

CP/CP-like 対称性と対称性の自発的な破れ

上村尚平 ^A, 大木洋 ^B

奈良女 RISE^A, 奈良女理^B

PPP2023 @ YITP
(based on work in progress.)

August 31, 2023

Introduction

- 現象論や実験で CP 対称性とその破れは重要である。
 - ▶ K, B,..., neutrino 振動など実験で破れが観測されている。
 - ▶ 宇宙の matter/antimatter の量が異なっている。
(baryogenesis/leptogenesis)
 - ▶ strong CP...
- CP 対称性 \Leftrightarrow matter/antimatter symmetry.
→ 電荷 (表現) を逆にする変換。

$$\begin{array}{ll} CP : u_R & \longmapsto i\sigma_2 u_R^*, \\ (\mathbf{3}, 1)_{2/3} & \longmapsto (\bar{\mathbf{3}}, 1)_{-2/3} \end{array}$$

- 実はそうではない CPっぽい変換を考えてもいい
⇒ CP-like 対称性.¹

¹M. C. Chen, et al (2014)

この講演で伝えたいこと

- CP-like 対称性は（普通の）CP 不変な理論から SSB を通じて現れる。
- CP-like 対称性は CP の破れである。
→ CP-like 対称性は matter/antimatter 非対称性の起源になりうる。
- CP-like 対称性は CP 対称性の起源にもなりうる。
- CP-like 対称性は特殊な内部対称性を必ずしも必要としない。
⇒ CP-like 対称性を考えてみませんか？

- 1 CP-like transformation
- 2 Physical Meanings of CP-like symmetry
- 3 CP Violation/Restoration through the SSB of the internal symmetry
- 4 CPV through SSB
- 5 CPR through SSB
- 6 Conclusion

CP-like transformation

- physical CP 変換:

- ▶ 理論に現れる全ての場について $r \rightarrow \bar{r}$ にする CP 変換.

$$\begin{array}{llll} Q_L : & (\mathbf{3}, \mathbf{2})_{1/6} & \rightarrow & (\bar{\mathbf{3}}, \bar{\mathbf{2}})_{-1/6}, \\ u_r : & (\mathbf{3}, \mathbf{1})_{2/3} & \rightarrow & (\bar{\mathbf{3}}, \bar{\mathbf{1}})_{-2/3}, \\ d_r : & (\mathbf{3}, \mathbf{1})_{-1/3} & \rightarrow & (\bar{\mathbf{3}}, \bar{\mathbf{1}})_{-1/3} \end{array}$$

- CP-like 変換:

- ▶ **一部の内部対称性の表現について** $r \rightarrow \bar{r}$ となっていない CP 変換**っぽい**変換を **CP-like 変換**と呼ぶ.²
- ▶ 典型的には CP-like な変換はローレンツ群の表現に対しては CP と同じように作用するが内部対称性の一部の表現 r を無関係な r' を交換するような変換.

²M. Chen et al.(2014)

proper CP transformation for Φ

- proper CP 変換 :

$$\Phi = (\phi_{\mathbf{r}_1}, \dots, \phi_{\mathbf{r}_{N'}})^T, \quad (1)$$

$$\text{CP} : \Phi(x) \rightarrow U_{\text{CP}} \Phi^*(\tilde{x}), \quad (2)$$

$$U_{\text{CP}} = \left(\begin{array}{cc|ccc} U_{\mathbf{r}_1} & \mathbf{0} & \cdots & & \\ \mathbf{0} & \ddots & & & \\ \hline \vdots & & U_{\mathbf{r}_i} & \mathbf{0} & \\ & & \mathbf{0} & U_{\mathbf{r}_j} & \vdots \\ \hline & & & & \ddots & \mathbf{0} \\ & & & \cdots & \mathbf{0} & U_{\mathbf{r}_{N'}} \end{array} \right). \quad (3)$$

CP-like transformation for Φ

- CP-like 変換:

$$\Phi = (\phi_{\mathbf{r}_1}, \dots, \phi_{\mathbf{r}_{N'}})^T, \quad (4)$$

$$\text{CP-like} : \Phi(x) \rightarrow U_{\text{CP-like}} \Phi^*(\tilde{x}), \quad (5)$$

$$U_{\text{CP-like}} = \left(\begin{array}{cc|ccc} U_{\mathbf{r}_1} & \mathbf{0} & \cdots & & \\ \mathbf{0} & \ddots & & & \\ \hline \vdots & & \mathbf{0} & U_{\mathbf{r}_{ij}} & \\ & & U_{\mathbf{r}_{ji}} & \mathbf{0} & \vdots \\ \hline & & & \ddots & \mathbf{0} \\ & & \cdots & \mathbf{0} & U_{\mathbf{r}_{N'}} \end{array} \right). \quad (6)$$

CP-like transformation on G

- CP/CP-like 変換 :

$$U_{\text{CP/CP-like}} \rho_{\Phi}(g)^* U_{\text{CP/CP-like}}^{\dagger} = \rho_{\Phi}(h), \quad (g, h \in G)$$

$$\Rightarrow u_{\text{CP/CP-like}} : G \rightarrow G \quad (u_{\text{CP/CP-like}}(g) \equiv h) \quad \text{Automorphism}$$

- CP/CP-like 変換と同型 :

- ▶ $u_{\text{CP/CP-like}} : G \rightarrow G$ を作れる \Leftrightarrow CP が G とコンシステント.
- ▶ $u_{\text{CP/CP-like}}(g) \sim g^{-1}$: proper CP (class-inverting automorphism)
- ▶ $u_{\text{CP/CP-like}}(g) \approx g^{-1}$: CP-like.

Example: $\Delta(27) \cong (\mathbb{Z}_3 \times \mathbb{Z}_3) \rtimes \mathbb{Z}_3$

- elements of $\Delta(27)$:

$$a^i a'^j b^k \in \Delta(27),$$

$$ba = a'b, \quad ba = a^2 a'^2 b, \quad a'a = aa', \quad a^3 = a'^3 = b^3 = e.$$

- 既約表現 ($\mathbf{3}, \bar{\mathbf{3}}$ and $\mathbf{1}_{0,1,2,\dots,8}$)

$$\rho_{\mathbf{3}}(a) = \begin{pmatrix} \omega & 0 & 0 \\ 0 & \omega^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \rho_{\mathbf{3}}(a') = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \omega & 0 \\ 0 & 0 & \omega^2 \end{pmatrix},$$

$$\rho_{\mathbf{3}}(b) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

$$\rho_{\mathbf{1}_i}(a) = \rho_{\mathbf{1}_i}(a') = \omega^j, \quad \rho_{\mathbf{1}_i}(b) = \omega^k.$$

Example: $\Delta(27) \cong (\mathbb{Z}_3 \times \mathbb{Z}_3) \rtimes \mathbb{Z}_3$

CP-like transformation for $\Delta(27)$ model:

$$\mathbf{1}_i \rightarrow U_{\text{CP-like}} \mathbf{1}_j^*, \quad \text{w/} \quad U_{\text{CP-like}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$
$$\mathbf{3} \rightarrow U_{\text{CP-like}} \mathbf{3}^*, \quad \text{w/} \quad U_s = \begin{pmatrix} \omega^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

$$u_{\text{CP-like}} : (a, a', b) \mapsto (a^2 a'^2, a', a^2 b^2),$$

- 1 CP-like transformation
- 2 Physical Meanings of CP-like symmetry**
- 3 CP Violation/Restoration through the SSB of the internal symmetry
- 4 CPV through SSB
- 5 CPR through SSB
- 6 Conclusion

Physical Meanings of CP-like symmetry

- CP-like 対称性と CP 対称性は違うものなのか？ → Yes!

Example 2.1 ($\Delta(27)$ model)

	ϕ_4^+	Φ_3	ψ_5	ψ_6	Ψ_3
$\Delta(27)$	$\mathbf{1}_4$	$\mathbf{3}$	$\mathbf{1}_5$	$\mathbf{1}_6$	$\mathbf{3}$
CP-like	ϕ_4^+	$U_s \Phi_3^*$	ψ_6^{CP}	ψ_5^{CP}	$U_s \Psi_3^{CP}$

Table: Matter contents of $\Delta(27)$ model.

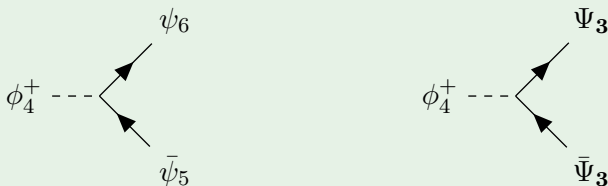


Figure: Decay channel of ϕ_4^+ .

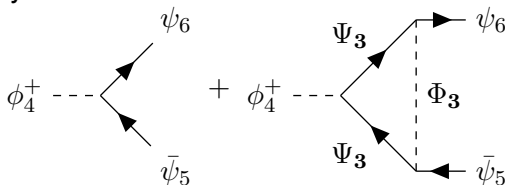
CP-Violation in CP-like invariant model

- Yukawa interaction:

$$\mathcal{L}_{\text{Yukawa}} = y_1 \phi_4^+ \bar{\psi}_6 \psi_5 + y_2 \phi_4^+ \otimes (\bar{\Psi}_3 \otimes \Psi_3)_{1_8} \\ + y_3 \bar{\psi}_5 \otimes (\Phi_3^* \otimes \Psi_3)_{1_5} + y_4 \bar{\psi}_6 \otimes (\Phi_3^* \otimes \Psi_3)_{1_6} + (h.c.).$$

$$y_2 = y_3^* \text{ (CP-like invariance).}$$

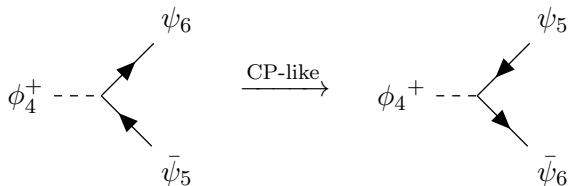
- CP-asymmetry:



$$\epsilon_{\phi_4^+ \rightarrow \psi_6 \bar{\psi}_5} \propto \text{Im} (3\omega^2 y_1^* y_2 y_3^* y_4) \text{Im} I \neq 0.$$

CP-like transformation for the diagram

- CP-like によるダイアグラムの変換：



この変換は外線を反粒子と結びつけない。

CP-like 対称性は matter/antimatter 対称性ではない。

Remarks

- proper CP を持つ G にも CP-like は定義できる.

例: $G = \mathbb{Z}_3 \times U(1)$, $\Phi = (\phi_{1_0}^q, \phi_{1_1}^q, \phi_{1_2}^q)^T$,

$$\text{CP-like} : \Phi \rightarrow U_{\text{CP-like}} \Phi, \quad U_{\text{CP-like}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

CP-like の誘導する同型写像 :

$$u_{\text{CP-like}} : (\omega, e^{i\theta}) = (\omega, e^{-i\theta}) \leftrightarrow (\omega^*, e^{-i\theta}) \quad (8)$$

$U(1)$ は反転するが \mathbb{Z}_3 電荷は反転しない. \rightarrow CP-like

- 1 CP-like transformation
- 2 Physical Meanings of CP-like symmetry
- 3 CP Violation/Restoration through the SSB of the internal symmetry**
- 4 CPV through SSB
- 5 CPR through SSB
- 6 Conclusion

CP/CP-like symmetry and SSB

- SSB of the internal symmetry G :

$$G \rightarrow H \subset G \quad \sim \quad \mathbf{r}^G \rightarrow \bigoplus_{i=1,2,\dots} \mathbf{r}_i^H,$$

CP/CP-like 変換

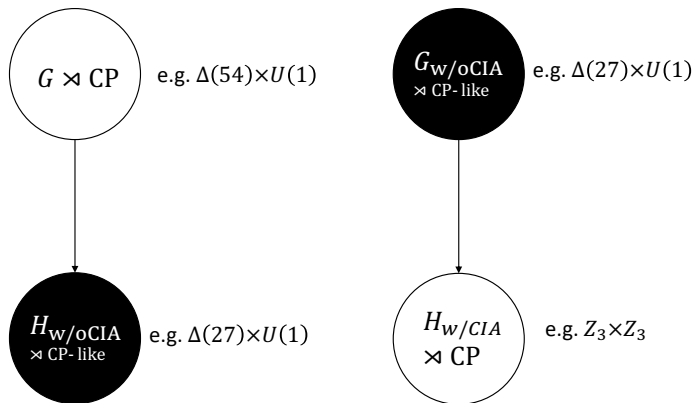
$$\text{CP} : \mathbf{r}^G \rightarrow \bar{\mathbf{r}}^G \neq \mathbf{r}_i^H \rightarrow \bar{\mathbf{r}}_i^H.$$

Our Questions

- CP \rightarrow CP-like^a? CP-like \rightarrow CP?
- このメカニズムは普通の SSB と違う？ (CPV は VEV に比例する?)

^aM. Ratz et al. (2017)

CP/CP-like symmetry and SSB



- 1 CP-like transformation
- 2 Physical Meanings of CP-like symmetry
- 3 CP Violation/Restoration through the SSB of the internal symmetry
- 4 CPV through SSB**
- 5 CPR through SSB
- 6 Conclusion

$\Delta(54) \times U(1)$ model

	Ψ^1	Ψ^2	Ψ^3	Ψ^4	S	T	R
$\Delta(54)$	$\mathbf{3}_1$	$\mathbf{3}_1$	$\mathbf{3}_1$	$\mathbf{3}_1$	$\mathbf{1}_1$	$\mathbf{2}_3$	$\mathbf{2}_1$
$U(1)$	1	2	3	4	0	-1	-2
CP	$U_s \Psi^{1,CP}$	$U_s \Psi^{2,CP}$	$U_s \Psi^{3,CP}$	$U_s \Psi^{4,CP}$	S	$S_2 T^*$	R^*

Table: Irreducible representations and $U(1)$ charges of the fields. Ψ^I are Dirac fermions, T, R are complex scalars, S is a real scalar. $S_2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$.

symmetry breaking:

$$\Delta(54) \times U(1) \times \text{physical CP} \xrightarrow{\langle S \rangle} \Delta(27) \times U(1) \times \text{CP-like}$$

$$\xrightarrow{\langle T_1 \rangle = \langle T_2 \rangle^*} \mathbb{Z}_3 \times \mathbb{Z}_3 \times \text{proper CP.}$$

CPV amplitudes at $\Delta(27) \times U(1)$

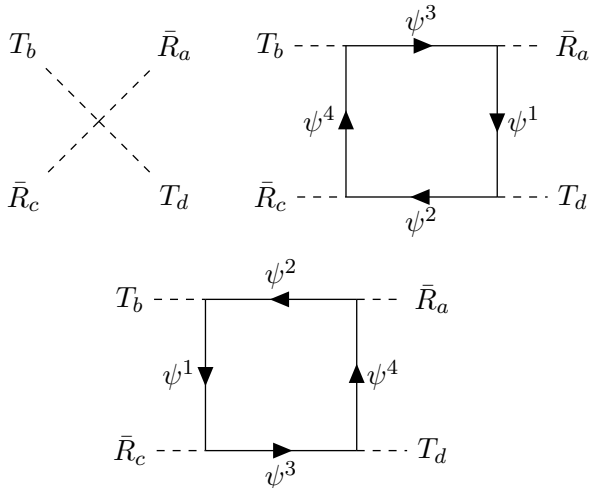


Figure: CPV 4-point scattering of $T_b \bar{R}_c \rightarrow T_d \bar{R}_a$.

CPV at $\Delta(27) \times U(1)$

- CPV (1-loop) :

$$\epsilon_{T_b \bar{R}_c \rightarrow T_d \bar{R}_a} \propto \begin{cases} 3\sqrt{3}\lambda_5 |r_2 t_2 r_1 t_1| \delta_{ac} \delta_{bd} \text{Im } I_{1\text{-loop}} & (a = b) \\ -3\sqrt{3}\lambda_5 |r_2 t_2 r_1 t_1| \delta_{ac} \delta_{bd} \text{Im } I_{1\text{-loop}} & (a \neq b) \end{cases} \quad (9)$$

⇒ CPV は $\langle S \rangle$ に比例しない。

⇒ CP は真空が直接破ったわけではない。

CP conservation at $\Delta(54) \times U(1)$

- CP basis at $\Delta(54)$.

$$\tilde{T}_{\pm} = \frac{1}{\sqrt{2}}(T_1 \pm T_2).$$

この基底では CP-like 変換は次のようにかける。

$$\text{CP-like} : \tilde{T}_{\pm} \rightarrow \pm \tilde{T}_{\pm}^*.$$

R_i は元々対角的なので、この振幅は CP 不変。

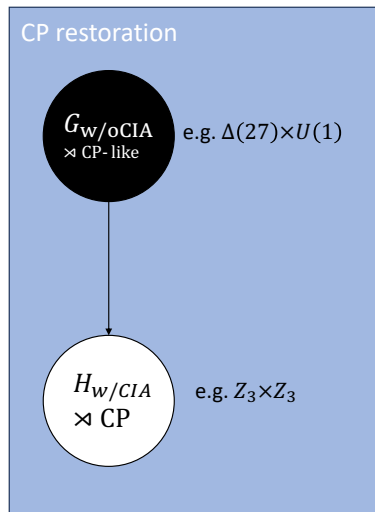
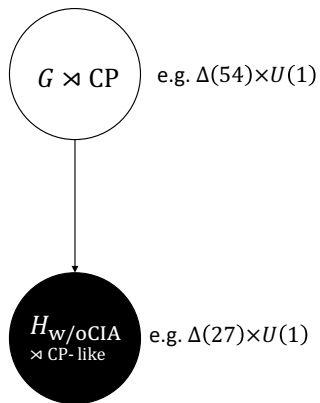
$$\epsilon_{\tilde{T}_{\pm} \bar{R}_c \rightarrow \tilde{T}_{\pm} \bar{R}_a} = 0.$$

SSB は内部対称性しか壊さない。SSB によって表現が分解すると、一つの既約表現の中で CP 変換を閉じることができなくなって CPV が現れる。

- 逆に違う既約表現が同じ既約表現に潰れると CP は回復するかも？

- 1 CP-like transformation
- 2 Physical Meanings of CP-like symmetry
- 3 CP Violation/Restoration through the SSB of the internal symmetry
- 4 CPV through SSB
- 5 CPR through SSB**
- 6 Conclusion

CP restoration and SSB



CP restoration and SSB

- CP を CP-like にしている原因：

$$\begin{aligned}u_{cp} &: \Delta(27) \rightarrow \Delta(27) \\ &: (a, a', b) \mapsto (a^2 a'^2, a', a^2 b^2),\end{aligned}$$

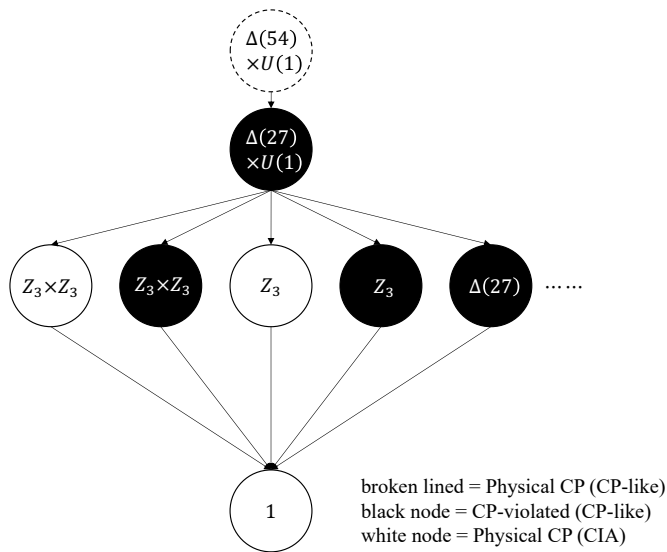
- a' だけ破ることはできるか？ $\rightarrow \langle T \rangle$.

	Ψ^i	S, T	R_1	R_2
$\mathbb{Z}_3^{(a^2 a')} \times \mathbb{Z}_3^{(a^2 b)}$	$\mathbf{1}_{20} \oplus \mathbf{1}_{21} \oplus \mathbf{1}_{22}$	$\mathbf{1}_{00}$	$\mathbf{1}_{01}$	$\mathbf{1}_{02}$

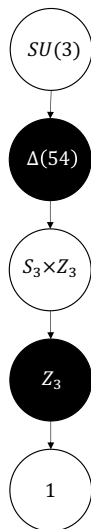
Table: The representations of the matter fields .

\Rightarrow CP-like は CP の起源になる.

CP violation/restoration and SSB



$SU(3)$ model



broken line = Physical CP (CP-like)
black node = CP-violated (CP-like)
white node = Physical CP (CIA)

- 1 CP-like transformation
- 2 Physical Meanings of CP-like symmetry
- 3 CP Violation/Restoration through the SSB of the internal symmetry
- 4 CPV through SSB
- 5 CPR through SSB
- 6 Conclusion**

Conclusion

この講演で伝えたかったこと

- CP-like 対称性は（普通の）CP 不変な理論から SSB を通じて現れる． e.g. $\Delta(27)$ model
 - CP-like 対称性は CP の破れである． e.g. $\phi \rightarrow \psi\bar{\psi}, T\bar{R}T\bar{R}$.
→ CP-like 対称性は matter/antimatter 非対称性の起源になりうる．
 - CP-like 対称性は CP 対称性の起源にもなりうる．
e.g. $\mathbb{Z}_3 \times \mathbb{Z}_3$ model
 - CP-like 対称性は特殊な内部対称性を必ずしも必要としない．
e.g. class-inverting な同型を持つ例．
- ⇒ CP-like 対称性を考えましょう！

$\Delta(27)$ \mathcal{O} character table

	C_{1a}	C_{3a}	C_{3b}	C_{3c}	C_{3d}	C_{3e}	C_{3f}	C_{3g}	C_{3h}	C_{3i}	C_{3j}
	1	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1
	e	a	a^2	b	b^2	a^2b	ab^2	ab	a^2b^2	aa'^2	a^2a'
$\mathbf{1}_0$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$\mathbf{1}_1$	1	1	1	ω^2	ω	ω^2	ω	ω^2	ω	1	1
$\mathbf{1}_2$	1	1	1	ω	ω^2	ω	ω^2	ω	ω^2	1	1
$\mathbf{1}_3$	1	ω^2	ω	1	1	ω	ω^2	ω^2	ω	1	1
$\mathbf{1}_4$	1	ω^2	ω	ω^2	ω	1	1	ω	ω^2	1	1
$\mathbf{1}_5$	1	ω^2	ω	ω	ω^2	ω^2	ω	1	1	1	1
$\mathbf{1}_6$	1	ω	ω^2	1	1	ω^2	ω	ω	ω^2	1	1
$\mathbf{1}_7$	1	ω	ω^2	ω^2	ω	ω	ω^2	1	1	1	1
$\mathbf{1}_8$	1	ω	ω^2	ω	ω^2	1	1	ω^2	ω	1	1
$\mathbf{3}$	3	0	0	0	0	0	0	0	0	3ω	$3\omega^2$
$\bar{\mathbf{3}}$	3	0	0	0	0	0	0	0	0	$3\omega^2$	3ω

Table: Character table of $\Delta(27)$.

$\Delta(54)$

- $\Delta(54) \cong \Delta(27) \rtimes \mathbb{Z}_2$.

$$\mathbf{1}_i = \mathbf{1}_0,$$

$$\mathbf{2}_1 = \mathbf{1}_2 \oplus \mathbf{1}_1,$$

$$\mathbf{2}_2 = \mathbf{1}_5 \oplus \mathbf{1}_7,$$

$$\mathbf{2}_3 = \mathbf{1}_8 \oplus \mathbf{1}_4,$$

$$\mathbf{2}_4 = \mathbf{1}_6 \oplus \mathbf{1}_3,$$

$$\mathbf{3}_i = \mathbf{3},$$

$$\bar{\mathbf{3}}_i = \bar{\mathbf{3}},$$

- CP-like transformation for $\Delta(54)$

$$\mathbf{3}_i \rightarrow U_s \mathbf{3}_i^*, \quad \mathbf{2}_1 \rightarrow \mathbf{2}_1^*, \quad \mathbf{2}_2 \rightarrow \mathbf{2}_4^*, \quad \mathbf{2}_3 \rightarrow S_2 \mathbf{2}_3^*, \quad \mathbf{2}_4 \rightarrow \mathbf{2}_2^*, \quad \mathbf{1}_{0,1} \rightarrow \mathbf{1}_0^*,$$

$$u_{cp} : (a, a', b, c) \mapsto (a^2 a'^2, a', a^2 b^2, c),$$

$\Delta(27)$ が CP と矛盾する理由

$$\underline{\Delta(27) \cong (\mathbb{Z}_3 \times \mathbb{Z}_3) \rtimes \mathbb{Z}_3.}$$

- 既約表現は $3, \bar{3}$ と 9 つの 1 次元表現 1_i

$$\rho_{\mathbf{3}}(a) = \begin{pmatrix} \omega & 0 & 0 \\ 0 & \omega^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \rho_{\mathbf{3}}(a') = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \omega & 0 \\ 0 & 0 & \omega^2 \end{pmatrix}, \quad \rho_{\mathbf{3}}(b) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\rho_{1_i}(a) = \rho_{1_i}(a') = \omega^j, \quad \rho_{1_i}(b) = \omega^k.$$

- CP を $\phi_{\mathbf{3}} \rightarrow \phi_{\mathbf{3}}^*$ とすると $u_{CP}(b) = b$,

$$\Leftrightarrow \text{CP を } \phi_{1_i} \rightarrow \phi_{1_i}^* \text{ とすると } u_{CP}(b) = b^2.$$

$\Rightarrow \Delta(27)$ とコンシステントな CP 不変性を定義できない。

Action

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{Yukawa} = & t_1 [T \otimes (\bar{\Psi}^1 \otimes \Psi^2)_{\mathbf{2}_3}]_{\mathbf{1}_0} + t_2 [T \otimes (\bar{\Psi}^3 \otimes \Psi^4)_{\mathbf{2}_3}]_{\mathbf{1}_0} \\ & + r_1 [R \otimes (\bar{\Psi}^1 \otimes \Psi^3)_{\mathbf{2}_1}]_{\mathbf{1}_0} + r_2 [R \otimes (\bar{\Psi}^2 \otimes \Psi^4)_{\mathbf{2}_1}]_{\mathbf{1}_0} + (h.c.),\end{aligned}$$

CG 係数 :

$$\begin{aligned}[T \otimes (\bar{\Psi}^1 \otimes \Psi^2)_{\mathbf{2}_3}]_{\mathbf{1}_0} &= M'_{ijk} T_i \bar{\Psi}_j^1 \Psi_k^2 \\ [R \otimes (\bar{\Psi}^1 \otimes \Psi^3)_{\mathbf{2}_1}]_{\mathbf{1}_0} &= N'_{ijk} R_i \bar{\Psi}_j^1 \Psi_k^3,\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}M'_{1jk} &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ \omega & 0 & 0 \\ 0 & \omega^2 & 0 \end{pmatrix}, & M'_{2jk} &= \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \omega^2 \\ \omega & 0 & 0 \end{pmatrix}, \\ N'_{1jk} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \omega & 0 \\ 0 & 0 & \omega^2 \end{pmatrix}, & N'_{2jk} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \omega^2 & 0 \\ 0 & 0 & \omega \end{pmatrix}.\end{aligned}$$

CP-like invariant にしても複素パラメータを含む.

CP violating model

	Ψ	Φ	T	R
$\Delta(54)$	$\mathbf{3}_1$	$\mathbf{3}_1$	$\mathbf{2}_3$	$\mathbf{2}_1$
$U(1)$	2	1	1	1
$\Delta(27)$	$\mathbf{3}$	$\mathbf{3}$	$\mathbf{1}_1 \oplus \mathbf{1}_5$	$\mathbf{1}_0 \oplus \mathbf{1}_3$

- 同じ模型でスカラーが期待値を持った時を考える。

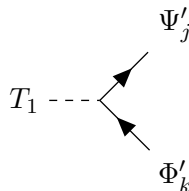
$$\langle R \rangle = (v, 0)^T.$$

この真空は physical CP (= CP-like) 不変だが対称性を $\Delta(27)$ に破る。

- $\Delta(27)$ は $\mathbf{3}$ と非自明な $\mathbf{1}_i$ が複数いると CP と矛盾する。

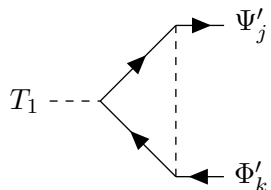
⇒ CP-like 不変性は physical CP にはなれない。

CP の破れ: 3-point amplitude $T_1 \rightarrow \Psi'_i \bar{\Phi}'_j$



$$T_1 \rightarrow \Psi'_j \bar{\Phi}'_k = -ihH_{1jk},$$

1-loop: $\epsilon \sim v/(m_\Psi - m_\Phi)$.

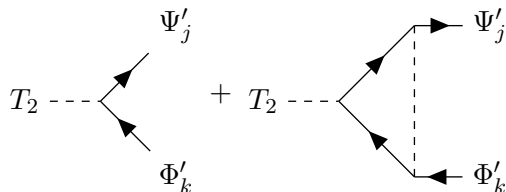


$$T_1 \rightarrow \Psi'_j \bar{\Phi}'_k = -i\epsilon^2 k^2 \omega^2 h H_{1jk} (I^{(1)}(m_\Psi, m_R) + I^{(1)}(m_\Omega, m_R)),$$

$$\epsilon(T_1 \rightarrow \Psi'_i \bar{\Phi}'_j) \sim 3\epsilon^2 k^2 h^2 \text{Im} \omega^2 \text{Im} (I^{(1)}(m_\Psi, m_R) + I^{(1)}(m_\Omega, m_R)) + \mathcal{O}(\epsilon^4)$$

CP-like 変換はどうなったのか？

$T_2 \rightarrow \Psi'_i \bar{\Phi}'_j$ の CP の破れを考えると,



$$= -ihH_{2jk} - i\epsilon^2 k^2 h\omega H_{2jk} (I^{(1)}(m_\Psi, m_R) + I^{(1)}(m_\Omega, m_R)) + \dots,$$

→ CP violation は

$$\epsilon(T_2 \rightarrow \Psi'_i \bar{\Phi}'_j) \sim 3\epsilon^2 k^2 h^2 \text{Im } \omega \text{Im} (I^{(1)}(m_\Psi, m_R) + I^{(1)}(m_\Omega, m_R)) + \mathcal{O}(\epsilon^4)$$

CP-like conservation

$$\epsilon(T_1 \rightarrow \Psi'_i \bar{\Phi}'_j) + \epsilon(T_2 \rightarrow \Psi'_i \bar{\Phi}'_j) = 0.$$