

Gauge Symmetry Breaking in a D-brane model

首都大学東京 小林秀太郎

E-mail: kobayashi-shutaro@ed.tmu.ac.jp

string phenomenology を考える際に重要になる一つの要素としてゲージ対称性の破れがあげられる。このゲージ対称性の破れを引き起こす D-brane 模型として、超対称性を持っていない物理系を考えるのは有用である。その一つとして、 C^3/Z_3 オービフォルド上の D3-D7 brane 系があげられる。超対称性が存在しない物理系での非自明な結果の一つとして、例えば、開弦の 1 ループ量子補正がある。加えて、 Z_3 で割っていることから生じる、twisted closed string の効果も存在する。この twisted closed string は、 Z_3 singularity を滑らかにすると考えられている。これら非自明な効果により、どのようにゲージ対称性の破れが生じ、その結果として生じる幾何学的な構造について議論する。

本研究では、超対称性を持たない D-brane 系を具体的に構築をして、その背後にある幾何学的な描像との比較をした。最終的には、背後にある物理的な立場としては、TeV scale string model についてリアリティな模型を構築することである¹。用いた道具は、ストリングの world-sheet 上の理論である。

最初の段階として、なるべく簡単な物理系を用いて、構造を理解することが重要である。そこで、今回用いた物理系としては、オービフォルド C^3/Z_3 の特異点の上に、四枚の D3-brane と三枚の anti-D7-brane を置く。この模型は、Ramond-Ramond tadpole は生じない模型の一つである [2]。ここで、 C^3 は $\mu = 4, \dots, 9$ を複素化したもので、具体的には

$$Z^1 = \frac{1}{\sqrt{2}}(X^4 + iX^5), Z^2 = \frac{1}{\sqrt{2}}(X^6 + iX^7), Z^3 = \frac{1}{\sqrt{2}}(X^8 + iX^9)$$

である。また、D3-brane の座標としては $\mu = 0, 1, 2, 3$ とし、anti-D7-brane は $\mu = 0, 1, \dots, 7$ とおく。この模型は、 Z_3 で割らなければ、 $U(4) \times U(3)$ のゲージ理論を有効理論 (D3-brane 上のゲージ理論) として記述している。また、物質場は $U(4)$ ゲージ群の随伴表現、 $(4, \bar{3}), (\bar{4}, 3)$ に属しているものがある。ここで、ストリング理論の立場では、随伴表現に属している物質場は両端が D3-brane 上に固定された開弦の (D3-brane からみて) transverse 方向の振動モードから作られる。以下、これを 33-sector と呼ぶ。また、 $(4, \bar{3}), (\bar{4}, 3)$ に属する物質場は、片側は D3-brane に固定され、もう片方は anti-D7-brane に固定された開弦から得られる。以下、これを 37-sector と呼ぶ。これを Z_3 で割る。するとゲージ対称性は $U(2) \times U(1) \times U(1) \times U(3)$ となる。また物質場は、随伴表現に属していたものは

$$A_i^{(1)} = (2, 0, -1; 1), A_i^{(2)} = (\bar{2}, 1, 0; 1), A_i^{(3)} = (1, -1, 1; 1)$$

に属するスカラー場になり、 $(4, \bar{3}), (\bar{4}, 3)$ に属していた物質場は

$$\phi_1^{(37)} = (2, 0, 0; \bar{3}), \phi_2^{(37)} = (\bar{2}, 0, 0; 3)$$

¹実際には、TeV scale string model を記述するには、余剰次元方向に対して、large volume compactification をしなければならない [1]。しかし、本研究では最初のステップとして、そのコンパクト化はせずに議論を進めていく

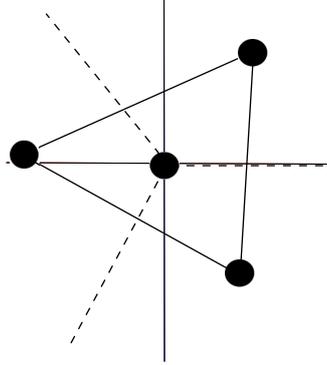


Figure 1: A configuration of D3-branes corresponding to the flat direction.

に属するスカラー場となる²。但し、 $i = 1, 2, 3$ は C^3 の座標を表している。

これらスカラー場についてのポテンシャルは、対称性とストリング理論での計算により、33-sector のみのポテンシャル V_{33} と、33-sector と 37-sector の相互作用を記述するポテンシャル V_{mix} と、37-sector のみのポテンシャル V_{37} を書き下すことができる。特に、ポテンシャル V_{33} と V_{37} のパラメーターとしてはゲージ結合定数 g だけで書くことができる。しかし、 V_{37} のパラメーターはコンパクト化の仕方により異なるので、ここでは anti-D7-brane は C^3 の原点で安定であるような形をしていると仮定する。

本研究では、コンパクト化などに依存しないポテンシャル V_{33} に焦点をあてる。具体的には、ポテンシャルの stationary point を具体的に求めて、そこから D3-brane の幾何学的な様子について考察をする。特に、今回のモデルでは、非自明な効果として、 Z_3 で割っていることにより生じる twisted closed string の効果や、超対称性がないことにより生じる開弦の 1 ループの効果がある。これらは、各々、 V_{33} に対しては、Fayet-Iliopoulos(FI) 項や $A^{(a)}$ 場の質量項への補正になる。以下では、真空期待値 (VEV) として、 $A_{i=1,2} = 0$ とし、 $A_3^{(a)}$ を $A^{(a)}$ と書く。

まずは、何にも補正がない場合のポテンシャルの stationary point について評価すると、

$$A^{(1)} = \begin{pmatrix} a \\ 0 \end{pmatrix}, A^{(2)} = \begin{pmatrix} a \\ 0 \end{pmatrix}, A^{(3)} = a \quad (1)$$

が VEV として存在する。これは、flat direction である³。これは、ゲージ対称性としては、 $U(2) \times U(1) \times U(1)$ から $U(1) \times U(1)$ へ破れることになる。Fig.1 に、この幾何学的な配位についての解釈を記述する。即ち、四枚の D3-brane の内、一枚は特異点の上であり、残りの三枚は Z_3 対称性を保つように特異点から離れて配位することになると考えられる。

² Z_3 のプロジェクションの方法は [2] を見よ。

³今は、anti-D7-brane や twisted closed string の補正を考えていないのと同じである。即ち、 $\mathcal{N} = 1$ の超対称性がある理論を考えていることになる。

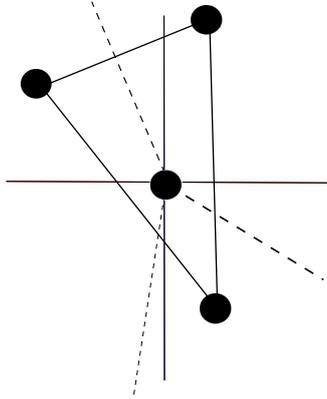


Figure 2: A configuration of D3-branes corresponding with twisted closed moduli fields.

次に、twisted closed string の補正の効果を導入した場合の stationary point について評価すると、(1) と異なり、

$$A^{(1)} = \begin{pmatrix} a \\ 0 \end{pmatrix}, A^{(2)} = \begin{pmatrix} b \\ 0 \end{pmatrix}, A^{(3)} = c \quad (2)$$

のかたちになる。Fig.2 に、この幾何学的な配位についての解釈を記述する。即ち、特異点から離れて配置していた三枚の D3-brane は、 Z_3 対称性を破ったかたちで配位する。これは、twisted closed string が、大局的な立場で見ると、オービフォルドの特異点を滑らかにするので、それを (2) は反映していると考えられる。因みに、ゲージ対称性は $U(1) \times U(1)$ へ破れている。

最後に、開弦の 1 ループ補正の効果を導入した場合、stationary point を評価すると、(2) のような形の解は許されない。けれども、 $A^{(1)}, A^{(2)}, A^{(3)}$ の内、一つは零となるような解は許される。この解の構造は (1) や (2) とは異なっている。この幾何学的な配位は、今は、完全には把握しきれないで、図で表すことができない。

本研究では、簡単な模型で調査した。今後は、コンパクト化による効果を見てみたり、リアリスティックな模型を作ることができるかが課題としてあげられる。

この研究は、北澤敬章氏 (首都大学東京) との共同研究に基づくものである。

References

- [1] I.Antoniadis, “A possible new dimension at a few TeV”, Phys.Lett. **B246** (1990) 377.
- [2] G.Aldazabal, L.E.Ibanez, F.Quevedo and A.Uranga, “D-branes at singularities: a bottom-up approach to the string embedding of the standard model,” JHEP08(2000)002.