C^0, C^1\}$	C^2	C^0
	$\{C^2, C^0, C^1\}$	$\{C^1, C^0, C^2\}$	C^1	C^0
	$\{C^2, C^0, C^1\}$	$\{C^1, C^0, C^2\}$	C^2	C^0
G_3	$\{C^1, C^2, C^0\}$	$\{C^2, C^1, C^0\}$	C^1	C^0
	$\{C^1, C^2, C^0\}$	$\{C^2, C^1, C^0\}$	C^2	C^0
	$\{C^2, C^1, C^0\}$	$\{C^1, C^2, C^0\}$	C^1	C^0
	$\{C^2, C^1, C^0\}$	$\{C^1, C^2, C^0\}$	C^2	C^0

総括

- 近年の宇宙論的観測などに基づいてテクスチャ構造を再解析。

two-zero texture : CMB+BAO により大きく制限され、
A1, A2 (NO) のみが許容される。

one-zero texture : G1, H1, H2 (NO)
G2, G3, H1, H2, H3 (IO)

- 不等式に基づく解析的調査 + 生成 A I による現実的な分布探索

総括

- 許容される one-zero texture の起源として非可逆選択則を議論。

例：H-series $\rightarrow Z_2$ gauging of Z_5

G-series $\rightarrow Z_3$ gauging of Z_7

- テクスチャ構造とその背後の選択則は、
今後の $\delta_{\text{CP}}, \theta_{23}, \Sigma m_i, \langle m_{ee} \rangle$ の測定と密接に関与。