

軌道体上の大統一理論 (Orbifold GUTs) の現状

信州大学理学部 川村嘉春

1 はじめに

現時点で「力は統一的に理解されるのか？」という問いかけに答えるのは難しい。現在、我々が力について理解していることは、「力を媒介する粒子 (量子場) を交換することにより素粒子の間に力が作用する」ことである。よって、力を統一的に理解するとは、力を媒介する粒子を統一的に扱う理論を構築することである。基本的な粒子に働く基本的な力をして4つの力 (強い力、弱い力、電磁気力および重力) が知られていて、すべてゲージ相互作用として理解されている。我々は、力の統一に関する決定的な確証を持ち合わせていないが、状況証拠として (1) 自然界は根本的に単純であって欲しいという願望 (2) 4つの力はゲージ相互作用として、互いに似通っているという特徴 (3) 量子力学的異常項の相殺や電荷の量子化の説明がつかないなどを挙げるができる。

我々が実際に採用している立場は、高エネルギースケールで力の統一が起こると仮定して、その理論の構築を試み、理論の特徴を見出しそれを実験で検証することにより「力の統一」の正当性を示すことである。

以下、大統一理論の特徴と問題点を復習した後、軌道体上の大統一理論 (Orbifold GUTs) の現状について簡単に報告する。

2 大統一理論の特徴と問題点

大統一理論の一般的な特徴を以下に列挙する。

- (F1) 大統一ゲージ群 G_{GUT} のもとでの重力を除く3つの力の統一
- (F2) G_{GUT} の多重項のもとでの物質の統一
- (F3) X, Y ゲージ粒子やヒッグス超多重項を媒介にした陽子崩壊
- (F4) カラーを持ったヒッグス粒子の存在

上に挙げた特徴は次のような課題や問題点を導く。

- (P1) ゲージ結合定数の統一と実験値との間の整合性の問題
- (P2) 如何なる形で G_{GUT} が壊れるのか？
- (P3) 世代の起源は何か？
- (P4) 物質粒子の質量の階層性や世代間の混合の起源は何か？
- (P5) 陽子の寿命の予言値と観測値 (下限) との整合性の問題
- (P6) 電弱スケールの量子補正のもとでの安定性に関する問題
- (P7) 三重項二重項の質量分離の問題

(P6)はゲージ階層性の問題と呼ばれる問題(の一部)で、一般に大統一スケール M_{GUT} の量子補正が出現して標準理論の安定性を脅かす。三重項二重項の質量分離の問題とは、「ヒッグス超多重項の間の質量の分離の機構は何か？」である。例えば、超対称性を持った模型では以下の条件を満たす必要がある。『 G_{GUT} が壊れた後に、陽子の安定性からカラーを持ったヒッグス超多重項の質量は 10^{16} GeV より重くなる必要がある。一方、電弱対称性の崩壊から電弱ヒッグス超多重項の質量はせいぜい 10^3 GeV 程度より軽くなる必要がある。』

これらの問題点を解決するために、理論を拡張する必要がある。例えば、超対称性を導入することにより、(P6)が解決する。その他の問題を解決するためにゲージ群の拡張やヒッグスセクターの拡張などが試みられ、さまざまな興味あるアイデアが提案されている。

3 軌道体上の大統一理論の現状

現実的な大統一理論の建設に向けて、「時空の構造を拡張することにより自然に三重項二重項の分離が起こる高次元時空上の超対称性大統一理論を構築しよう」という目標を立てることにする。実際にこの目標は余剰空間として適切な軌道体(オービフォルド)を導入することにより達成される。一番単純な構造を持った模型はオービフォルド $S^1/(Z_2 \times Z'_2)$ を持った5次元時空上の超対称性 $SU(5)$ 大統一理論 [1] である。* ここで、空間 $S^1/(Z_2 \times Z'_2)$ とは、オービフォルド S^1/Z_2 をさらに Z'_2 変換による同一視のもとで割った空間で長さ $\pi R/2$ の線分 (R は S^1 の半径) に相当する。線分の両端 $y = 0$ と $y = \pi R/2$ はそれぞれ Z_2 変換 ($y \rightarrow -y$) と Z'_2 変換 ($y' \equiv y + \pi R/2 \rightarrow -y'$) の固定点になっている。この模型の基本的な仮定は、(1) $SU(5)$ のゲージ場に関する超多重項と2種類のヒッグス場に関するハイパー多重項は、5次元時空に住んでいる。このような場は一般に「バルク場」と呼ばれる。(2) 3世代の物質場に関する超多重項は $y = 0$ (Z_2 変換の固定点) 上の4次元時空(我々の世界)内に束縛されている。このような場は一般に「ブレイン場」と呼ばれる。(3) コンパクト空間の大きさ $\pi R/2$ は、大統一スケールの逆数程度である。

この模型の主な特徴を列挙する。

- 多重項の成分が $S^1/(Z_2 \times Z'_2)$ 上で共通の $Z_2 \times Z'_2$ パリティを持たない場合、バルク場のゼロモードは $SU(5)$ の完全な多重項を形成しない。このため、カラーを持ったヒッグス超多重項のゼロモードをなくすような適切な $Z_2 \times Z'_2$ パリティの指定によりヒッグス超多重項に関する三重項二重項の分離が実現される。そして、バルク場のゼロモードとブレイン場を合わせてミニマルな超対称性標準模型の場のみを含む模型をつくるのが可能である。カルーツァ・クラインモードは、 M_{GUT} の質量を持つため低エネルギーの理論には顔を出さない。

* オービフォルドを使った現実的な模型の構築の最初の試みは、超弦理論においてなされた。[2]

- $y = \pi R/2(Z'_2$ 変換の固定点) 上の 4 次元時空以外の 5 次元時空内である特別な形の $SU(5)$ ゲージ対称性が存在する。[3] このため、我々の 4 次元時空の世界で第ゼロ近似でゲージ結合定数の一致が期待される。
- 我々の世界に存在する場合は $SU(5)$ ゲージ対称性のある表現に属するため、電荷の量子化が保証される。

このように従来の超対称性大統一理論の利点を温存したままで「三重項二重項の分離の問題」のないモデルを構築することができる。

最後に、他の問題点 (P1)~(P5) について簡単に言及する。

(P1) カルーツァ・クラインモードによる閾値効果やもう 1 つの 4 次元世界からの寄与を考慮に入れた解析がなされている。[3, 4]

(P2) この問題は「非自明な $Z_2 \times Z'_2$ パリティの起源は何か？」という問題に摩り替わる。

(P3) ゲージ群の拡張によって理解しようとする試みがある。[5]

(P4) 特定の物質場をバルクに住ませることにより理解しようとする試みがなされている。[6, 7]

(P5) X, Y ゲージ粒子のカルーツァ・クラインモードを媒介にした陽子崩壊が、将来観測にかかる可能性が指摘されている。[6, 8]

その他にも余剰次元やゲージ群の拡張による興味深い性質を持ったモデルが数多く提案されているが、紙面の関係上、内容の紹介および文献の引用は割愛する。

参考文献

- [1] Y. Kawamura : Prog. Theor. Phys. **105** (2001) 999.
- [2] L. Dixon, J. Harvey, C. Vafa and E. Witten : Nucl. Phys. **B261** (1985) 651; **B274** (1986) 285.
- [3] L. J. Hall and Y. Nomura : Phys. Rev. **D64** (2001) 055003.
- [4] L. J. Hall and Y. Nomura : hep-ph/0111068.
- [5] K. S. Babu, S. M. Barr and B. Kjae : hep-ph/0202178.
- [6] L. J. Hall and Y. Nomura : hep-ph/0205067.
- [7] A. Hebecker and J. March-Russell : hep-ph/0205143.
- [8] A. Hebecker and J. March-Russell : hep-ph/0204037.