Stable magnetic monopole in two Higgs doublet models

Based on arXiv:1904.09269

Yu Hamada (Kyoto Univ.)

Collaborators:

Minoru Eto (Yamagata U. & Keio U.),

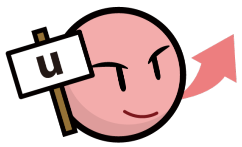
Masafumi Kurachi (Keio U.), Muneto Nitta (Keio U.)

PPP2019@ YITP (Jul. 30, 2019)

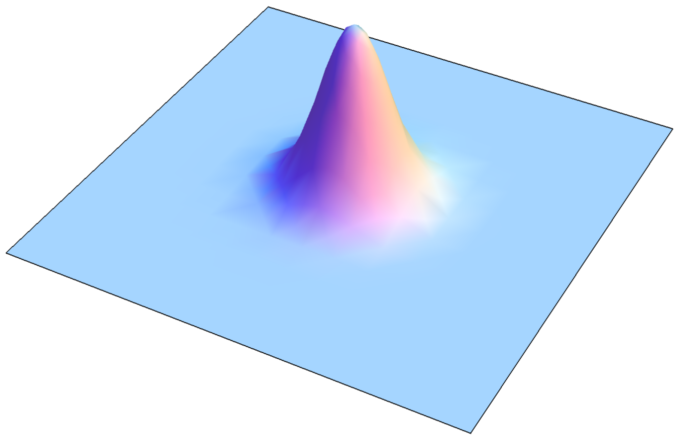
Introduction

Introduction

- **素粒子**：場の素励起



- **ソリトン**：素粒子でない古典的励起



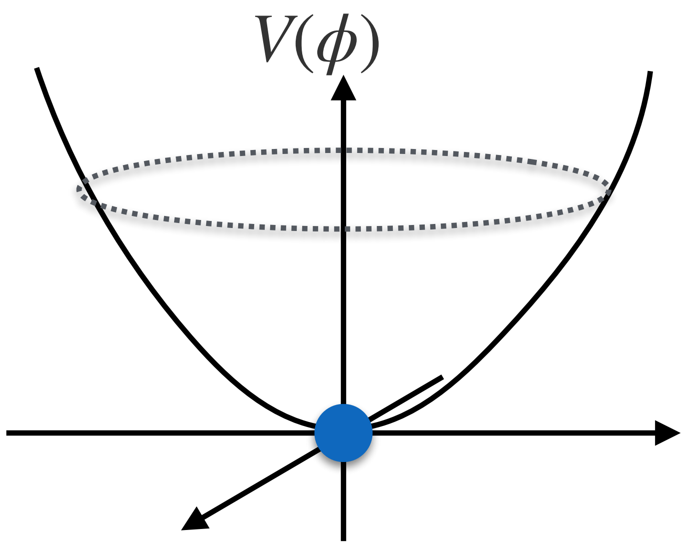
wikipedia "神奈川沖浪裏"

- 特に、トポロジカルに安定な励起：**トポロジカルソリトン**

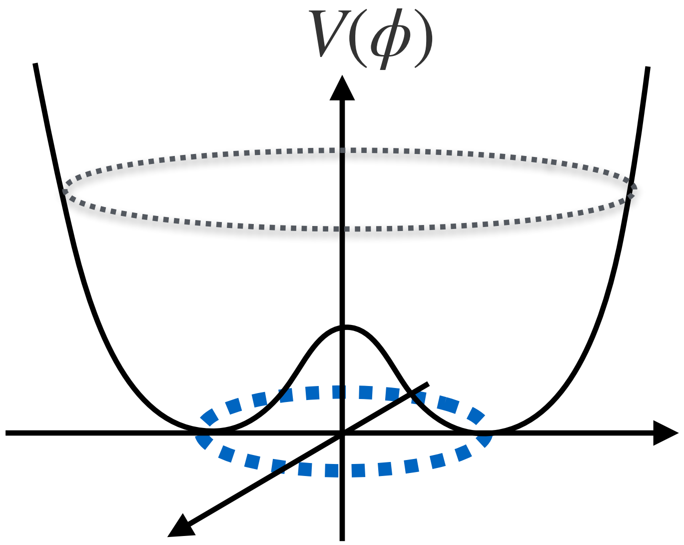
Topological Soliton

- トポロジカルソリトンは**真空のトポロジーが非自明**なときに生じうる

例）



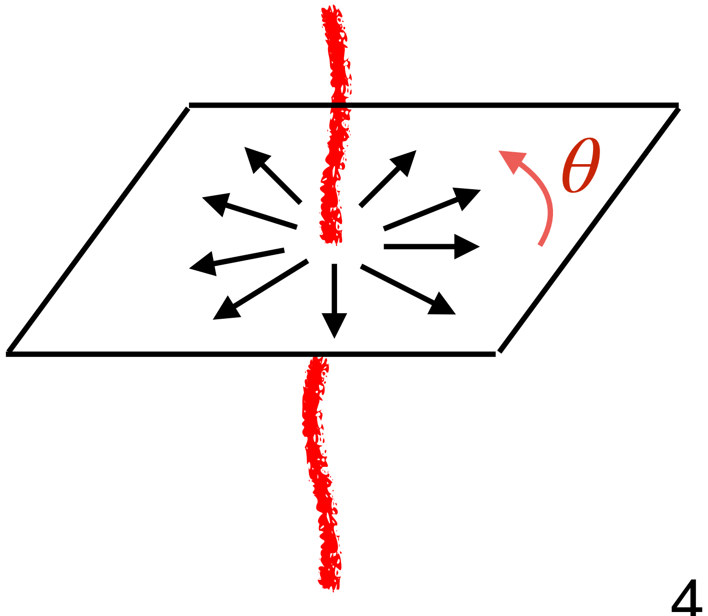
trivial



non-trivial

- 無限遠方で真空を1周するような配位を考える(non-zero winding #)

$$\begin{cases} \phi(x) \sim ve^{i\theta} \\ A_i(x) \sim i\partial_i\theta \end{cases} \quad (r \to \infty)$$

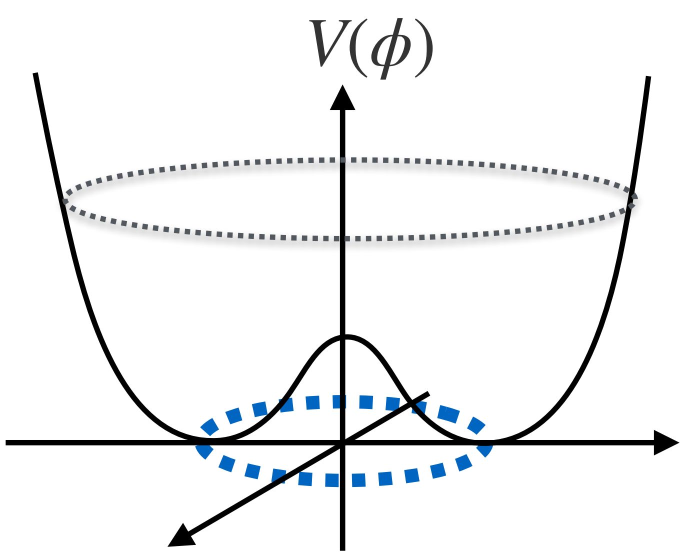


必ずsolitonが中心に存在 (位相的に安定)

Homotopy Group

- より一般には、真空の**homotopy group**を調べれば良い

条件		存在するtopological soliton
$\pi_0(\mathscr{M}) \neq 0$	⟶	Domain wall (kink)
$\pi_1(\mathscr{M}) \neq 0$	⟶	Vortex (cosmic string)
$\pi_2(\mathscr{M}) \neq 0$	⟶	Monopole



$$\pi_1(S^1) = \mathbb{Z} \neq 0$$

$\mathscr{M}$: Vacuum manifold

Topology of SM

- 標準模型では、対称性の破れは $SU(2)_W \times U(1)_Y \to U(1)_{EM}$

$$\Phi = \begin{pmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{pmatrix} \quad \Rightarrow \quad |\Phi_{\text{vac.}}|^2 = v^2$$

Vacuum manifold : $\mathscr{M} \simeq S^3$

- Homotopy groups in SM :

$\pi_0(S^3) = 0$	**No domain wall**
$\pi_1(S^3) = 0$	**No vortex**
$\pi_2(S^3) = 0$	**No monopole**

SMの真空構造は自明！

How about Beyond the SM?

- いくつかのBSMにはトポロジカルソリトンが存在する

How about Beyond the SM?

- いくつかのBSMにはトポロジカルソリトンが存在する
  - トポロジカルソリトン(の痕跡)が発見 ➡ **新物理の証拠**
  - 発見されない or (観測的に)禁止される ➡ **その模型に対する制限**

How about Beyond the SM?

- いくつかのBSMにはトポロジカルソリトンが存在する
  - トポロジカルソリトン(の痕跡)が発見 ➡ **新物理の証拠**
  - 発見されない or (観測的に)禁止される ➡ **その模型に対する制限**

今回：

BSM = Two Higgs doublet model (2HDM)

topological soliton = Magnetic monopole

- 2HDM is well motivated by **simpleness / EW baryogenesis / SUSY**

How about Beyond the SM?

- いくつかのBSMにはトポロジカルソリトンが存在する
  - トポロジカルソリトン(の痕跡)が発見 ➧ **新物理の証拠**
  - 発見されない or (観測的に)禁止される ➧ **その模型に対する制限**

今回：

BSM = Two Higgs doublet model (2HDM)

topological soliton = Magnetic monopole

- 2HDM is well motivated by **simpleness / EW baryogenesis / SUSY**

Plan of talk

- Introduction (5p.) ←Done
- Soliton in SM (Review) (3p.)
- Vortex in 2HDM (Review) (8p.)
- Magnetic Monopole in 2HDM (7p.)
- Summary

Solitons in SM

[Nambu '77]

[Vachaspati, '92]

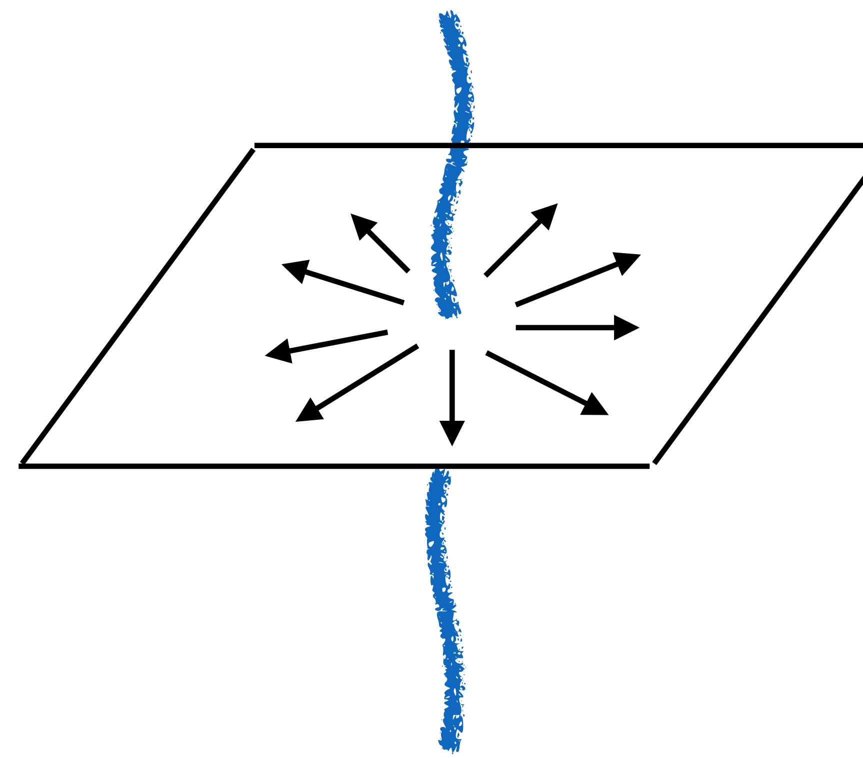
Vortex in SM ?

[Vachaspati, '92]

- **Z string (Z-flux tube)**

$$\Phi(x) \sim \begin{pmatrix} 0 \\ ve^{i\theta} \end{pmatrix} = e^{-i\theta\sigma_3} \begin{pmatrix} 0 \\ v \end{pmatrix}$$

$$Z_i(x) \sim i\partial_i\theta \qquad A_\mu = W^\pm = 0$$



- $U(1)_Z$ が巻き付いた配位

➡ **Confined Z-flux** $\Phi_Z = \dfrac{4\pi}{g_Z}$

- 運動方程式の解にはなっているが、安定ではない

Nambu Monopole

[Nambu '77]

- SMに 't Hooft-Polyakov monopoleを埋め込むことができる

$$\Phi = \begin{pmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{pmatrix} \quad \Rightarrow \quad n^a \equiv \frac{\Phi^\dagger \sigma^a \Phi}{\Phi^\dagger \Phi}$$

Nambu Monopole

[Nambu '77]

- SMに 't Hooft-Polyakov monopoleを埋め込むことができる

$$\Phi = \begin{pmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{pmatrix} \quad \Rightarrow \quad n^a \equiv \frac{\Phi^\dagger \sigma^a \Phi}{\Phi^\dagger \Phi}$$

Hedgehog Ansatz : $n^a = \dfrac{x^a}{r}$

Nambu Monopole

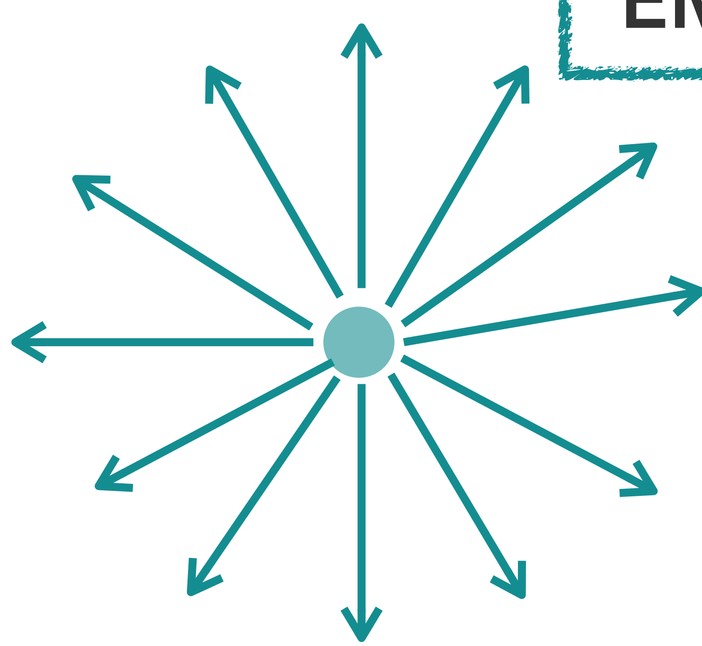
[Nambu '77]

- SMに 't Hooft-Polyakov monopoleを埋め込むことができる

$$\Phi = \begin{pmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{pmatrix} \quad \Rightarrow \quad n^a \equiv \frac{\Phi^\dagger \sigma^a \Phi}{\Phi^\dagger \Phi}$$

Hedgehog Ansatz : $n^a = \frac{x^a}{r}$

⇒



EM-magnetic flux

$$\Phi_B = \frac{4\pi \sin^2 \theta_W}{e}$$

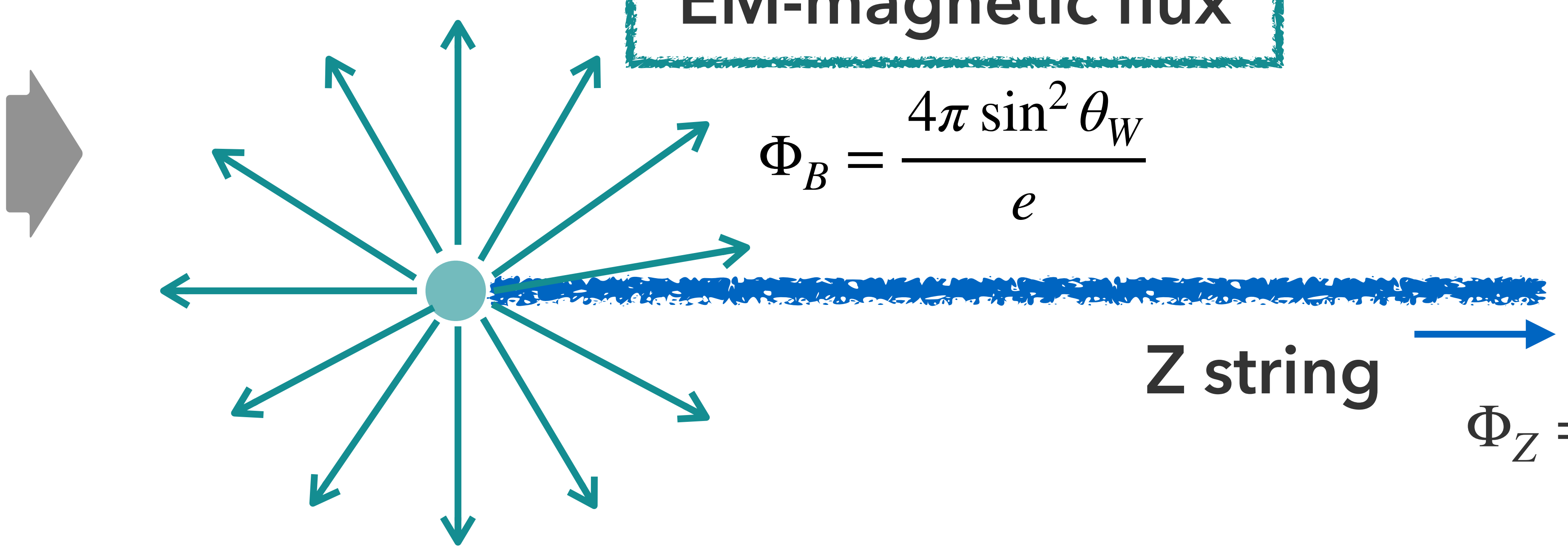
Nambu Monopole

[Nambu '77]

- SMに 't Hooft-Polyakov monopoleを埋め込むことができる

$$\Phi = \begin{pmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{pmatrix} \quad \Rightarrow \quad n^a \equiv \frac{\Phi^\dagger \sigma^a \Phi}{\Phi^\dagger \Phi}$$

Hedgehog Ansatz : $n^a = \dfrac{x^a}{r}$



$$\Phi_B = \frac{4\pi \sin^2 \theta_W}{e}$$

$$\Phi_Z = \frac{4\pi}{g_Z}$$

- monopole単体ではいられない $(\because \pi_2(S^3) = 0)$

Instability of Nambu Monopole

[Nambu '77]

- **Nambu monopoleは Z stringに引っ張られるので不安定**

- 最終的に、もう一方の端点にいる anti-monopole と対消滅する

Instability of Nambu Monopole

[Nambu '77]

- **Nambu monopoleは Z stringに引っ張られるので不安定**

- 最終的に、もう一方の端点にいる anti-monopole と対消滅する

- 教訓：トポロジーが自明 ($\pi_2(S^3) = 0$)でも、magnetic monopole (+ string) 的な配位は作れるが、安定性は保証されない

Vortex in 2HDM

[Dvali, Senjanovic ’93]

[Eto, Kurachi, Nitta ’18]

Two Higgs doublet model (2HDM)

- Lagrangian :

$$\mathscr{L} = -\frac{1}{4}\left(Y_{\mu\nu}\right)^2 - \frac{1}{4}\left(W^a_{\mu\nu}\right)^2 + \sum_{i=1,2}\left|D_\mu \Phi_i\right|^2 - V(\Phi_1, \Phi_2)$$

(SM fermionは無視する)

- Higgs potential

$$V(\Phi_1, \Phi_2) = m_{11}^2 \Phi_1^\dagger \Phi_1 + m_{22}^2 \Phi_2^\dagger \Phi_2 - \left(m_{12}^2 \Phi_1^\dagger \Phi_2 + \mathrm{h.c.}\right) + \frac{\beta_1}{2}\left(\Phi_1^\dagger \Phi_1\right)^2 + \frac{\beta_2}{2}\left(\Phi_2^\dagger \Phi_2\right)^2$$

$$+\beta_3 \left(\Phi_1^\dagger \Phi_1\right)\left(\Phi_2^\dagger \Phi_2\right) + \beta_4 \left(\Phi_1^\dagger \Phi_2\right)\left(\Phi_2^\dagger \Phi_1\right) + \left\{\frac{\beta_5}{2}\left(\Phi_1^\dagger \Phi_2\right)^2 + \mathrm{h.c.}\right\}$$

- VEVs $\langle \Phi_1 \rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ v_1 \end{pmatrix}$ $\langle \Phi_2 \rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ v_2 \end{pmatrix}$ $v_{EW}^2 = 2(v_1^2 + v_2^2) \simeq (246\ \mathrm{GeV})^2$

2HDM in Matrix Notation

- 2 x 2 行列で書き直す: $H \equiv \left(i\sigma_2 \Phi_1^*,\ \Phi_2\right) = \begin{pmatrix} \phi_{1,2}^* & \phi_{2,1} \\ -\phi_{1,1}^* & \phi_{2,2} \end{pmatrix}$

$$V(\Phi_1, \Phi_2) = -m_1^2\ \mathrm{Tr}\,|H|^2 - m_2^2\ \mathrm{Tr}\left(|H|^2 \sigma_3\right) - \left(m_3^2 \det H + \mathrm{h.c.}\right)$$
$$+\alpha_1\ \mathrm{Tr}\,|H|^4 + \alpha_2 \left(\mathrm{Tr}\,|H|^2\right)^2 + \alpha_3\ \mathrm{Tr}\left(|H|^2 \sigma_3 |H|^2 \sigma_3\right)$$
$$+\alpha_4\ \mathrm{Tr}\left(|H|^2 \sigma_3 |H|^2\right) + \left(\alpha_5 \det H^2 + \mathrm{h.c.}\right)$$

$|H|^2 \equiv H^\dagger H$

- VEV $\quad \langle H \rangle = \begin{pmatrix} v_1 & 0 \\ 0 & v_2 \end{pmatrix}$

Simplification

- 以下、最もsimpleな場合を考える： $m_2, m_3, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5 = 0$

$$V(\Phi_1, \Phi_2) = -m_1^2 \,\mathrm{Tr}\,|H|^2 - \cancel{m_2^2 \,\mathrm{Tr}\left(|H|^2\sigma_3\right)} - \cancel{\left(m_3^2 \det H + \mathrm{h.c.}\right)}$$

$$+\alpha_1 \,\mathrm{Tr}\,|H|^4 + \alpha_2 \left(\mathrm{Tr}\,|H|^2\right)^2 + \cancel{\alpha_3 \,\mathrm{Tr}\left(|H|^2\sigma_3|H|^2\sigma_3\right)}$$

$$+\cancel{\alpha_4 \,\mathrm{Tr}\left(|H|^2\sigma_3|H|^2\right)} + \cancel{\left(\alpha_5 \det H^2 + \mathrm{h.c.}\right)}$$

Simplification

- 以下、最もsimpleな場合を考える： $m_2, m_3, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5 = 0$

$$
\begin{aligned}
V(\Phi_1, \Phi_2) = &- m_1^2 \ \mathrm{Tr}\,|H|^2 - \cancel{m_2^2 \ \mathrm{Tr}\left(|H|^2\sigma_3\right)} - \cancel{\left(m_3^2 \det H + \mathrm{h.c.}\right)} \\
&+\alpha_1 \ \mathrm{Tr}\,|H|^4 + \alpha_2 \left(\mathrm{Tr}\,|H|^2\right)^2 + \cancel{\alpha_3 \ \mathrm{Tr}\left(|H|^2\sigma_3|H|^2\sigma_3\right)} \\
&\cancel{+\alpha_4 \ \mathrm{Tr}\left(|H|^2\sigma_3|H|^2\right)} + \cancel{\left(\alpha_5 \det H^2 + \mathrm{h.c.}\right)}
\end{aligned}
$$

$$
V(H) = - m_1^2 \mathrm{Tr}\,|H|^2 + \alpha_1 \mathrm{Tr}\,|H|^4 + \alpha_2 \left(\mathrm{Tr}\,|H|^2\right)^2
$$

Simplification

- 以下、最もsimpleな場合を考える： $m_2, m_3, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5 = 0$

$$V(H) = -m_1^2 \mathrm{Tr}\,|H|^2 + \alpha_1 \mathrm{Tr}\,|H|^4 + \alpha_2 \left(\mathrm{Tr}\,|H|^2\right)^2$$

Simplification

- 以下、最もsimpleな場合を考える：　$m_2, m_3, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5 = 0$

$$V(H) = -m_1^2 \mathrm{Tr}|H|^2 + \alpha_1 \mathrm{Tr}|H|^4 + \alpha_2 \left(\mathrm{Tr}|H|^2\right)^2$$

- このとき、Lagrangianは以下のふたつのglobal対称性を持つ

Simplification

- 以下、最もsimpleな場合を考える： $m_2, m_3, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5 = 0$

$$V(H) = -m_1^2 \mathrm{Tr}|H|^2 + \alpha_1 \mathrm{Tr}|H|^4 + \alpha_2 \left(\mathrm{Tr}|H|^2\right)^2$$

- このとき、Lagrangianは以下のふたつのglobal対称性を持つ

  - $U(1)_a$ 対称性： $H \to e^{i\alpha} H$ $\quad (\Phi_1 \to e^{-i\alpha}\Phi_1,\ \Phi_2 \to e^{i\alpha}\Phi_2)$

真空で破れる ⟶ NG bosonが出る (後でmassiveにする)

Simplification

- 以下、最もsimpleな場合を考える： $m_2, m_3, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5 = 0$

$$V(H) = -m_1^2 \mathrm{Tr}|H|^2 + \alpha_1 \mathrm{Tr}|H|^4 + \alpha_2 \left(\mathrm{Tr}|H|^2\right)^2$$

- このとき、Lagrangianは以下のふたつのglobal対称性を持つ
  - $U(1)_a$ 対称性： $H \to e^{i\alpha} H$ $\quad (\Phi_1 \to e^{-i\alpha}\Phi_1,\ \Phi_2 \to e^{i\alpha}\Phi_2)$

    真空で破れる ⟶ NG bosonが出る (後でmassiveにする)

  - $(\mathbb{Z}_2)_C$ 対称性：

$$\begin{cases} H \to (i\sigma^1)\ H\ (i\sigma^1)^\dagger \\ W_i \to (i\sigma^1)\ W_i\ (i\sigma^1)^\dagger \\ B_i \to -B_i \end{cases} \longrightarrow v_1 = v_2 \equiv v$$

$$(\tan\beta \equiv v_2/v_1 = 1)$$

(これは真空で破れない)

Simplification

- 以下、最もsimpleな場合を考える： $m_2, m_3, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5 = 0$

$$V(H) = -m_1^2 \mathrm{Tr}|H|^2 + \alpha_1 \mathrm{Tr}|H|^4 + \alpha_2 \left(\mathrm{Tr}|H|^2\right)^2$$

- このとき、Lagrangianは以下のふたつのglobal対称性を持つ

• $U(1)_a$ 対称性： $H \to e^{i\alpha} H$ $\quad (\Phi_1 \to e^{-i\alpha}\Phi_1,\ \Phi_2 \to e^{i\alpha}\Phi_2)$

真空で破れる ⟶ NG bosonが出る (後でmassiveにする)

• $(\mathbb{Z}_2)_C$ 対称性：

$$\begin{cases} H \to (i\sigma^1)\ H\ (i\sigma^1)^\dagger \\ W_i \to (i\sigma^1)\ W_i\ (i\sigma^1)^\dagger \\ B_i \to -B_i \end{cases}$$

⟶ $v_1 = v_2 \equiv v$

$(\tan\beta \equiv v_2/v_1 = 1)$

(これは真空で破れない)

Topological Z-string in 2HDM

[Dvali, Senjanovic '93]

[Eto, Kurachi, Nitta '18]

- 対称性の破れは $SU(2)_W \times U(1)_Y \times U(1)_a \rightarrow U(1)_{EM}$
  - Vacuum manifold $\mathscr{M} \simeq \dfrac{SU(2)_W \times U(1)_Y \times U(1)_a}{U(1)_{EM}} \simeq U(2)$
  - $\pi_1(U(2)) = \mathbb{Z}$ **Topological vortex exist !**

Topological Z-string in 2HDM

[Dvali, Senjanovic '93]

[Eto, Kurachi, Nitta '18]

- 対称性の破れは $SU(2)_W \times U(1)_Y \times U(1)_a \to U(1)_{EM}$

  - Vacuum manifold $\mathscr{M} \simeq \dfrac{SU(2)_W \times U(1)_Y \times U(1)_a}{U(1)_{EM}} \simeq U(2)$

  - $\pi_1(U(2)) = \mathbb{Z}$ **Topological vortex exist !**

- **Topological Z-string ((0,1)-string)**

$$H^{(0,1)} \sim v \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\theta} \end{pmatrix} = v e^{i\frac{\theta}{2}} e^{-i\frac{\theta}{2}\sigma_3} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$Z_i^{(0,1)} = \frac{\cos\theta_W}{g} \frac{\epsilon_{3ij}\ x^j}{r^2}$$

Topological Z-string in 2HDM

[Dvali, Senjanovic '93]
[Eto, Kurachi, Nitta '18]

- 対称性の破れは $SU(2)_W \times U(1)_Y \times U(1)_a \to U(1)_{EM}$

  ➡ Vacuum manifold $\mathcal{M} \simeq \dfrac{SU(2)_W \times U(1)_Y \times U(1)_a}{U(1)_{EM}} \simeq U(2)$

  ➡ $\pi_1(U(2)) = \mathbb{Z}$ **Topological vortex exist !**

- **Topological Z-string ((0,1)-string)**

$U(1)_a$ **phase :** $-\pi/2 \sim \pi/2$

$$H^{(0,1)} \sim v \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\theta} \end{pmatrix} = v e^{i\frac{\theta}{2}} e^{-i\frac{\theta}{2}\sigma_3} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

contribute to Z flux

$$Z_i^{(0,1)} = \frac{\cos\theta_W}{g} \frac{\epsilon_{3ij}\ x^j}{r^2}$$

Topological Z-string in 2HDM

[Dvali, Senjanovic '93]
[Eto, Kurachi, Nitta '18]

- 対称性の破れは　$SU(2)_W \times U(1)_Y \times U(1)_a \to U(1)_{EM}$

  - Vacuum manifold $\mathscr{M} \simeq \dfrac{SU(2)_W \times U(1)_Y \times U(1)_a}{U(1)_{EM}} \simeq U(2)$

  - $\pi_1(U(2)) = \mathbb{Z}$ **Topological vortex exist !**

- **Topological Z-string ((0,1)-string)**

$U(1)_a$ **phase :** $-\pi/2 \sim \pi/2$

$$H^{(0,1)} \sim v \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\theta} \end{pmatrix} = v e^{i\frac{\theta}{2}} e^{-i\frac{\theta}{2}\sigma_3} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

contribute to Z flux

$$Z_i^{(0,1)} = \frac{\cos\theta_W}{g} \frac{\epsilon_{3ij}\, x^j}{r^2}$$

- confined flux $\Phi_Z = \dfrac{2\pi}{g_Z}$ **Z-string in SMの半分**
- global vortex ⟶ **tension** $\sim \pi v^2 \log \Lambda_{IR}$

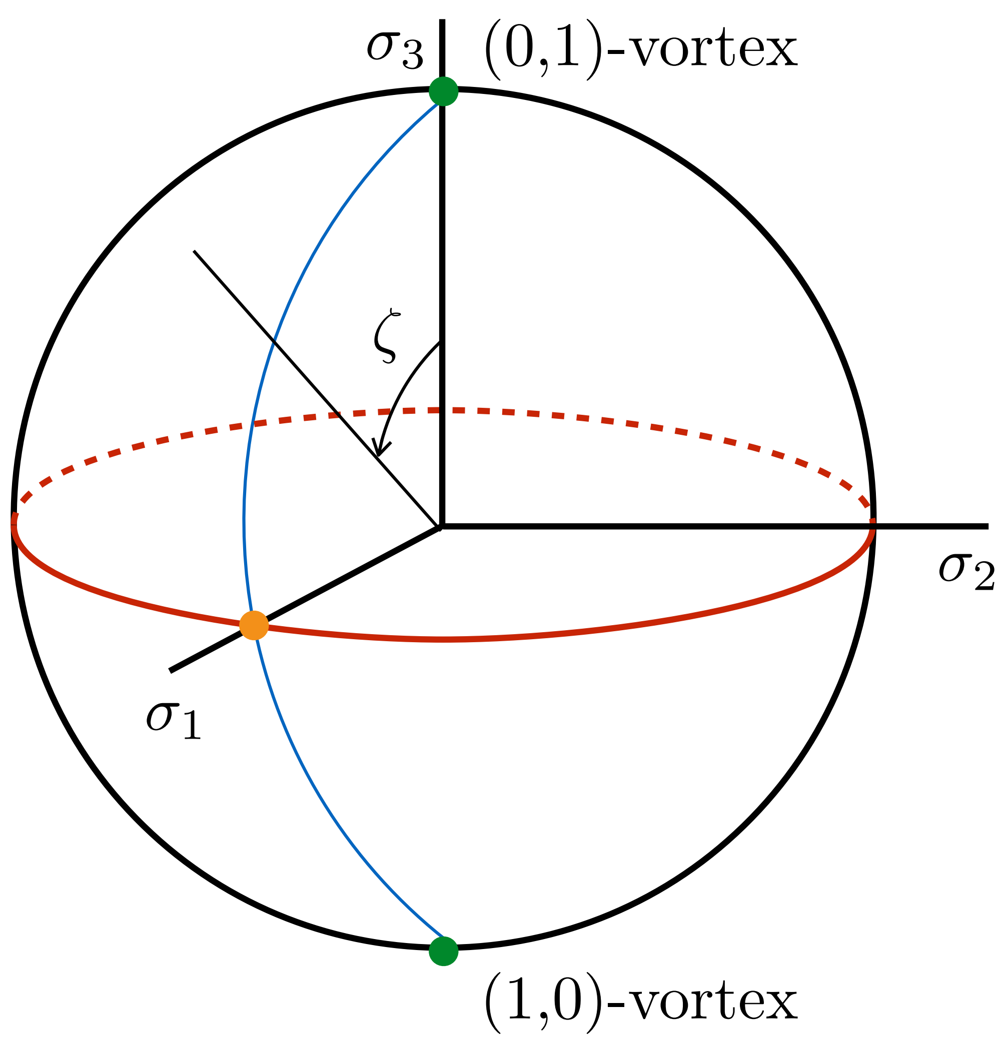
Moduli Space of Vortices

- $SU(2)_C$ Custodial 変換： $H \to UHU^\dagger$, $W_i \to UW_iU^\dagger$ $U \in SU(2)_C$
  をした後の配位もまた topological vortex

Moduli Space of Vortices

- $SU(2)_C$ Custodial 変換： $H \to UHU^\dagger, \quad W_i \to UW_iU^\dagger \qquad U \in SU(2)_C$
  をした後の配位もまた topological vortex
- topological vortex 全体の集合 = moduli space S^2

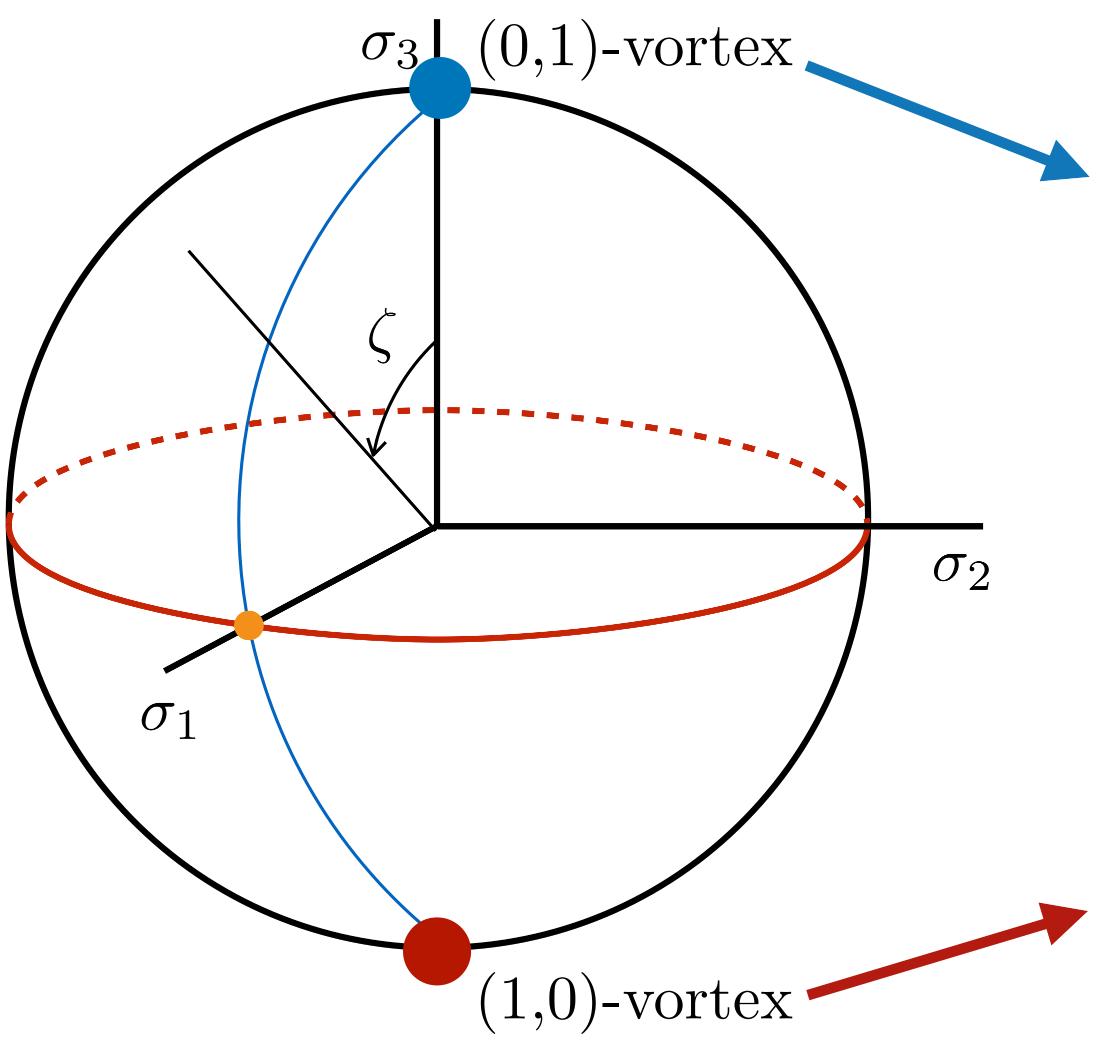
⟺ moduli space S^2 上の各点が一つの vortex に対応する



Moduli Space of Vortices

- $SU(2)_C$ Custodial 変換： $H \to UHU^\dagger, \quad W_i \to UW_iU^\dagger \qquad U \in SU(2)_C$
  をした後の配位もまた topological vortex
- topological vortex 全体の集合 = moduli space S^2

⟺ moduli space S^2 上の各点が一つの vortex に対応する



２種類のZ-string：

$$H^{(0,1)} \sim v \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\theta} \end{pmatrix}$$

Z flux: $\Phi_Z^{(0,1)} = \dfrac{2\pi}{g_Z}$

$$H^{(1,0)} \sim v \begin{pmatrix} e^{i\theta} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

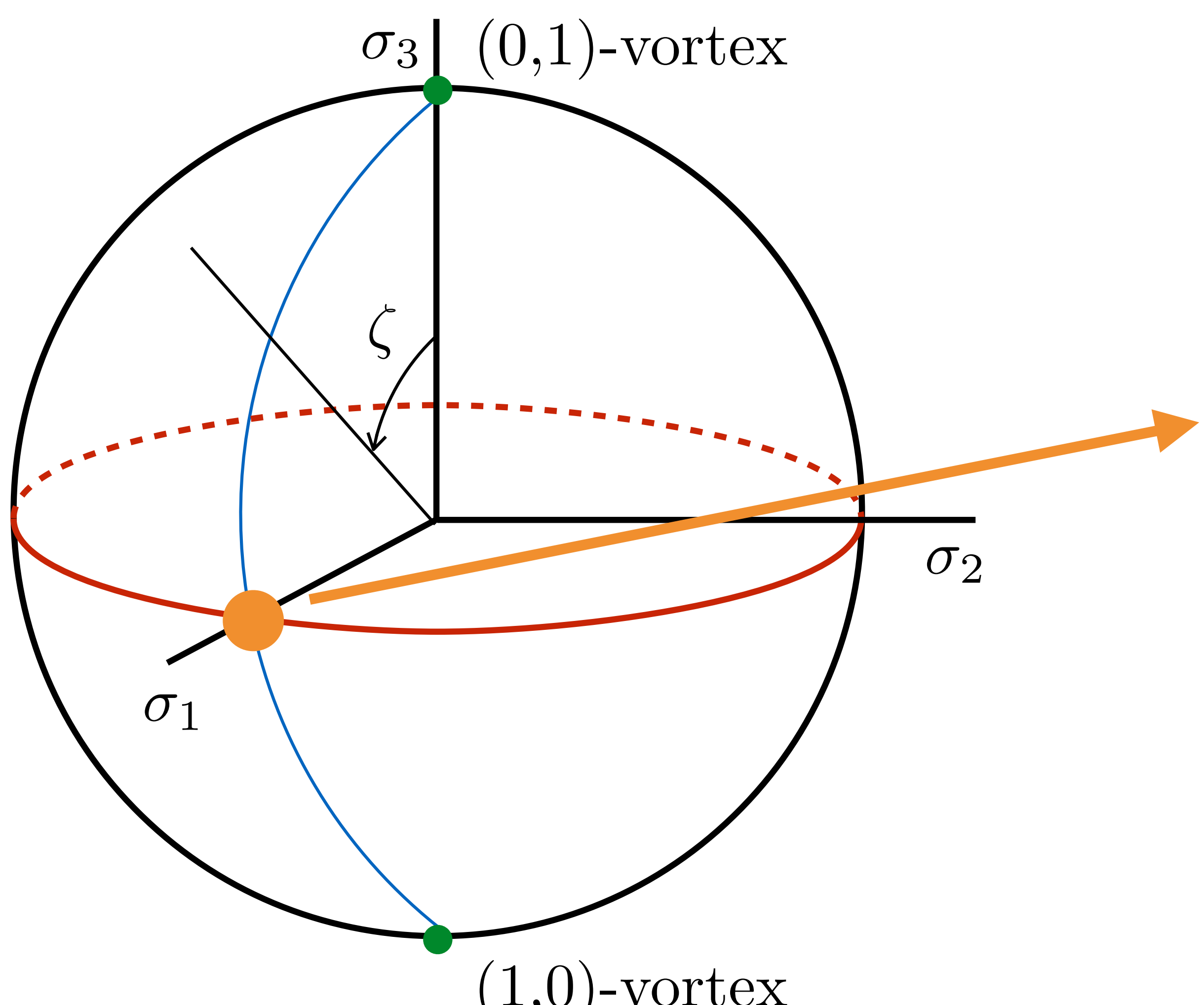
Z flux: $\Phi_Z^{(1,0)} = -\dfrac{2\pi}{g_Z}$

Moduli Space of Vortices

- $SU(2)_C$ Custodial 変換： $H \to UHU^\dagger, \quad W_i \to UW_iU^\dagger \qquad U \in SU(2)_C$
  をした後の配位もまた topological vortex

- topological vortex 全体の集合 = moduli space S^2

⇔ moduli space S^2 上の各点が一つの vortex に対応する



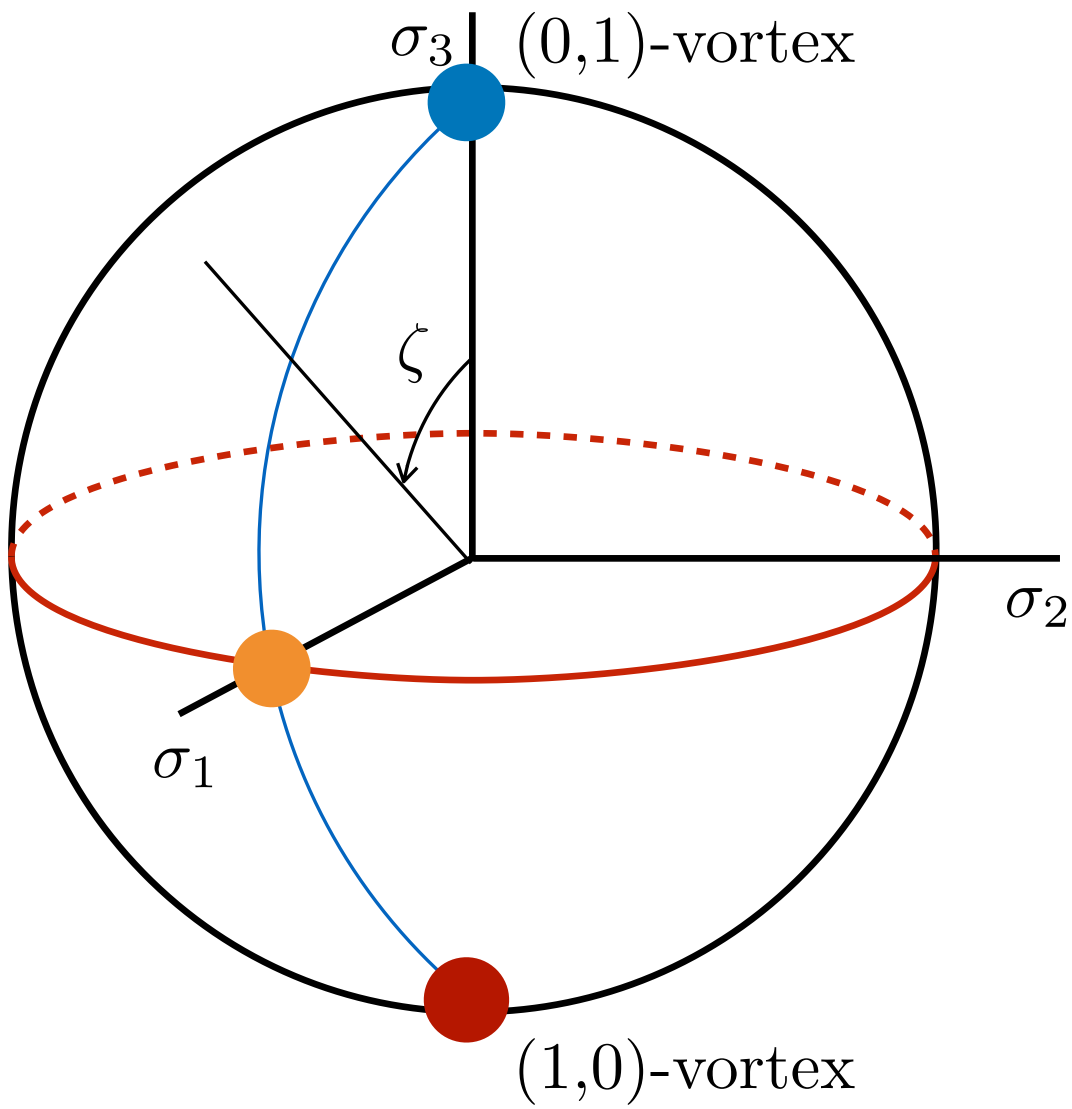
W-string

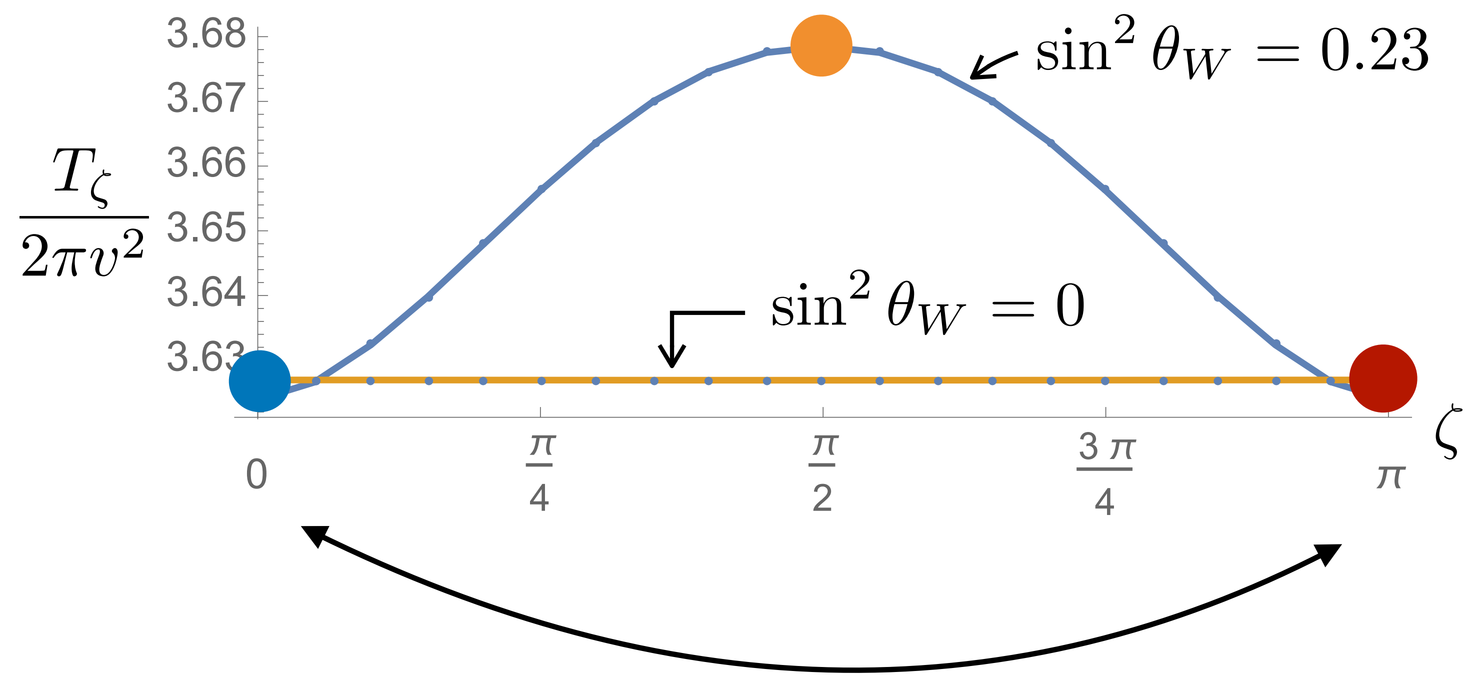
$$H \sim v\, e^{\frac{i\theta}{2}}\, e^{\frac{i\theta}{2}\sigma_1}$$

W flux: $\Phi_{W^1} = \dfrac{2\pi}{g}$

Tensions of topological vortices

- $U(1)_Y$ によってWとZが区別されるので、tensionに差が出る。





２つのZ-stringは

$(\mathbb{Z}_2)_C$ 変換で結びつく

$(\mathbb{Z}_2)_C$ 対称性の帰結として縮退

Magnetic Monopole in 2HDM

[Eto, **Hamada**, Kurachi, Nitta ’19]

Magnetic Monopole in 2HDM

- 対称性の破れは $SU(2)_W \times U(1)_Y \times U(1)_a \to U(1)_{EM}$

  - Vacuum manifold $\mathscr{M} \simeq \dfrac{SU(2)_W \times U(1)_Y \times U(1)_a}{U(1)_{EM}} \simeq U(2)$

Magnetic Monopole in 2HDM

- 対称性の破れは $SU(2)_W \times U(1)_Y \times U(1)_a \to U(1)_{EM}$

  - Vacuum manifold $\mathscr{M} \simeq \dfrac{SU(2)_W \times U(1)_Y \times U(1)_a}{U(1)_{EM}} \simeq U(2)$

  - $\pi_2(U(2)) = 0$ 安定な**Magnetic monopole**は存在しない？

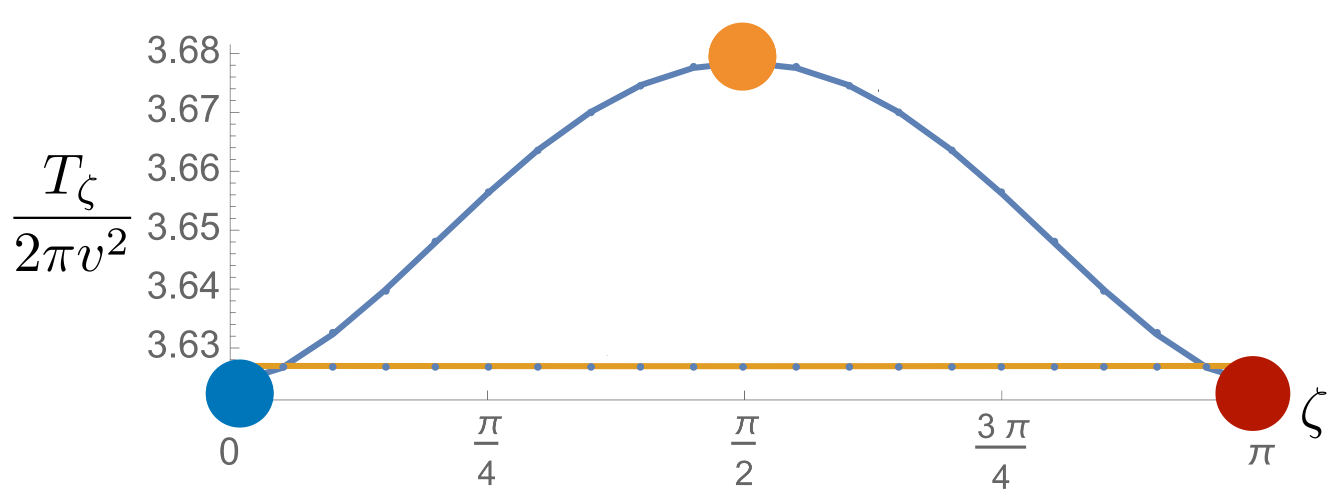
Magnetic Monopole in 2HDM

- 対称性の破れは　$SU(2)_W \times U(1)_Y \times U(1)_a \to U(1)_{EM}$

  - Vacuum manifold　$\mathscr{M} \simeq \dfrac{SU(2)_W \times U(1)_Y \times U(1)_a}{U(1)_{EM}} \simeq U(2)$

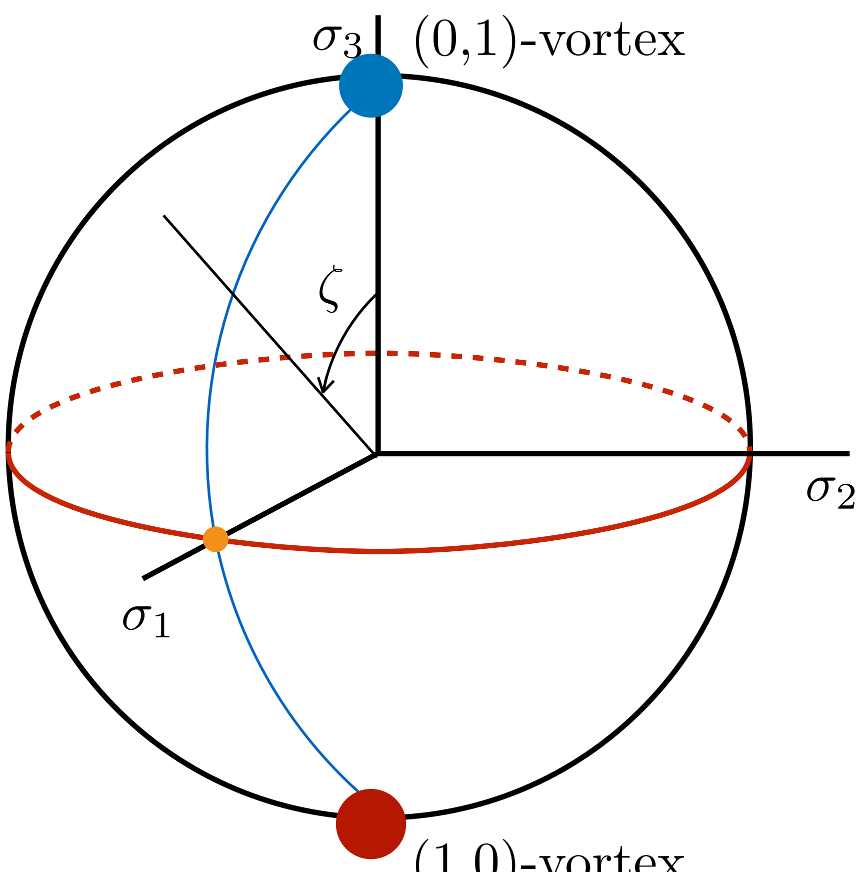
  - $\pi_2(U(2)) = 0$　安定なMagnetic monopoleは存在しない？

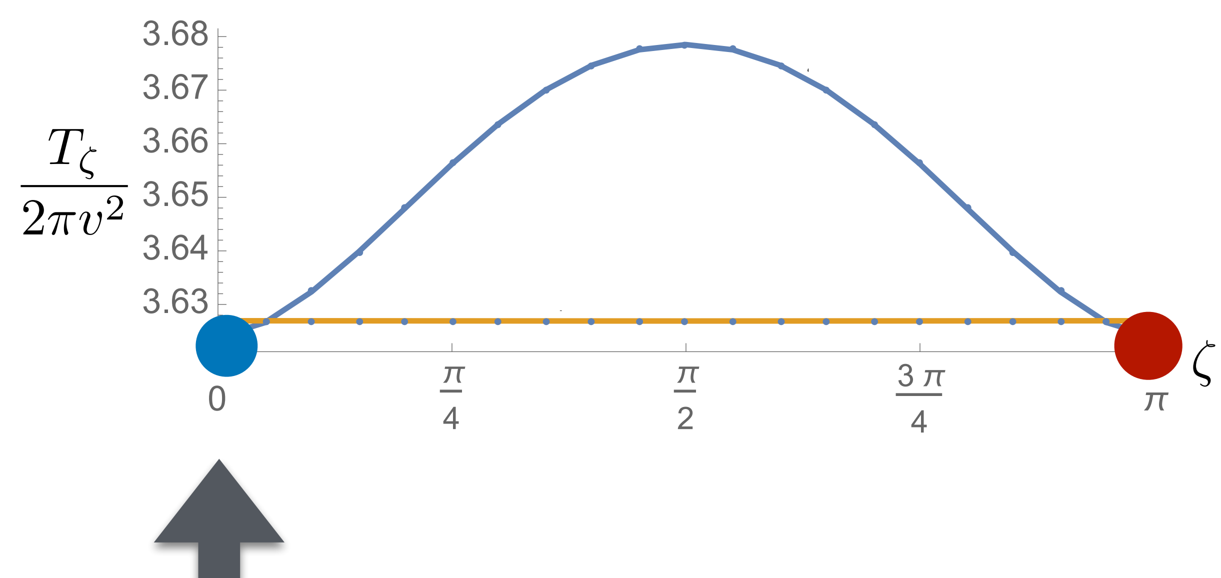
    実は存在する！　$(\mathbb{Z}_2)_C$ 対称性を使う



Magnetic Monopole as $(\mathbb{Z}_2)_C$ kink

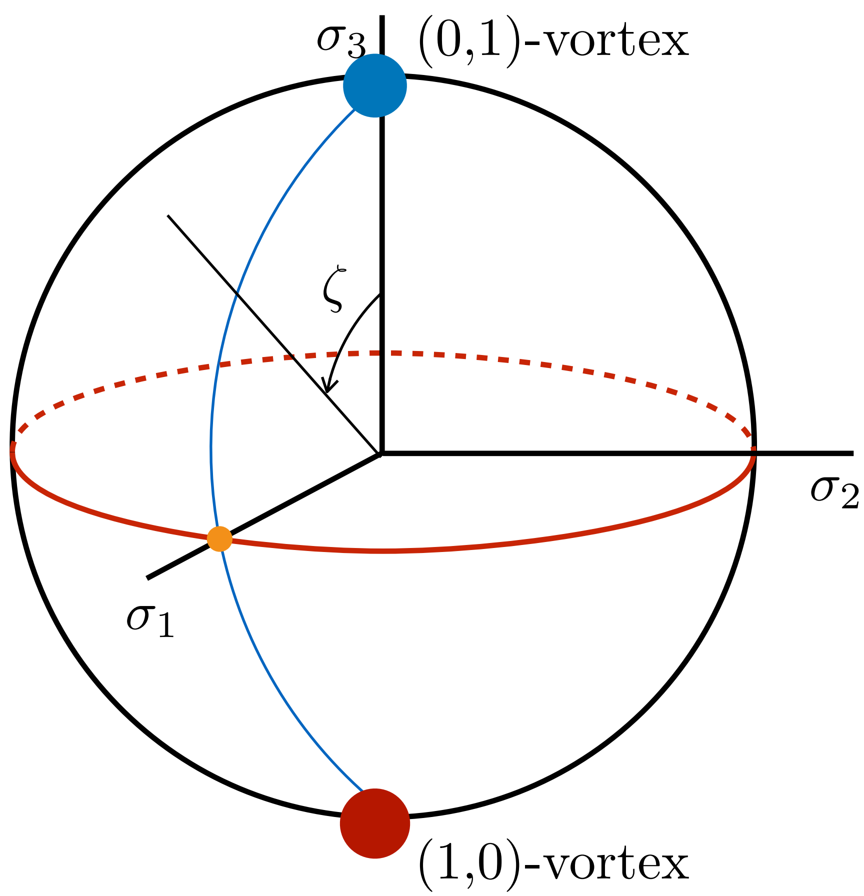
- Z-stringが存在するとき、$(\mathbb{Z}_2)_C$ 対称性は破れている

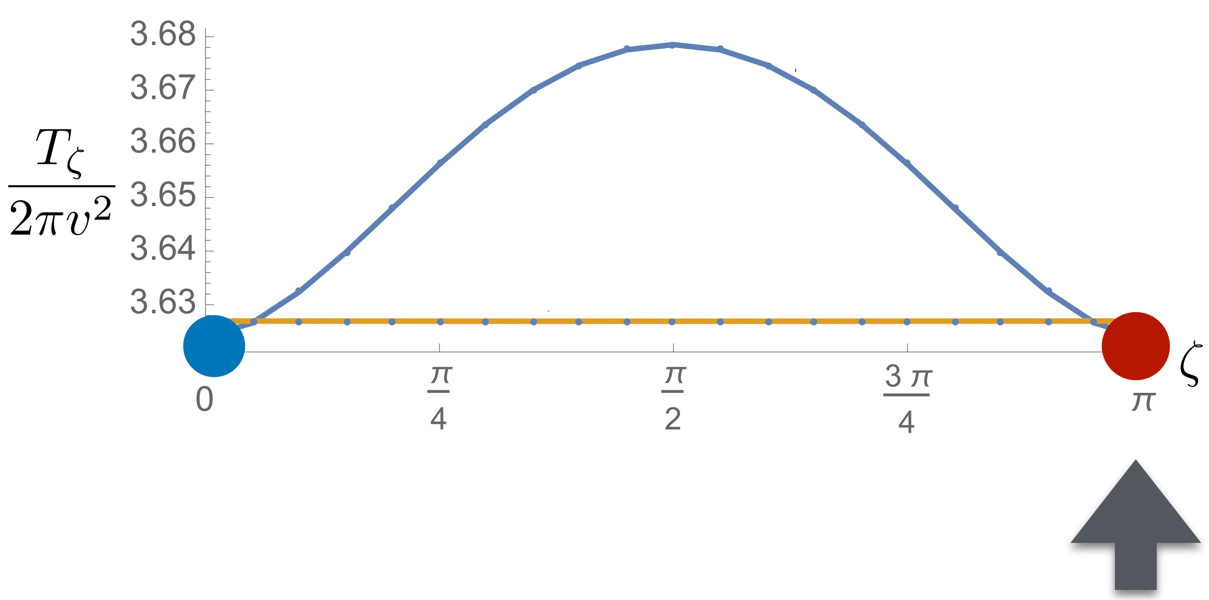




Magnetic Monopole as $(\mathbb{Z}_2)_C$ kink

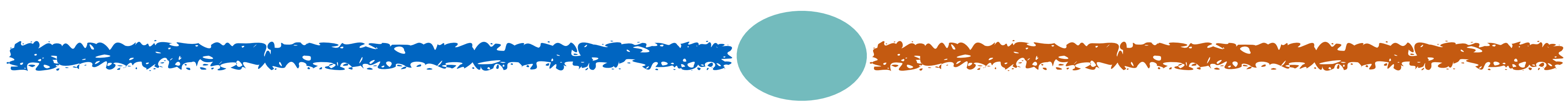
- Z-stringが存在するとき、$(\mathbb{Z}_2)_C$ 対称性は破れている



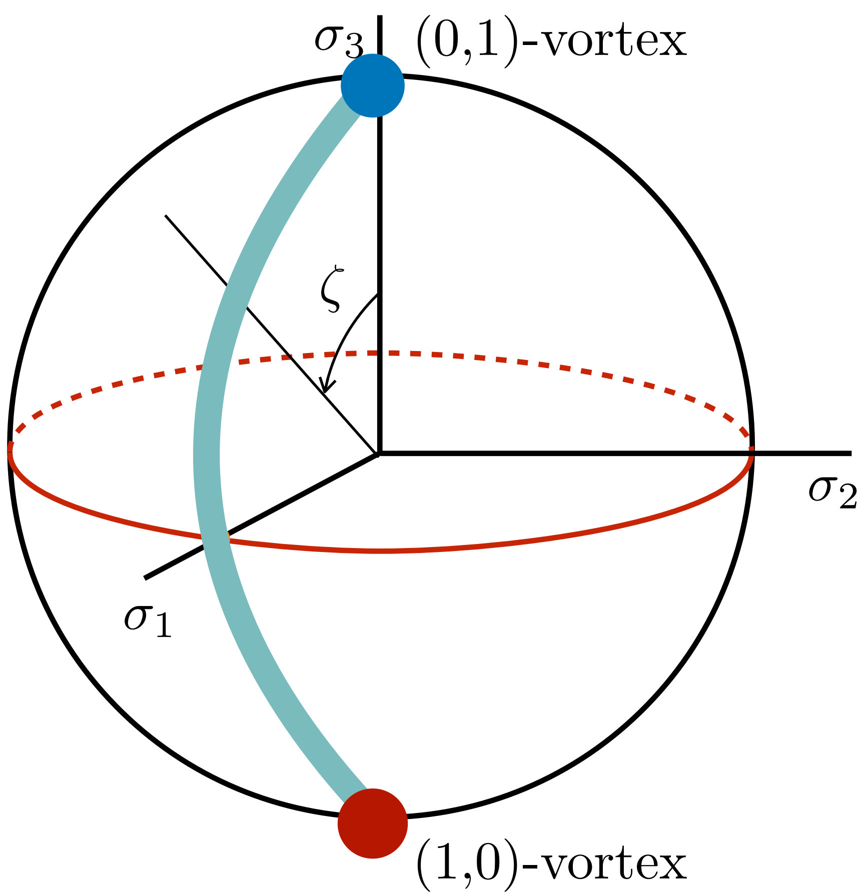


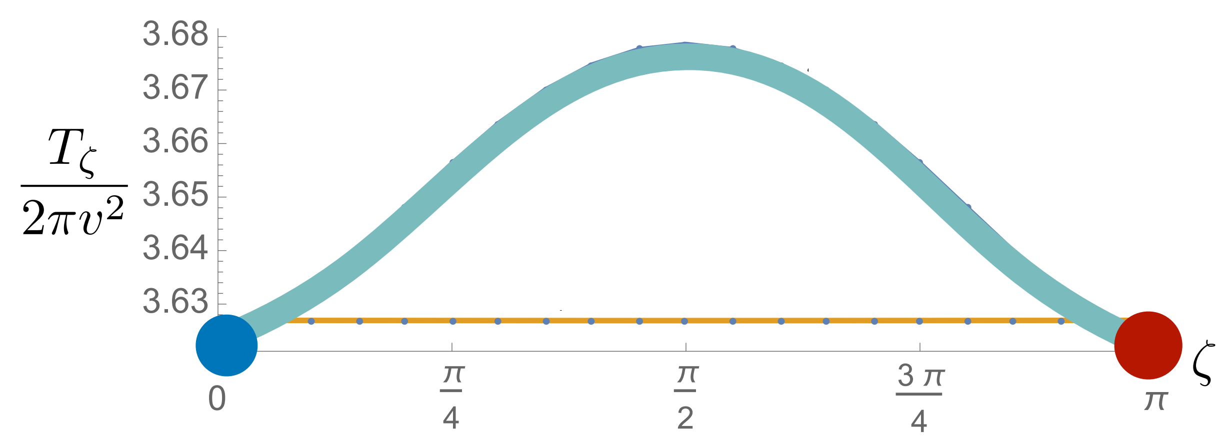
Magnetic Monopole as $(\mathbb{Z}_2)_C$ kink

- Z-stringが存在するとき、$(\mathbb{Z}_2)_C$ 対称性は破れている



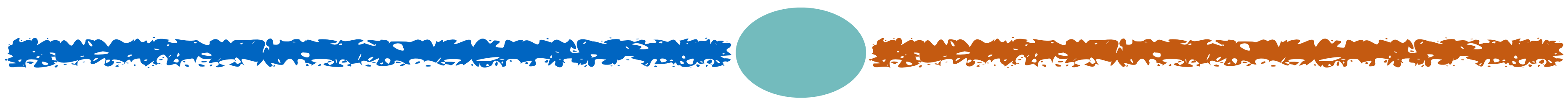
- **このSSBに付随するtopological kinkが生じる**





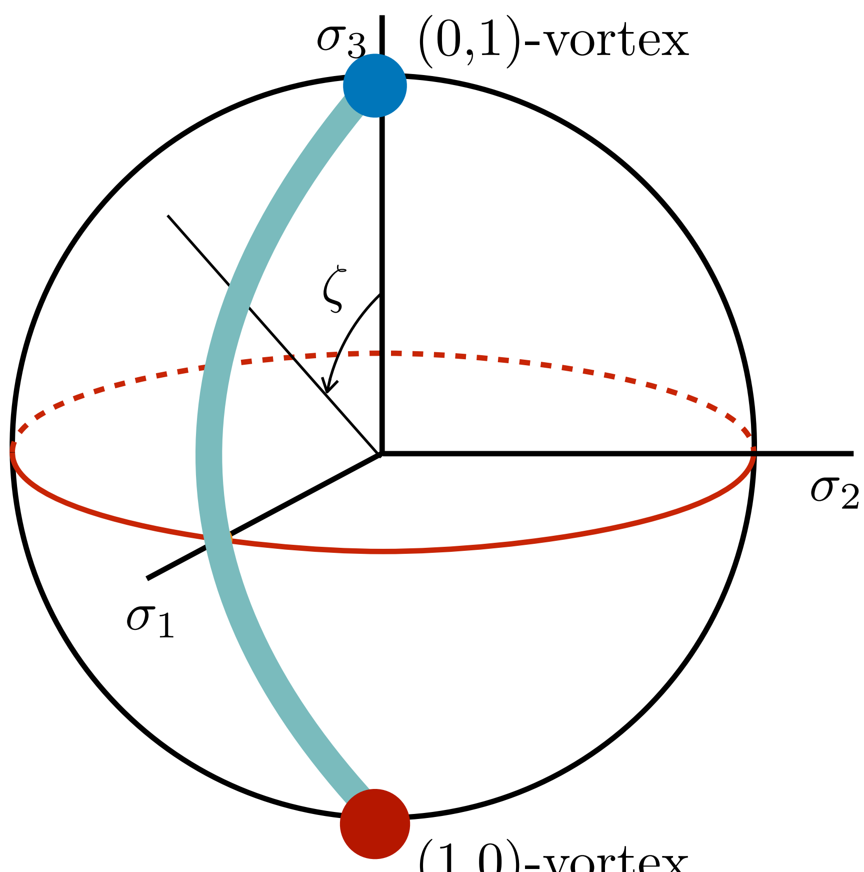
Magnetic Monopole as $(\mathbb{Z}_2)_C$ kink

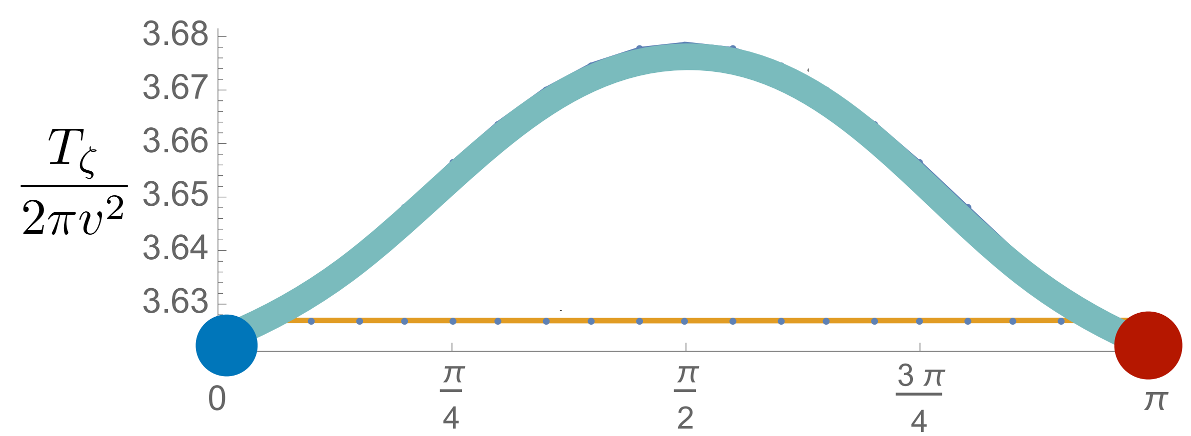
- Z-stringが存在するとき、$(\mathbb{Z}_2)_C$ 対称性は破れている



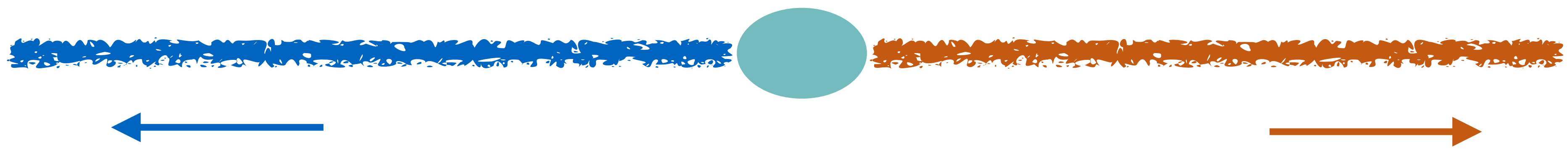
- このSSBに付随するtopological kinkが生じる

これがmagnetic monopoleとして振る舞う





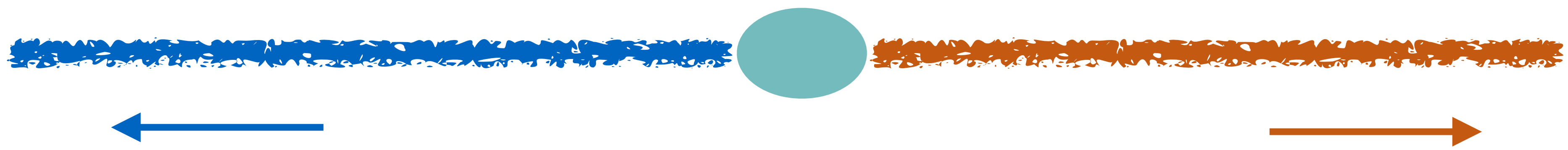
Magnetic Flux



$\Phi_Z = \frac{2\pi}{g_Z}$ $\Phi_Z = \frac{2\pi}{g_Z}$

- Z-fluxの湧き出しは合計で $\frac{2\pi}{g_Z} - \frac{-2\pi}{g_Z} = \frac{4\pi}{g_Z}$

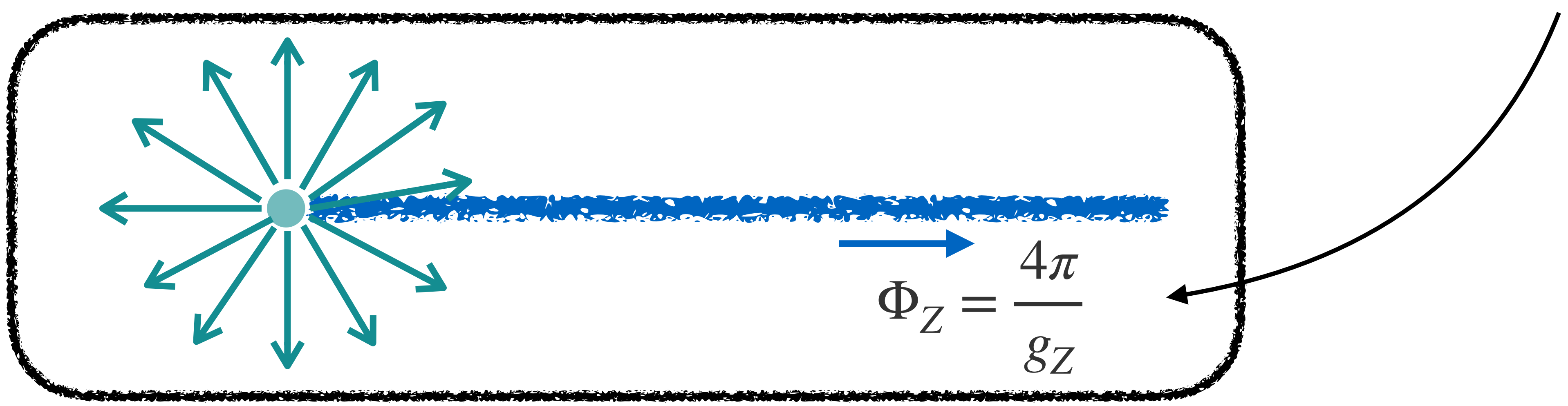
Magnetic Flux



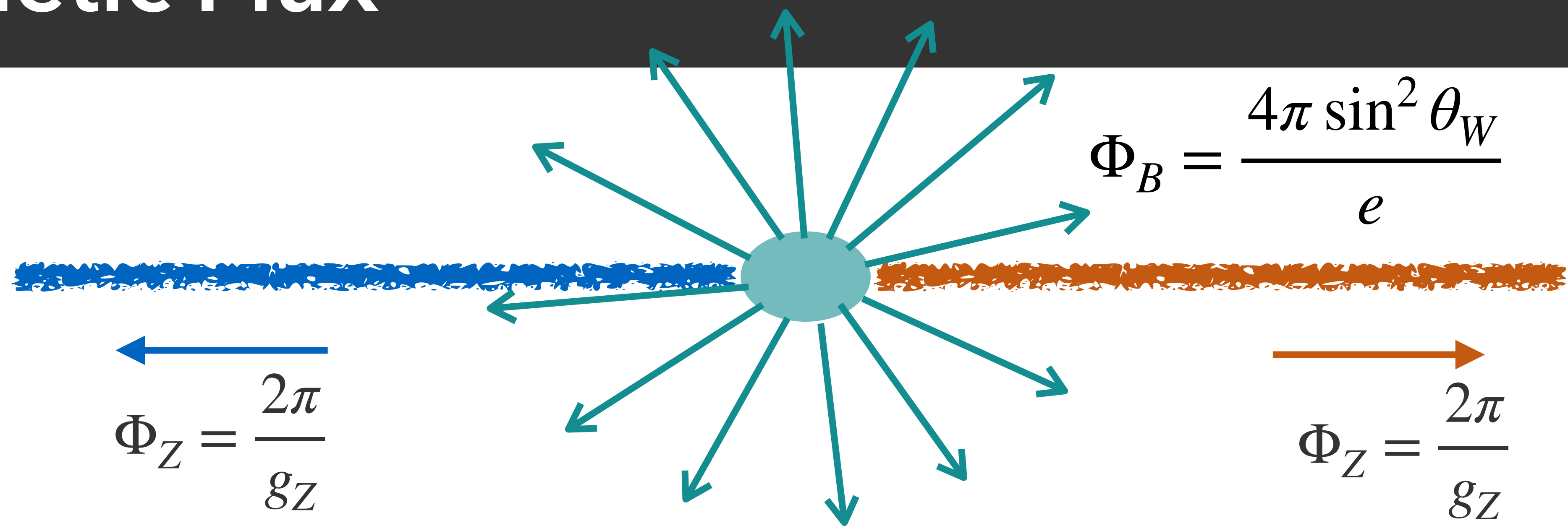
$\Phi_Z = \dfrac{2\pi}{g_Z}$ $\qquad\qquad$ $\Phi_Z = \dfrac{2\pi}{g_Z}$

- Z-fluxの湧き出しは合計で $\dfrac{2\pi}{g_Z} - \dfrac{-2\pi}{g_Z} = \dfrac{4\pi}{g_Z}$

SMのNambu monopoleのZ fluxと同じ量！

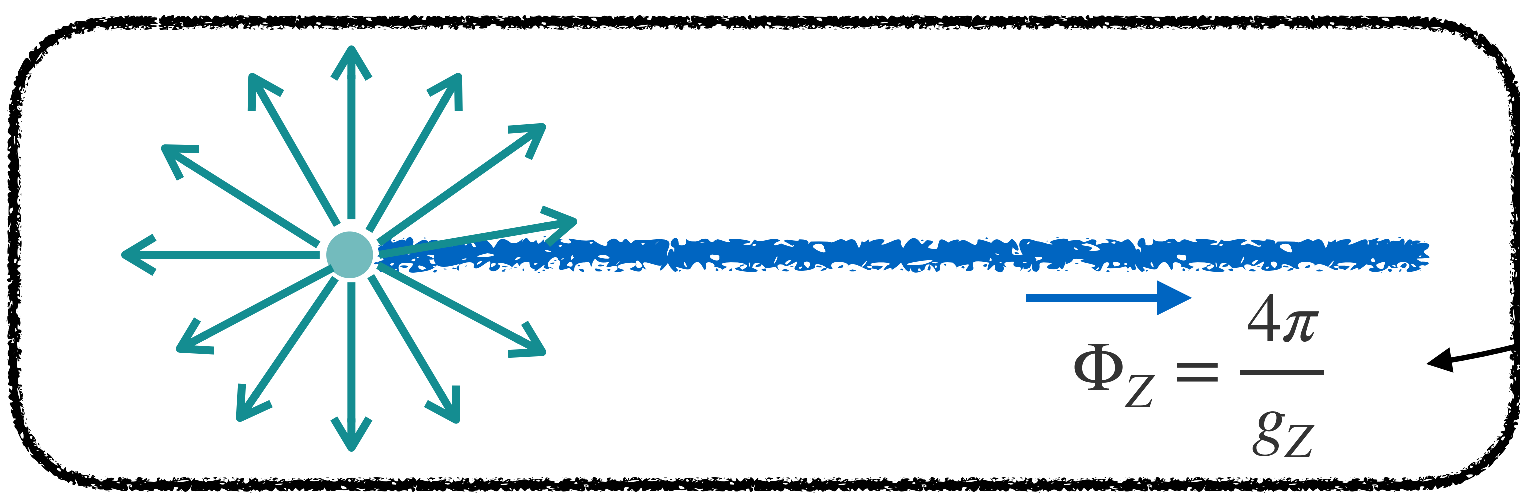


Magnetic Flux



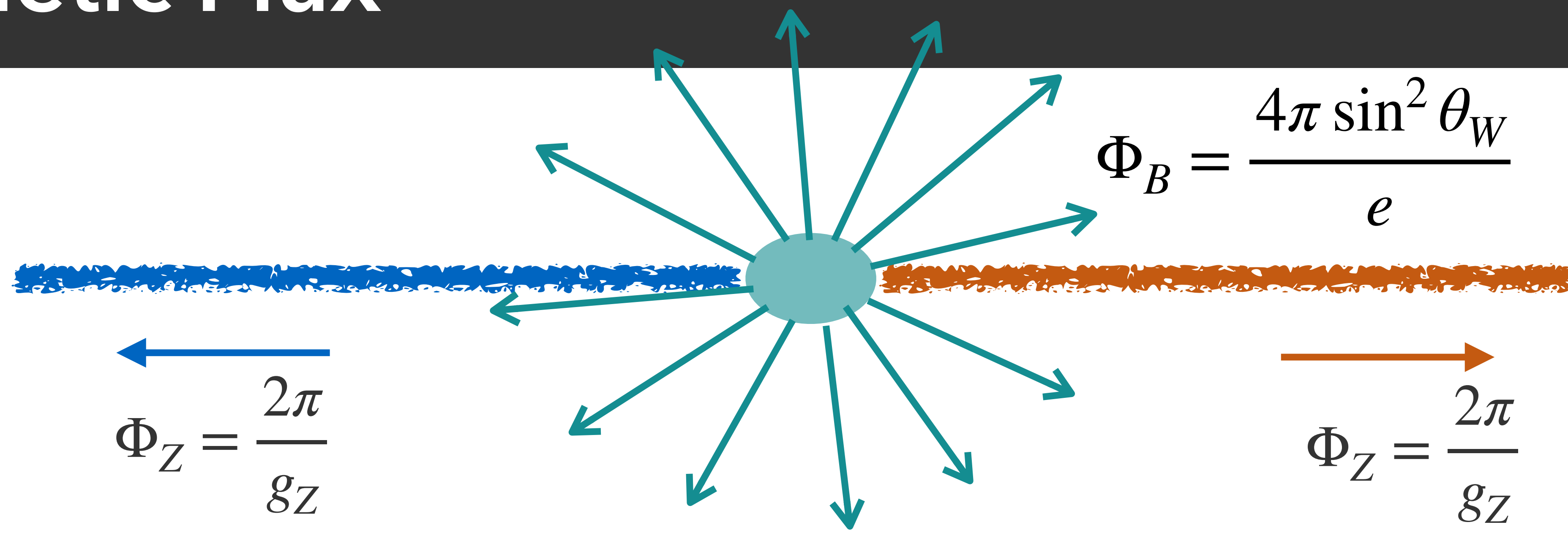
- Z-fluxの湧き出しは合計で $\frac{2\pi}{g_Z} - \frac{-2\pi}{g_Z} = \frac{4\pi}{g_Z}$

SMのNambu monopoleのZ fluxと同じ量！



- Nambu monopoleと同じ議論から、**magnetic fluxが湧き出す！**

Magnetic Flux

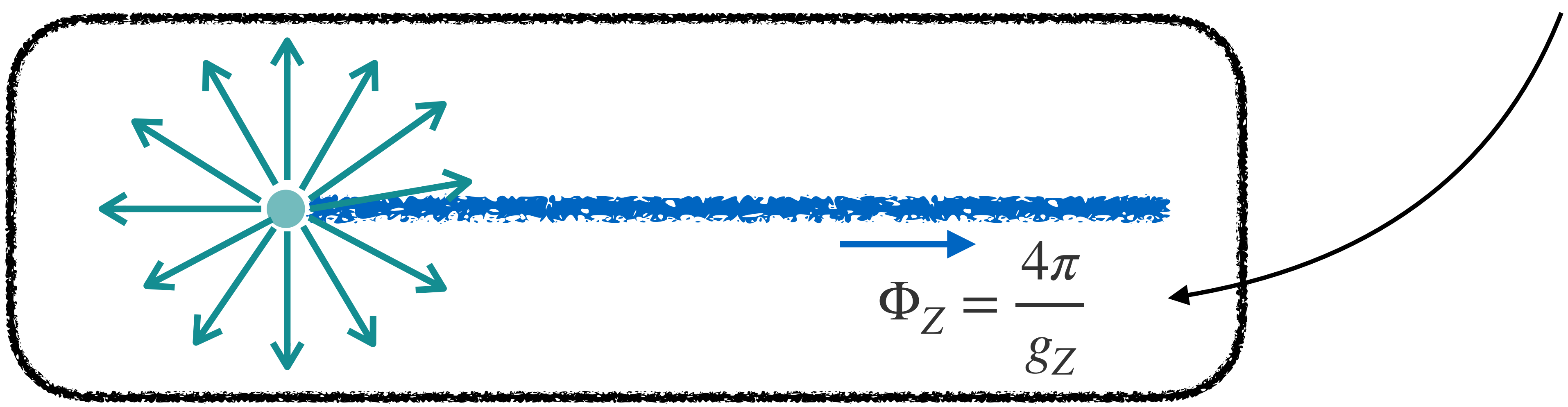


$$\Phi_B = \frac{4\pi \sin^2\theta_W}{e}$$

$$\Phi_Z = \frac{2\pi}{g_Z} \qquad \Phi_Z = \frac{2\pi}{g_Z}$$

- Z-fluxの湧き出しは合計で $\dfrac{2\pi}{g_Z} - \dfrac{-2\pi}{g_Z} = \dfrac{4\pi}{g_Z}$

SMのNambu monopoleのZ fluxと同じ量！

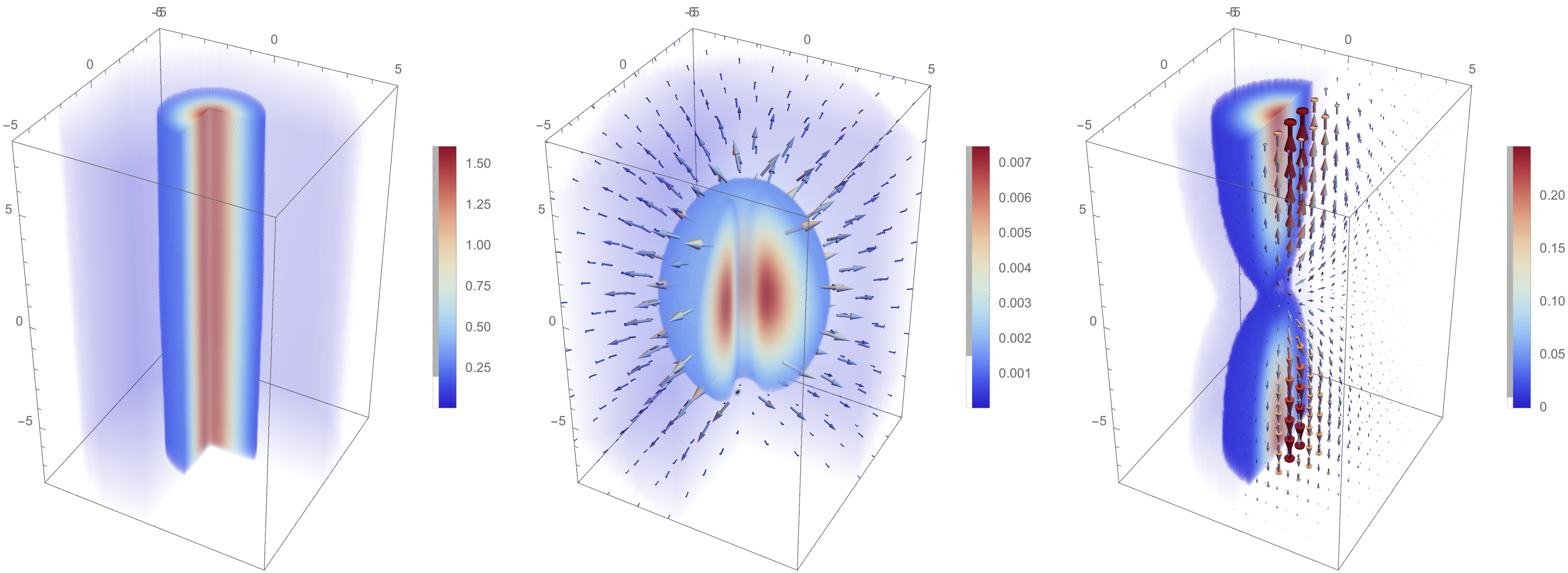


$$\Phi_Z = \frac{4\pi}{g_Z}$$

- Nambu monopoleと同じ議論から、**magnetic fluxが湧き出す！**
- **安定性は明白** (topological $(\mathbb{Z}_2)_C$ kink)

Numerical Result

- 実際に運動方程式をrelaxationで数値的に解く：



(a) energy density (b) magnetic flux (c) Z flux

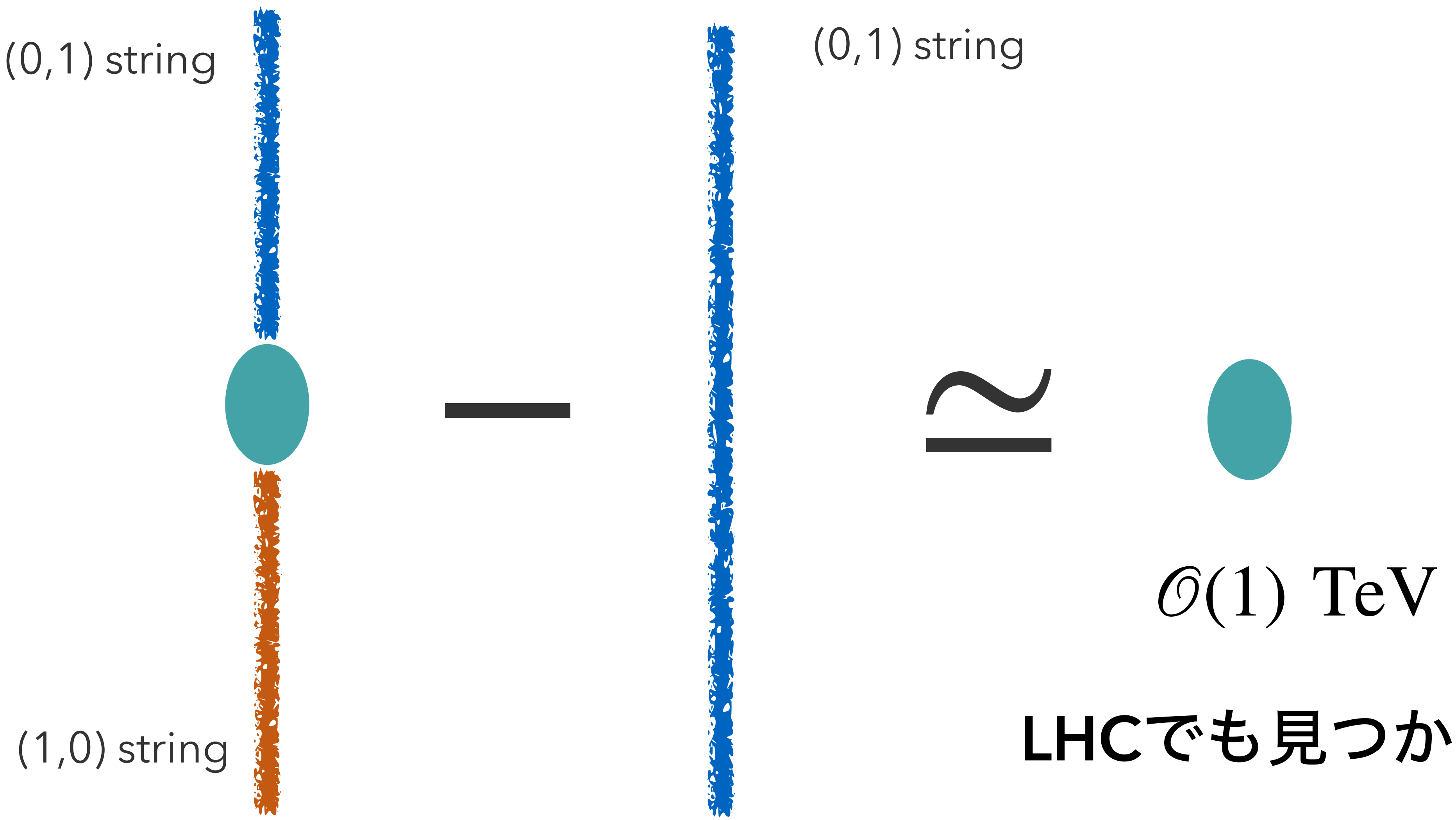
with $\sin^2\theta_W = 0.23,\ m_W = 80\ \text{GeV},\ v_{\text{EW}} = 246\ \text{GeV},$

$$m_h = 125\ \text{GeV},\ m_H = 400\ \text{GeV}$$

degenerate mass of CP-even Higgs and Charged Higgs

Monopole Mass

- string の分のエネルギーを差し引くことで、monopole ひとつあたりのmassが推定できる



LHCでも見つかる可能性！

Comments: $\cancel{U(1)}_a$

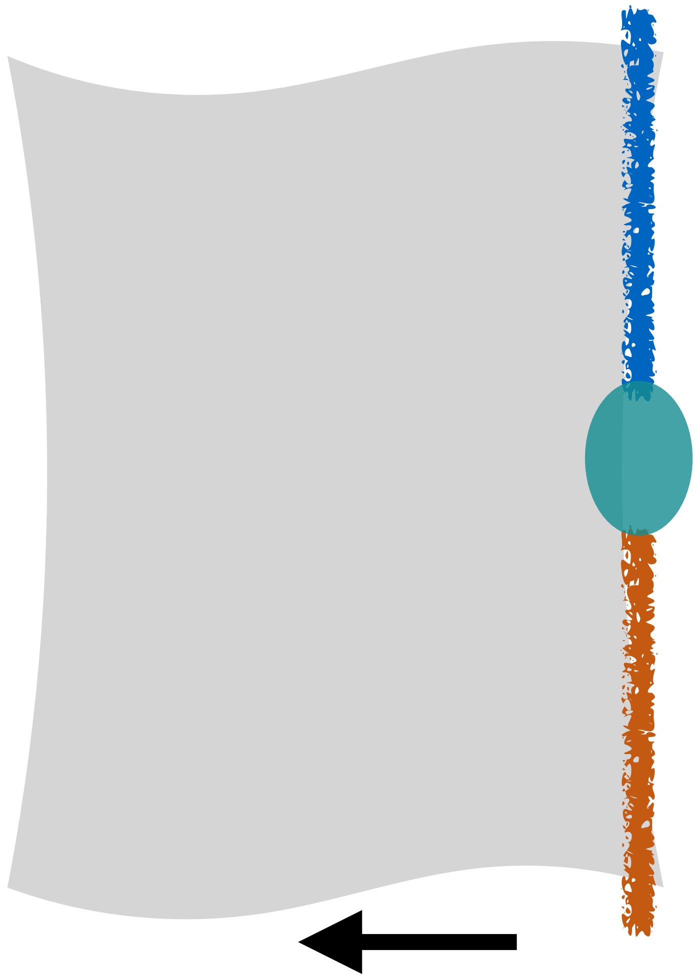
- When $U(1)_a$ symmetry is exact, NG boson appears (massless CP-odd Higgs)

  ➡ **phenomenologically disfavored**

- $\cancel{U(1)}_a$ to give a mass

  ⟶ attached by domain wall

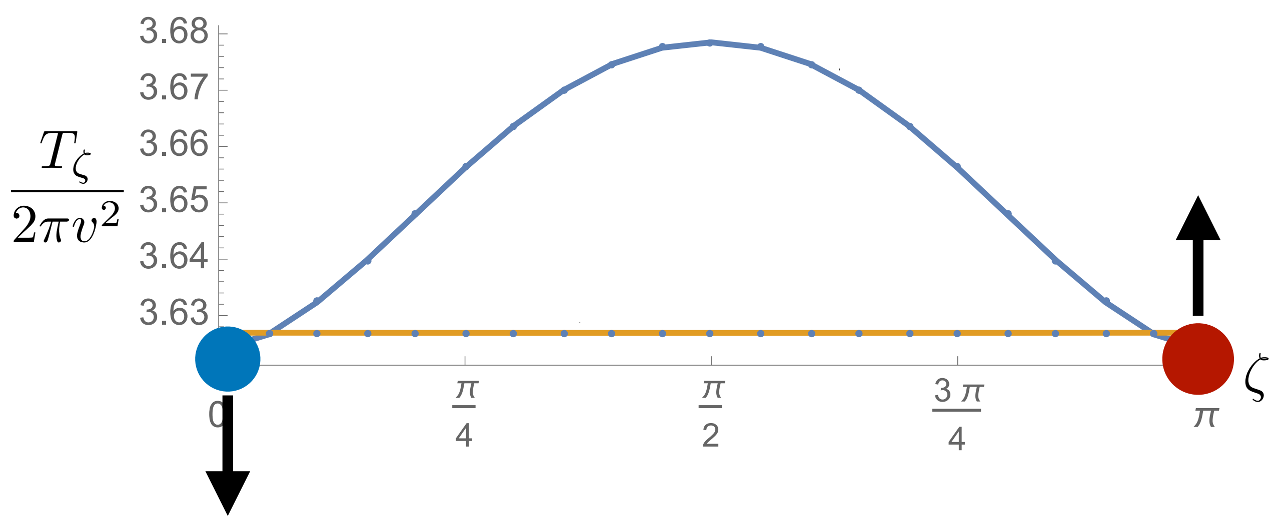
  Wallに引っ張られる

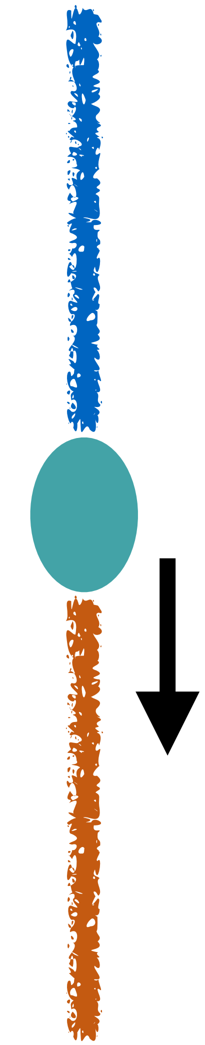


- Another option is gauging $U(1)_a$ [Ko, Omura, Yu '12]

Comments: $\cancel{(\mathbb{Z}_2)_C}$

- $\cancel{(\mathbb{Z}_2)_C}$ ➡ ふたつのZ-stringのtensionが縮退しない





➡ monopoleが重い方に引っ張られる

→ anti-monopoleと対消滅

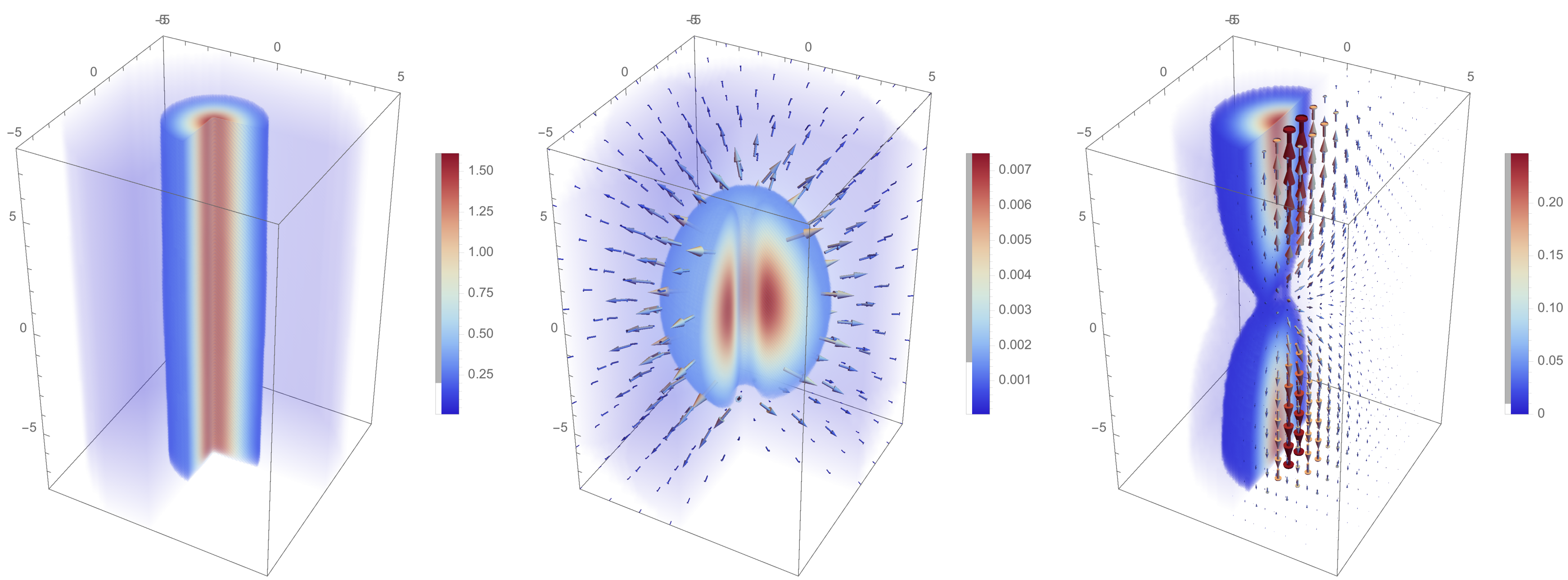
- いずれの場合もmonopoleはstaticでなくなり、加速度運動により電磁波を放射するはず

→特徴的な痕跡が見つかると嬉しい

$\tan\beta,\ m_A$ の情報が含まれる？

Summary

- **2HDMには安定な Magnetic Monopole 解が存在する**
- Key symmetries:
  - $U(1)_a \Rightarrow$ **topological vortices**
  - $(\mathbb{Z}_2)_C \Rightarrow$ **monopole as topological kink**



(a) energy density (b) magnetic flux (c) Z flux

Future works:
- Sphaleronとの関係 → バリオジェネシス？
- 初期宇宙磁場 (primordial magneto-genesis)
- 加速器でどういうprocessで生成されるか？

Backup Slides

Monopole Abundance

- GUT monopoleの時は、仮に初期宇宙で生成されても
  インフレーションで薄められる

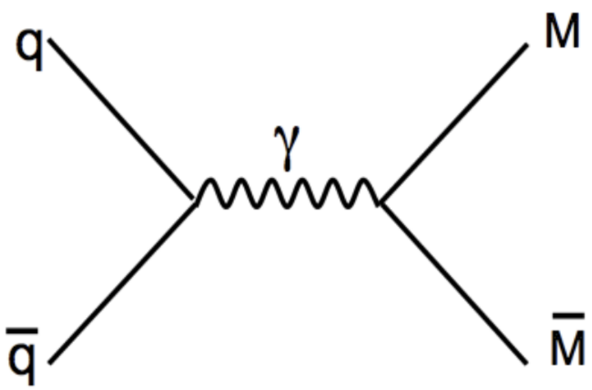
- 一方、我々のmonopoleは電弱スケールで生じるので、
  インフレーションより後に生じる

  ⇒ **大量に残りうる**

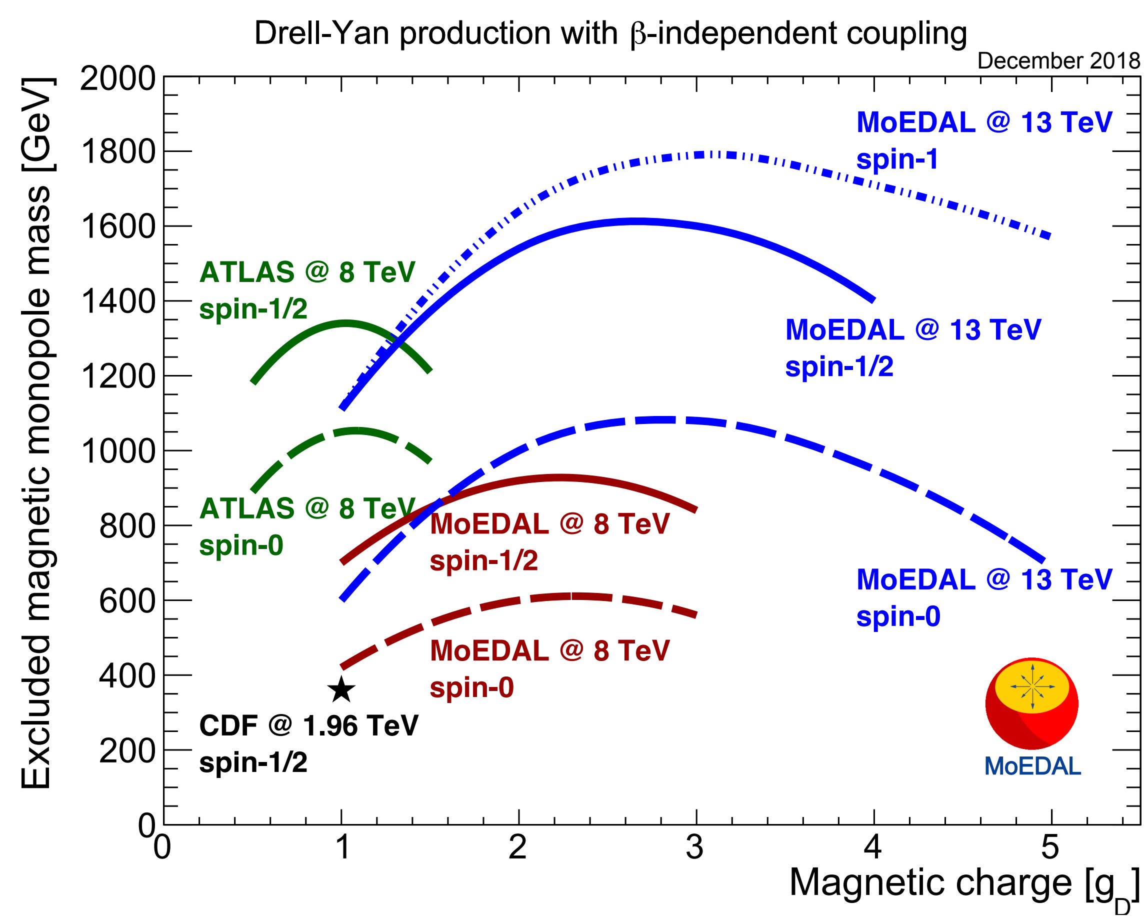
- Monopole問題？ ⟶ 軽いから問題にならなさそう

Monopole production at colliders

- Conventional process

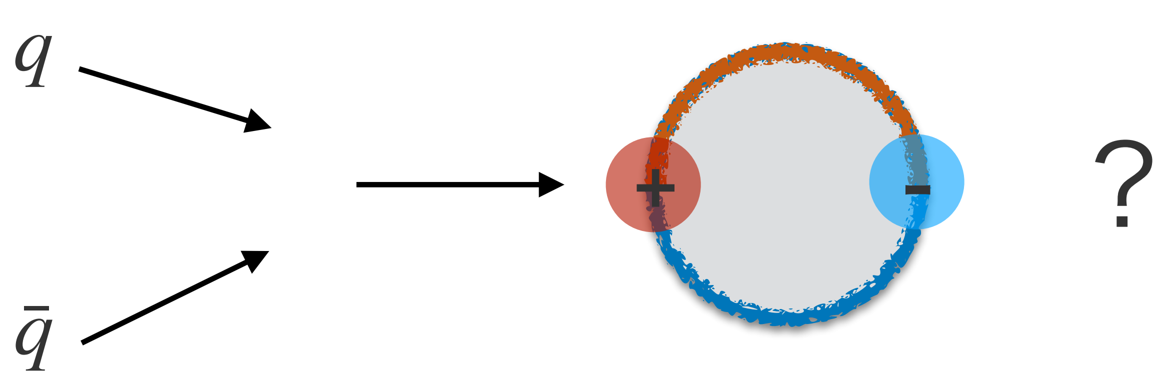


Drell Yan mechanism



A. Santra's talk at "The Quest for New Physics", Dec. '18

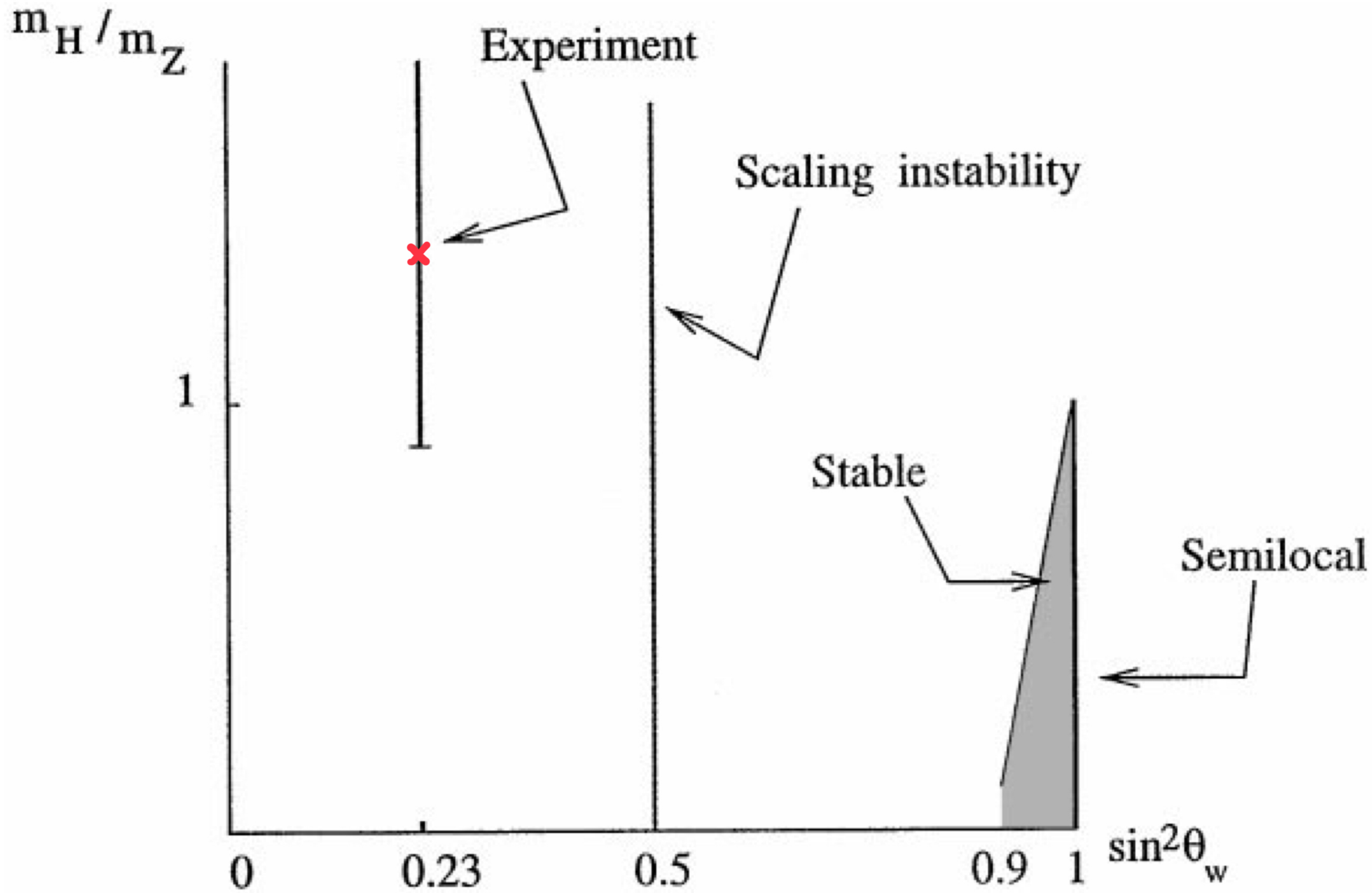
- For our monopole,



Vorton?

$$M_{monopole} + M_{string} + M_{wall} \simeq M_{monopole} \sim \mathcal{O}(1)\ \textbf{TeV}$$

Stability of Z-string in SM



[Achucarro, Vachaspati, hep-ph/9904229]

2HDM in Matrix Notation

$$V(\Phi_1,\Phi_2) = m_{11}^2\Phi_1^\dagger\Phi_1 + m_{22}^2\Phi_2^\dagger\Phi_2 - \left(m_{12}^2\Phi_1^\dagger\Phi_2 + \mathrm{h.c.}\right) + \frac{\beta_1}{2}\left(\Phi_1^\dagger\Phi_1\right)^2 + \frac{\beta_2}{2}\left(\Phi_2^\dagger\Phi_2\right)^2$$
$$+\beta_3\left(\Phi_1^\dagger\Phi_1\right)\left(\Phi_2^\dagger\Phi_2\right) + \beta_4\left(\Phi_1^\dagger\Phi_2\right)\left(\Phi_2^\dagger\Phi_1\right) + \left\{\frac{\beta_5}{2}\left(\Phi_1^\dagger\Phi_2\right)^2 + \mathrm{h.c.}\right\}$$

$$m_{11}^2 = -m_1^2 - m_2^2, \quad m_{22}^2 = -m_1^2 + m_2^2, \quad m_{12} = m_3,$$
$$\beta_1 = 2(\alpha_1+\alpha_2+\alpha_3+\alpha_4), \quad \beta_2 = 2(\alpha_1+\alpha_2+\alpha_3-\alpha_4),$$
$$\beta_3 = 2(\alpha_1+\alpha_2-\alpha_3), \quad \beta_4 = 2(\alpha_3-\alpha_1), \quad \beta_5 = 2\alpha_5$$

$$V(\Phi_1,\Phi_2) = -m_1^2\,\mathrm{Tr}|H|^2 - m_2^2\,\mathrm{Tr}\left(|H|^2\sigma_3\right) - \left(m_3^2\det H + \mathrm{h.c.}\right)$$
$$+\alpha_1\,\mathrm{Tr}|H|^4 + \alpha_2\left(\mathrm{Tr}|H|^2\right)^2 + \alpha_3\,\mathrm{Tr}\left(|H|^2\sigma_3|H|^2\sigma_3\right)$$
$$+\alpha_4\,\mathrm{Tr}\left(|H|^2\sigma_3|H|^2\right) + \left(\alpha_5\det H^2 + \mathrm{h.c.}\right)$$

$$|H|^2 \equiv H^\dagger H$$