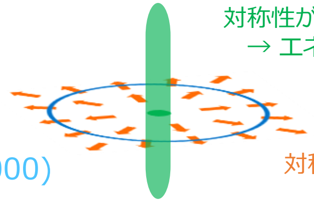
超対称$SU(N)\times U(1)$ゲージ理論における非位相的宇宙ひもとその安定性

(based on [2205.12638], [2209.XXXXX])　神田行宏 (名大)　共同研究者：前川展祐(名大)

1. Introduction & Motivation



宇宙ひも：相転移での(偽)真空として生じる
線状のエネルギー励起領域
Kibble (1976), Vilenkin, Shellard (2000)

- **位相的宇宙ひも** (ex. Nielsen-Olesen string　Nielsen, Olesen (1973))
  真空空間の位相的性質により、安定性が保証
  対称性の破れ方から生成されるかどうかが分かる
- **非位相的宇宙ひも** (ex. Z-string　Nambu (1977), Vachaspati (1992))
  安定性が模型のパラメータ値に依存　← 数値的にcheck

近年、**「宇宙ひも由来の重力波の観測 → 過去の相転移の検証」**が注目
→ BSMが予言する位相的宇宙ひも由来の重力波の研究が盛んに
Buchmuller, Domcke, Murayama, Schmitz (2020), Lazarides, Maji, Shafi (2021)
→ 非位相的宇宙ひもは電弱相転移の形での安定性の研究がほとんど
Holman, Hsu, Vachaspati, Watkins (1992), Earnshaw, James (1993)

➡ **他の対称性の破れにおける非位相的宇宙ひもの安定性？**
$SU(N)\times U(1)\to SU(N-1)\times U(1)$, SUSYの拡張

2. Z-string and its stability

$SU(2)\times U(1)\to U(1)$ では位相的宇宙ひも×

Z-string

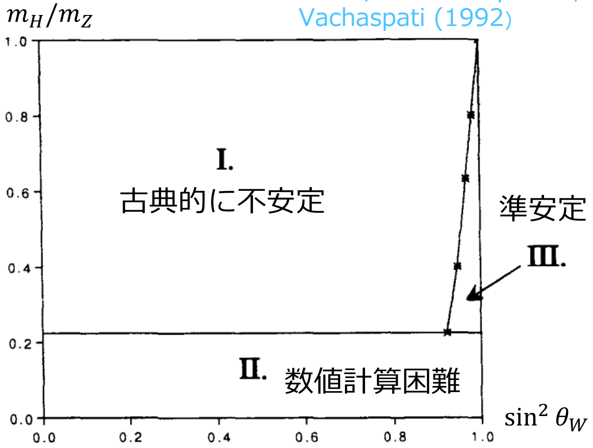
$$H=\begin{pmatrix}0\\ \phi_{NO}(r,\theta)\end{pmatrix},\ \vec{Z}=V_{NO}(r,\theta)\,\vec{e}_\theta$$

(ϕ_{NO},V_{NO}: 部分群 $U(1)\to\times$ のN-O string)

$$\boxed{\frac{m_H}{m_Z}\le 1,\quad \cos^2\theta_W<0.1}$$

2パラメータで安定性を評価

James, Perivolaropoulos, Vachaspati (1992)



3. Results

3.1. $SU(N)\times U(1)\to SU(N-1)\times U(1)$

G_μ^a, B_μ: $SU(N),U(1)$ gauge bosons
g_N,g_1: $SU(N),U(1)$ gauge couplings

$$SU(N)\times U(1)\xrightarrow{H:\left(\boldsymbol{N},\frac{1}{2}\right)} SU(N-1)\times U(1)$$

Higgs potential $V(H)=\lambda\left(H^\dagger H-v^2\right)^2$

String solution

$$H=\begin{pmatrix}0\\ \vdots\\ 0\\ f(r)ve^{i\theta}\end{pmatrix},\quad \vec{Z}\equiv-\sqrt{\frac{2(N-1)}{N}}\frac{g_N}{\alpha_N}\vec{G}^{N^2-1}+\frac{g_1}{\alpha_N}\vec{B}=-\frac{z(r)}{\alpha_N r}\vec{e}_\theta$$

$$(f(0)=z(0)=0,\ f(\infty)=z(\infty)=1)$$

$$\alpha_N^2\equiv\frac{2(N-1)}{N}g_N^2+g_1^2$$

$$T^{N^2-1}=\frac{1}{\sqrt{2N(N-1)}}\begin{pmatrix}1&&&\\&\ddots&&\\&&1&\\&&&-N+1\end{pmatrix}$$

String solution周りの微小摂動に解を不安定にするものが無いパラメータ領域を計算
① 対称性から摂動を分類 → 系のエネルギーの変分δEに非負の寄与のみをもたらすものを無視
② ①で残る摂動ζで$\delta E=\int\zeta\mathcal{O}\zeta$ → 微分演算子$\mathcal{O}$が負固有値をもつパラメータ領域で解が不安定

➡ パラメータの読み換え$\cos\theta_W=\frac{g_2}{\alpha}\leftrightarrow\frac{g_N}{\alpha_N}$ **でZ-stringの安定領域と一致**

ex. $SU(N+1)\to SU(N)\times U(1)\to SU(N-1)\times U(1)$

Higgs $H:(\boldsymbol{N}+\boldsymbol{1})^k\supset(\boldsymbol{N},1/2)$

$$1-\frac{g_N^2}{\alpha_N^2}>0.9$$

⬅ $k=3$ のとき、$N\ge 3$
$k\ge 4$ のとき、$N\ge 2$

3.2. Supersymmetric extension

Super potential　$W=\lambda S(H_1H_2-v^2)$　($H_1:\left(\boldsymbol{N},\frac{1}{2}\right),H_2:\left(\bar{\boldsymbol{N}},-\frac{1}{2}\right)$ S: gauge singlet)

➡ $$V(h_1,h_2,s)=\lambda^2\left|h_1h_2-v^2\right|^2+\lambda^2|s|^2\left(h_1^\dagger h_1+h_2^\dagger h_2\right)+\frac{g_1^2}{8}\left(h_1^\dagger h_1-h_2^\dagger h_2\right)^2+\frac{g_N^2}{2}\left(h_1^\dagger T^a h_1-h_2^T T^a h_2^*\right)^2$$

D-flatness conditionより
string解で $h_1=h_2^*$

$$\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix}1&-1\\1&1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}h_1\\h_2^*\end{pmatrix}=:\begin{pmatrix}\eta\\ \phi\end{pmatrix}$$

η: Zero VEV mode ← string解の不安定性に影響しない
ϕ: Non-zero VEV mode

$$V(\phi)=\frac{\lambda^2}{4}\left(\phi^\dagger\phi-2v^2\right)^2+\lambda^2|s|^2\phi^\dagger\phi$$

➡ **Non SUSY 1 Higgsと同様に安定性の評価が可能**