

ニュートリノのCP対称性の破れと 宇宙のバリオン数非対称性

発表者

金田 佑哉(新潟大)

共同研究者

清水勇介(広島大), 谷本盛光(新潟大), 柳田勉(東大/IPMU)

2017/2/4 第30回 ニュートリノ研究会

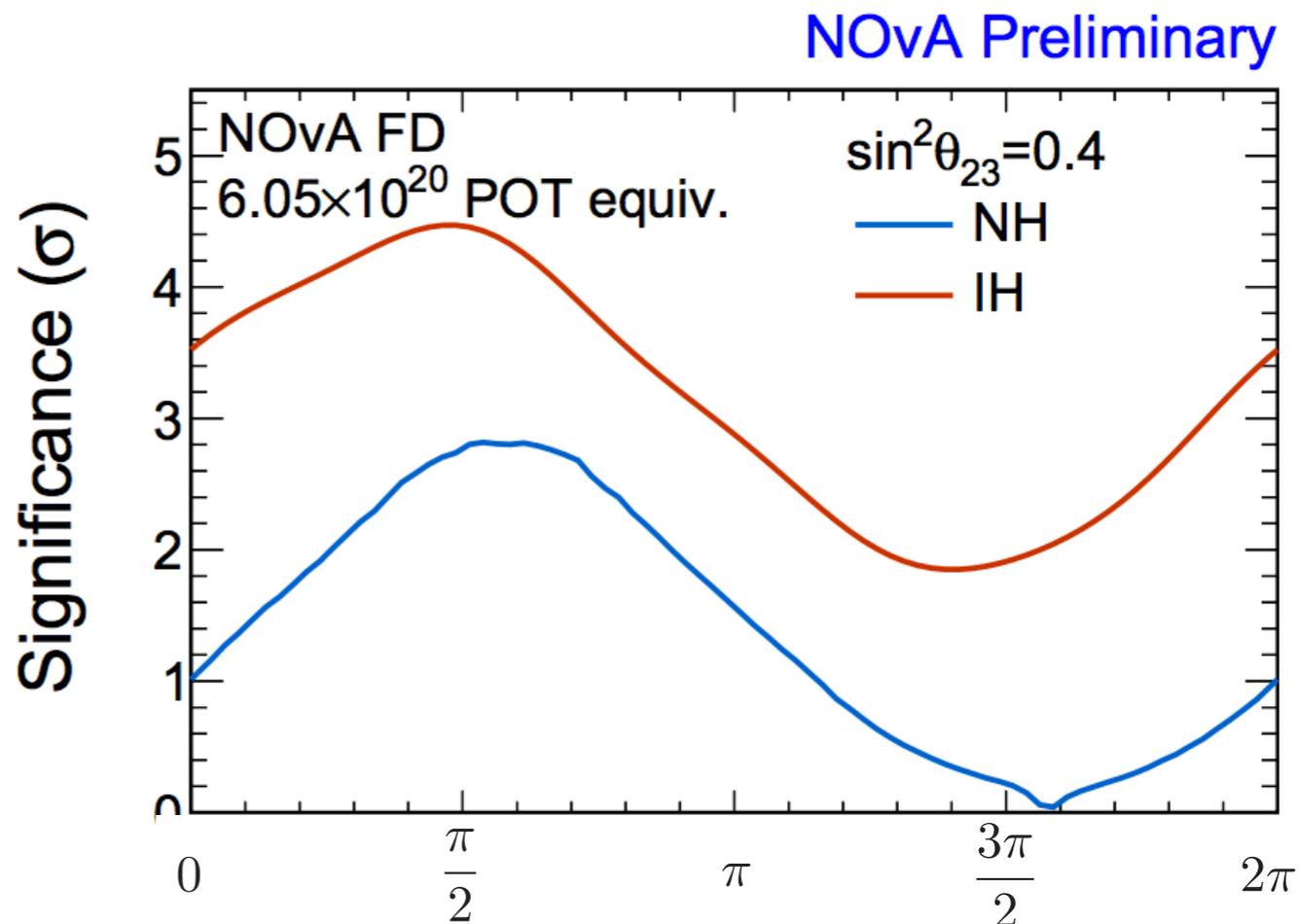
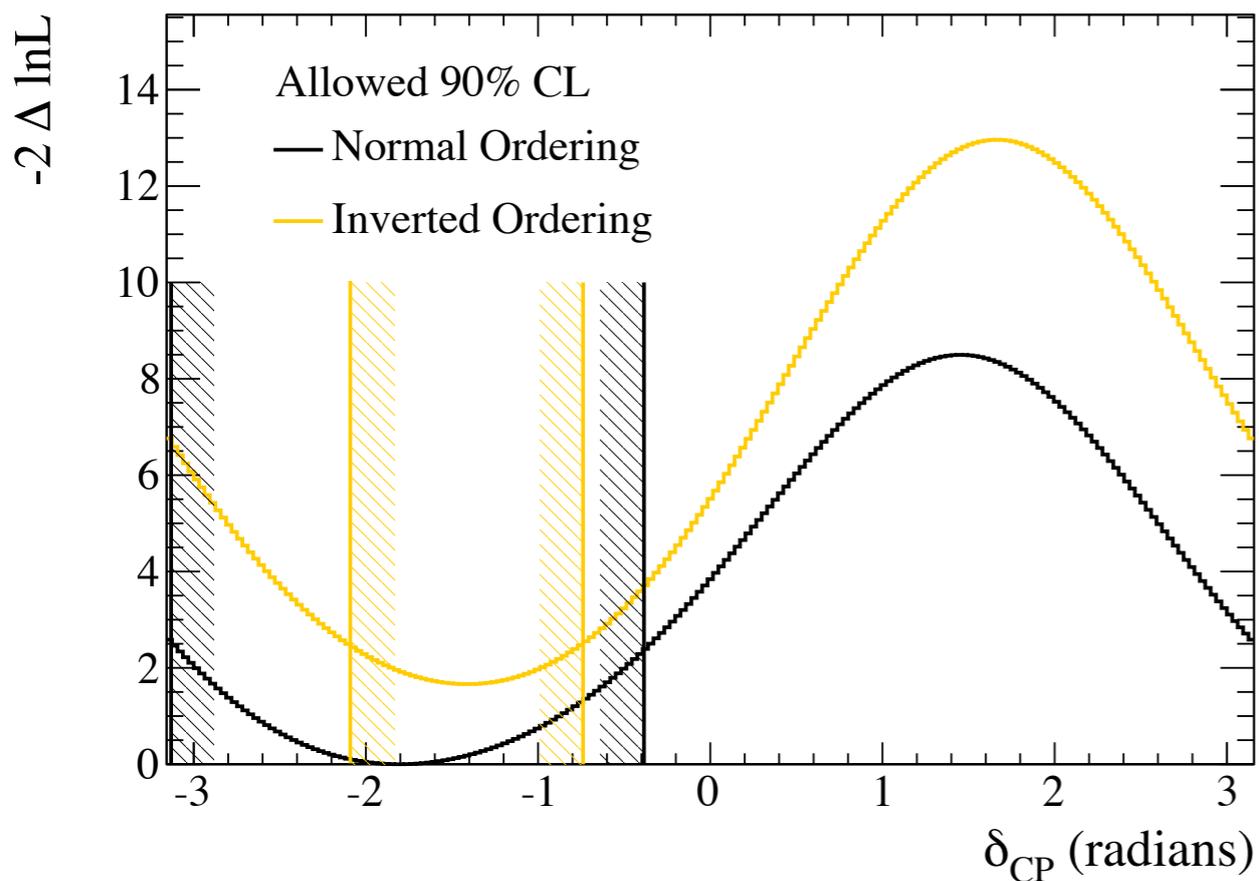
INTRODUCTION

δ_{CP} is defined in PDG.

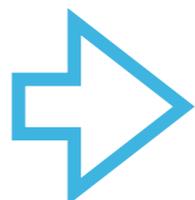
- ▶ レプトンのCP位相 δ_{CP} が測定され始めている!

T2K

NOvA



- ▶ $\delta_{CP} \sim -\pi/2$?
- ▶ **Normal hierarchy?**



様々なニュートリノの性質を
少ないパラメータで説明できないか?

Contents

1. The Occam's Razor Approach

2-1. See-Saw Mechanism & The Texture Zeros

2-2. The Sign of Universe's Baryon Asymmetry

2. Numerical Analysis

3. Summary

The Occam's Razor Approach

See-Saw Mechanism

SMに右巻きニュートリノを導入する

$$\bar{l}_L m_D N + \frac{1}{2} \overline{N^C} M_R N + h.c.$$

Neutrino Mass Matrix

$$M = \begin{pmatrix} 0 & m_D \\ m_D^T & M_R \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{diagonalization}} \begin{pmatrix} m_\nu & 0 \\ 0 & M_I \end{pmatrix}$$

active neutrino massと次の関係にある $m_\nu = -m_D M_R^{-1} m_D^T$

➡ 自然に小さなニュートリノ質量を説明!! $m_\nu \quad (m_D \ll M_R)$

See-Saw Mechanism

['77 P. Minkowski; '79 T. Yanagida; '79 Gell-Mann, Ramond, Slansky]

e.g.) $\left. \begin{array}{l} M_R \simeq \mathcal{O}(10^{11}) \text{ GeV} \\ m_D \simeq \mathcal{O}(1) \text{ GeV} \end{array} \right\} m_\nu \simeq \mathcal{O}(10^{-2}) \text{ eV} \text{ を実現!!}$

Degree of Freedom in see-saw Mechanism

$$m_\nu = -m_D M_R^{-1} m_D^T$$

$$\overline{m}_\nu = U_{\text{MNS}}^T m_\nu U_{\text{MNS}} \quad \overline{M}_R \simeq M_R$$

(M_E M_R : diagonal base)

(\overline{M}_R , \overline{m}_ν : mass eigenstate)

$$M_R : 3$$

$$m_D : 9 \times 2 - 3 = 15$$

total : 18

Model parameters

>

$$\overline{M}_R : 3$$

$$\overline{m}_\nu : 3$$

$$U_{\text{MNS}} : 3 + 1 + 2 = 6$$

total : 12

Observable values

質量構造・行列要素を特定することはできない...

Degree of Freedom in Two Right Handed Neutrinos

Lepton mass term : $\bar{l}_L M_E e_R + \bar{l}_L m_D N + \frac{1}{2} \overline{N^C} M_R N + h.c.$

RH neutrino : 3世代 ▶ 2世代

(M_E M_R : diagonal base)

M_R : ~~3~~ ▶ **2**

m_D : ~~$9 \times 2 - 3 = 15$~~
 $6 \times 2 - 3 = 9$

total : ~~18~~ ▶ 11

Model parameters

>

$\overline{M_R}$: ~~3~~ ▶ **2** ↙ 1 massless

$\overline{m_\nu}$: ~~3~~ ▶ **2**

U_{MNS} : ~~$3 + 1 + 2 = 6$~~
 $3 + 1 + 1 = 5$

total : ~~12~~ ▶ 9

Observable values

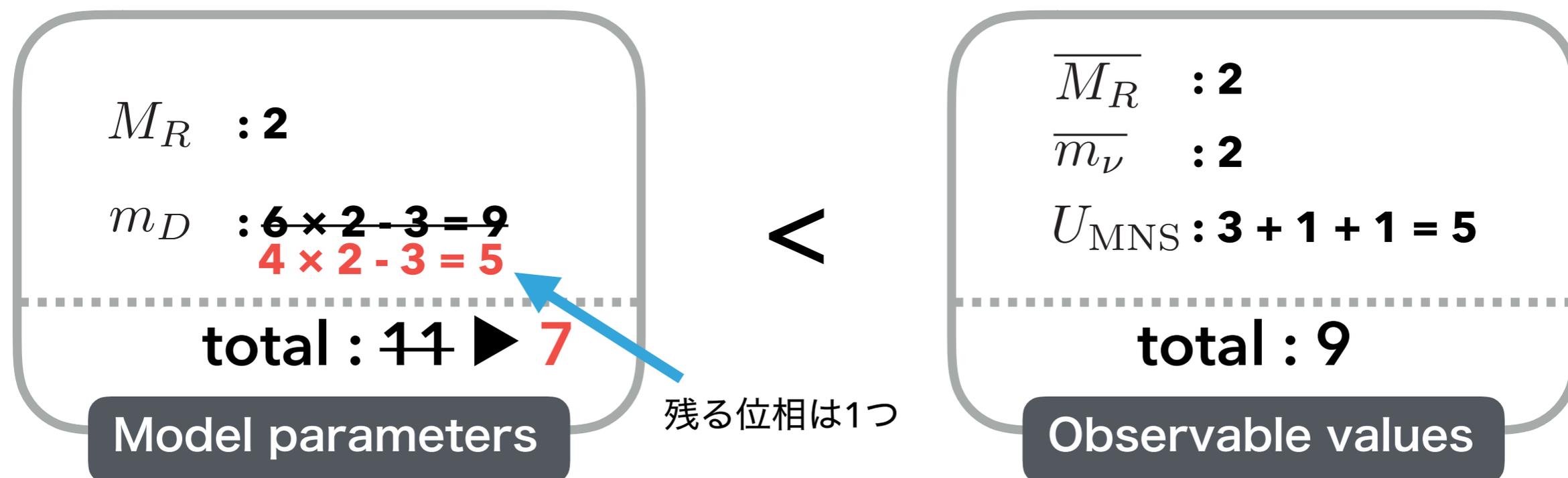
まだ、質量行列構造に予言力はない...

Texture Zeroを導入

Degree of Freedom in The Occam's Razor Approach

Lepton mass term : $\bar{l}_L M_E e_R + \bar{l}_L m_D N + \frac{1}{2} \overline{N^C} M_R N + h.c.$

Two zero texture $m_D^T = \begin{pmatrix} a & b & 0 \\ 0 & c & d \end{pmatrix}, m_D^T = \begin{pmatrix} a & 0 & b \\ 0 & c & d \end{pmatrix} \dots \text{etc.}$



質量行列構造に予言力がある!!

Degree of Freedom in The Occam's Razor Approach

右巻きニュートリノのスケール変換をする

$$m_D^T = \begin{pmatrix} a & b & 0 \\ 0 & c & d \end{pmatrix}_{LR}$$

$$M_R^{-1} = \frac{1}{M_0} \begin{pmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} k'_1 & 0 \\ 0 & k'_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k'_1 & 0 \\ 0 & k'_2 \end{pmatrix}$$

(位相は省略)

after the see-saw mechanism

$$m_\nu = m_D M_R^{-1} m_D^T$$

$$= m_D \begin{pmatrix} k'_1 & 0 \\ 0 & k'_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k'_1 & 0 \\ 0 & k'_2 \end{pmatrix} m_D^T$$

$$\downarrow = \begin{pmatrix} a & 0 \\ b & c \\ 0 & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k'_1 & 0 \\ 0 & k'_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{ak'_1}{bk'_1} & 0 \\ 0 & \frac{ck'_2}{dk'_2} \end{pmatrix}$$

Without loss of generality

$$ak'_1 = dk'_2$$

$$bk'_1 = ck'_2$$

two parameters are not free!!

The Occam's Razor Approach

K. Harigaya, M. Ibe, T. T. Yanagida
Phys. Rev. D 86, 013002

Lepton mass term : $\bar{l}_L M_E e_R + \bar{l}_L m_D N + \frac{1}{2} \overline{N^C} M_R N + h.c.$

M_R : **2 (Diagonal)**

m_D : **Two Zero Texture**

total : 5

Model parameters

=

Δm_{12}^2 Δm_{13}^2

θ_{12} θ_{23} θ_{13}

total : 5

Observed values

Occam's Razor

Results

$\delta_{CP} \simeq \pm\pi/2$ を予言

さらに**IH**しか観測値を満たせなかった!!

The Occam's Razor Approach

K. Harigaya, M. Ibe, T. T. Yanagida
Phys. Rev. D 86, 013002

Lepton mass term :
$$\bar{l}_L M_E e_R + \bar{l}_L m_D N + \frac{1}{2} \overline{N^C} M_R N + h.c.$$

M_R : **2 (Diagonal)**

m_D :

M_R の様々な構造を想定してNHを満たせないか試したが
 できませんでした。

to

Model

Δm_{12}^2

Δm_{13}^2

θ_{13}

ues

Razor

RHN二世代は模型を切りすぎ...?

我々は3世代RHNでNHで観測値を満たせないか探る

The Occam's Razor Approach

Y.K, Y. Shimizu, M. Tanimoto, T. T. Yanagida
PTEP. 2016, 063B03

Lepton mass term :
$$\bar{l}_L M_E e_R + \bar{l}_L m_D N + \frac{1}{2} \overline{N^C} M_R N + h.c.$$

M_R : **2** ▶ **3 (Diagonal)**

m_D : ~~Two Zero Texture~~
Four Zero Texture

total : **5** ▶ **7**

Model parameters

=

Δm_{12}^2 Δm_{13}^2

θ_{12} θ_{23} θ_{13}

δ_{CP} m_{ee}

total : **5** ▶ **7**

(would be) Observed values

1複素パラメータ増えた



宇宙のバリオン数非対称性に予言を与える

(Our set up) Occam's Razor

Leptogenesis

M. Fukugita, T. Yanagida, *Phys. Lett. B* 174(1986) 45.

$$\epsilon = \frac{\Gamma(N_1 \rightarrow l\phi) - \Gamma(N_1 \rightarrow \bar{l}\bar{\phi})}{\Gamma(N_1 \rightarrow l\phi) + \Gamma(N_1 \rightarrow \bar{l}\bar{\phi})}$$

$$= -\frac{1}{8\pi} \frac{1}{v^2} \frac{1}{(m_D^\dagger m_D)_{11}} \sum_i \text{Im} \left[\left\{ (m_D^\dagger m_D)_{i1} \right\}^2 \right] f\left(\frac{M_i^2}{M_1^2}\right)$$

Suppose $M_1 \ll M_2, M_3$

For example,

$$m_D = \begin{pmatrix} 0 & ae^{i\phi_B/2} & 0 \\ ae^{i\phi_A/2} & 0 & b \\ 0 & be^{i\phi_B/2} & c \end{pmatrix}$$

In Fritsch type mass matrix

$$m_D^\dagger m_D = \begin{pmatrix} a^2 & * & * \\ 0 & * & * \\ abe^{i\phi_A/2} & * & * \end{pmatrix}$$

$$\approx -\frac{1}{8\pi} \frac{1}{v^2} b^2 \frac{M_3}{M_1} \sin\phi_A$$

レプトン数の破れはスファレロン過程によってバリオン数の破れに

$$Y_B = -\frac{28}{79} Y_L \propto -\epsilon$$

$$\left(Y_B \equiv \frac{n_B - n_{\bar{B}}}{s} \right)$$

The Sign of Universe's Baryon Asymmetry

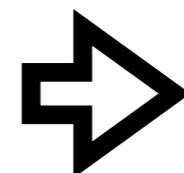
Y.K, Y. Shimizu, M. Tanimoto, T. T. Yanagida

PTEP. 2016, 063B03

$$Y_B = -\frac{28}{79}Y_L \propto -\epsilon$$

$$\epsilon \approx -\frac{1}{8\pi} \frac{1}{v^2} b^2 \frac{M_3}{M_1} \sin\phi_A$$

In Fritzsche type mass matrix



$$Y_B \propto \sin\phi_A$$

模型のパラメータ ϕ_A が
決まれさえすれば...

ニュートリノ実験で測定できる
物理量(7つ)が特定されれば
(原理的に)模型に自由度がなくなる

$$\Delta m_{\text{sol}}^2 \quad \Delta m_{\text{atm}}^2 \quad \theta_{12} \quad \theta_{23} \quad \theta_{13} \quad \delta_{CP} \quad m_{ee}$$

「反バリオンではなく、なぜバリオンが選ばれたのか？」



符号を決定する模型!!

$$\delta_{CP} = \phi_A, \phi_B$$

Y.K, Y. Shimizu, M. Tanimoto, T. T. Yanagida
PTEP. 2016, 063B03

Lepton mass term : $\bar{l}_L M_E e_R + \bar{l}_L m_D N + \frac{1}{2} \overline{N^C} M_R N + h.c.$

For example,

So called Fritzsche type mass matrix

$$m_D = \begin{pmatrix} 0 & ae^{i\phi_B/2} & 0 \\ ae^{i\phi_A/2} & 0 & b \\ 0 & be^{i\phi_B/2} & c \end{pmatrix} \quad M_R = M_0 \begin{pmatrix} \frac{1}{K_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{K_2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

See-Saw mechanism

$$m_\nu = \frac{1}{M_0} \begin{pmatrix} a^2 K_2 e^{i\phi_B} & 0 & ab K_2 e^{i\phi_B} \\ 0 & a^2 K_1 e^{i\phi_A} + b^2 & bc \\ ab K_2 e^{i\phi_B} & bc & b^2 K_2 e^{i\phi_B} + c^2 \end{pmatrix}$$

These matrices give Jarlskog invariant and δ_{CP}

$$J_{CP} \simeq \frac{a^4 b^4 c^2 K_1 K_2^3 \{a^2 \sin(\phi_A - \phi_B) + b^2 \sin(\phi_A + \phi_B)\}}{(\Delta m_{atm}^2)^2 \Delta m_{sol}^2}$$

$$\sin \delta_{CP} = J_{CP} / (s_{23} c_{23} s_{12} c_{12} s_{13} c_{13}^2)$$

ϕ_A, ϕ_B relate to δ_{CP} .

Four-Zero Dirac mass matrices + The Sign of BAU

$m_i \neq 0$ and Four-Zero Dirac mass matrices are 72 patterns

Matrices of determining the sign of BAU by only one phase are 24 patterns

1B type

$$\begin{pmatrix} 0 & a_2 & 0 \\ b_1 & 0 & b_3 \\ 0 & c_2 & c_3 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} a_1 & 0 & 0 \\ 0 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & 0 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} a_1 & 0 & 0 \\ 0 & b_2 & b_3 \\ c_1 & 0 & c_3 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 0 & 0 & a_3 \\ b_1 & b_2 & 0 \\ 0 & c_2 & c_3 \end{pmatrix}$$

1C type

$$\begin{pmatrix} 0 & a_2 & a_3 \\ b_1 & 0 & 0 \\ c_1 & 0 & c_3 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 0 & a_2 & a_3 \\ b_1 & 0 & 0 \\ c_1 & c_2 & 0 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & 0 \\ 0 & 0 & b_3 \\ 0 & c_2 & c_3 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} a_1 & 0 & a_3 \\ 0 & b_2 & 0 \\ 0 & c_2 & c_3 \end{pmatrix}$$

2B type

$$\begin{pmatrix} 0 & a_2 & 0 \\ 0 & b_2 & b_3 \\ c_1 & 0 & c_3 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} a_1 & 0 & 0 \\ b_1 & b_2 & 0 \\ 0 & c_2 & c_3 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} a_1 & 0 & 0 \\ b_1 & 0 & b_3 \\ 0 & c_2 & c_3 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 0 & 0 & a_3 \\ 0 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & 0 \end{pmatrix}$$

2A type

2C type

3A type

3B type

3C type

etc.

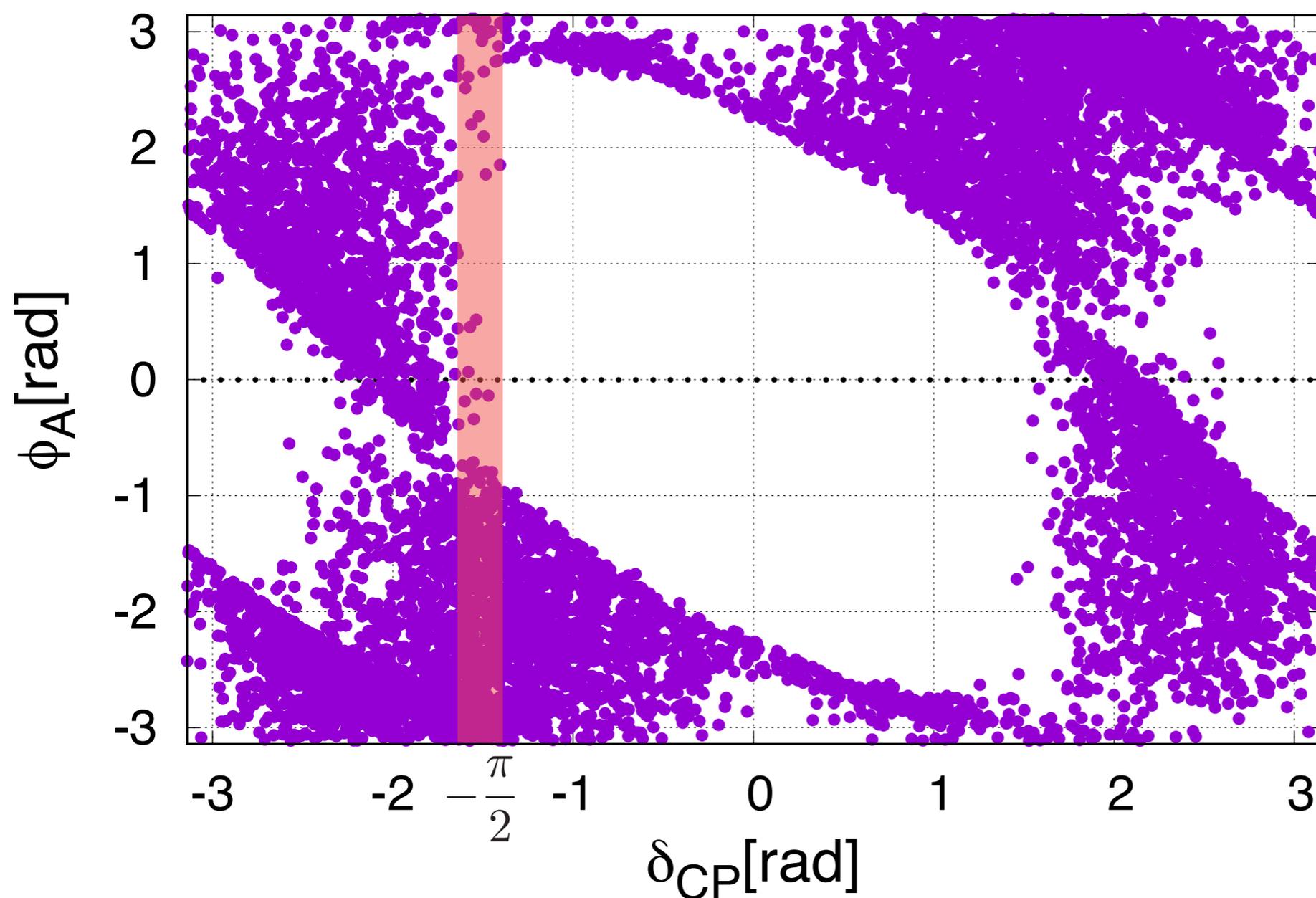
Numerical Analysis

The Sign of Universe's Baryon Asymmetry

$$Y_B = \frac{n_b - n_{\bar{b}}}{s}$$

$$m_D = \begin{pmatrix} 0 & ae^{i\phi_B/2} & 0 \\ ae^{i\phi_A/2} & 0 & b \\ 0 & be^{i\phi_B/2} & c \end{pmatrix}_{LR} \quad Y_B \propto +\sin\phi_A$$

Fritzsch type mass matrix



constraint by

$$(\Delta m_{\text{sol}}^2, \Delta m_{\text{atm}}^2, \theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13})$$

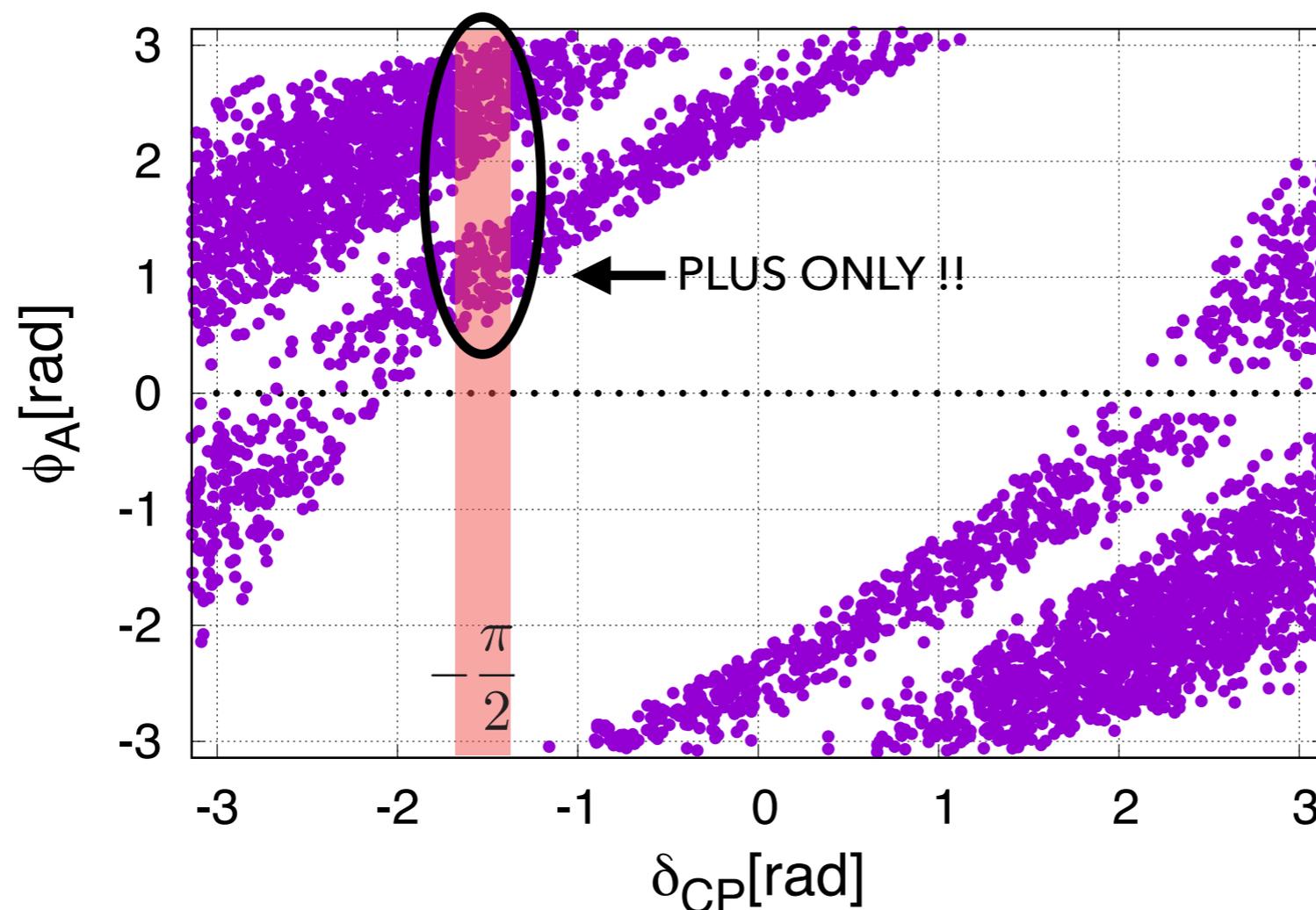
in 90% C.L.

The Sign of Universe's Baryon Asymmetry

$$Y_B = \frac{n_b - n_{\bar{b}}}{s}$$

$$m_D = \begin{pmatrix} 0 & a_2 e^{i\phi_B/2} & a_3 \\ b_1 e^{i\phi_A/2} & 0 & 0 \\ c_1 e^{i\phi_A/2} & 0 & c_3 \end{pmatrix}_{LR}$$

$$Y_B \propto +\sin\phi_A$$



constraint by

$$(\Delta m_{\text{sol}}^2, \Delta m_{\text{atm}}^2, \theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13})$$

in 90% C.L.

もし δ_{CP} が $-\pi/2$ 付近に決定したら

宇宙のバリオン数非対称性の符号を決定する質量構造の候補になる

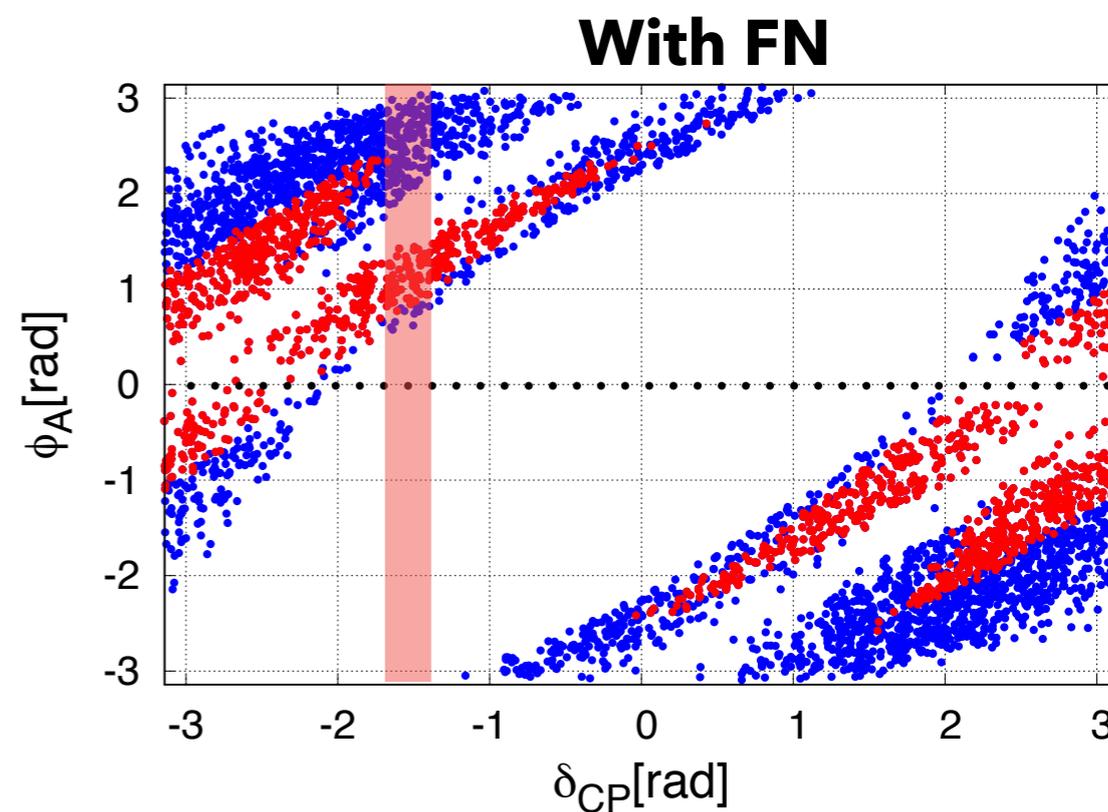
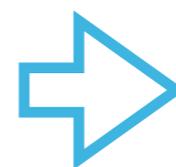
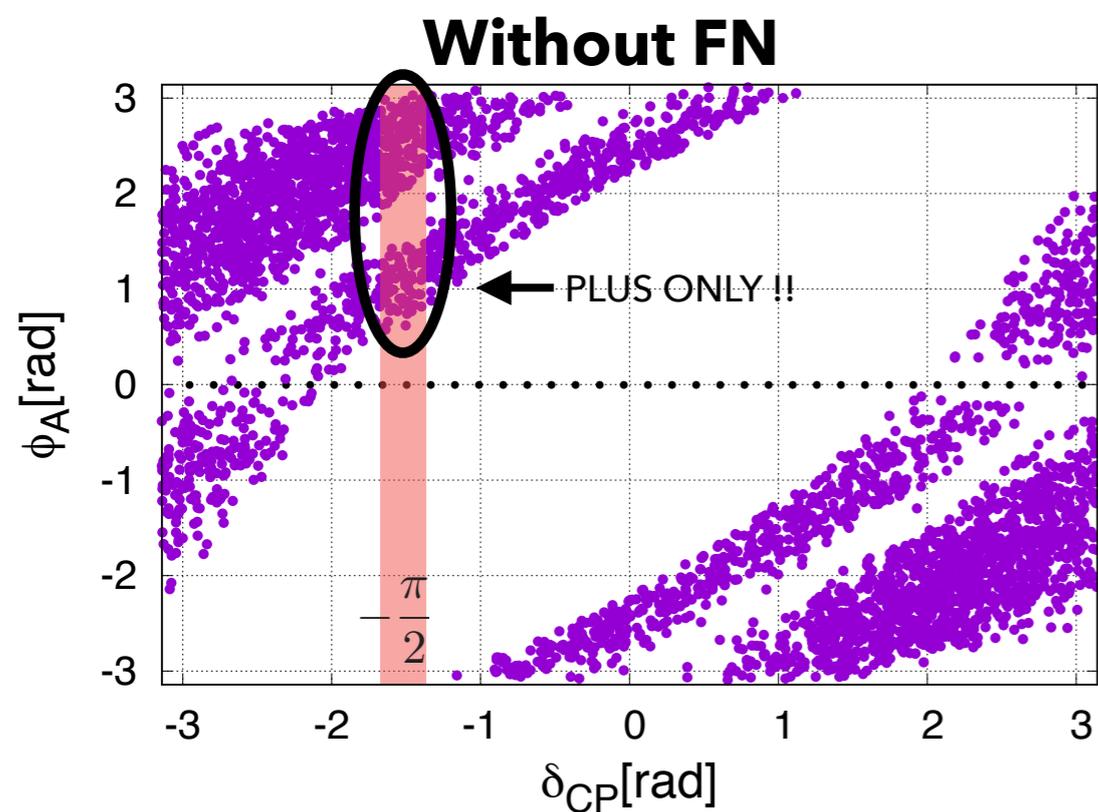
Prediction in Froggatt-Nielsen Framework $U(1)$ Flavor Symmetry

We can adjust FN Framework.

Consider the case: $m_{\nu D} = \begin{pmatrix} 0 & a_2 & a_3 \\ b_1 & 0 & 0 \\ c_1 & 0 & c_3 \end{pmatrix}_{LR}$ $M_R = M_0 \begin{pmatrix} K_1^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & K_2^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}_{RR}$

FN charges: $L(L_1, L_2, L_3)$ $R(R_1, R_2, 0)$

$$K_1 = (c_3/c_1)^2 = \epsilon^{-2R_1} \qquad K_2 = (a_3/a_2)^2 = \epsilon^{-2R_2}$$



In progress

Summary

Summary

- ▷ **NH**でかつ $\delta_{CP} = -\pi/2$ を予言する質量行列構造を探った。
ニュートリノ質量行列を“Occam's Razor Approach”の考え方の下、特定の成分にゼロを課すことで上記の性質を満たす質量構造を見つけた。
 - 3世代の右巻きニュートリノを導入することで、NHが実現する。
- ▷ ニュートリノ実験で測定される物理量(7つ)が特定されれば模型に自由度がなくなる。
その結果、「反バリオンではなく、なぜバリオンが選ばれたのか?」という問いに答え得る可能性を示した。

**δ_{CP} をインプットすることで
宇宙のバリオン数非対称性の符号を決定できる可能性を示した。**