

高次元理論を用いた 物質粒子の統一と質量階層性

後藤 裕平 (信州大)

共同研究者：川村 嘉春 (信州大)

ILC夏の合宿 at 伊香保温泉

Motivation

標準理論はよくできた理論か？

標準理論における未解決の問題

- 重力が含まれていない
- 暗黒物質は何か？
- ニュートリノ質量の説明
- 質量階層性の起源
- 自然さの問題
- 世代の起源

etc...

Motivation

標準理論はよくできた理論か？

標準理論における未解決の問題

- 重力が含まれていない
- 暗黒物質は何か？
- ニュートリノ質量の説明
- **質量階層性の起源**
- 自然さの問題
- **世代の起源**

etc...

Motivation

6次元時空 $M^4 \times (T^2/Z_M)$ ($M=2,3,4,6$) 上での $SU(N)$ ゲージ理論において、世代・フレーバー数の統一の可能性を探求する。



導出した物質粒子を3世代分含むモデルから質量階層性・フレーバー混合が導けるかどうか探求する。

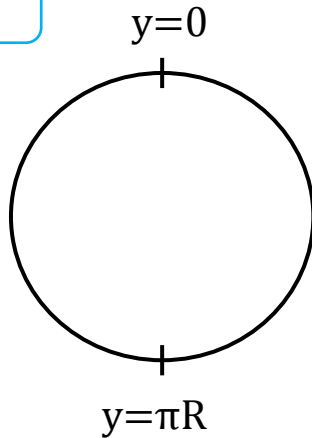
Orbifold

余剰次元 \longrightarrow Orbifold (1次元 : S^2/Z_2 , 2次元 : T^2/Z_M)

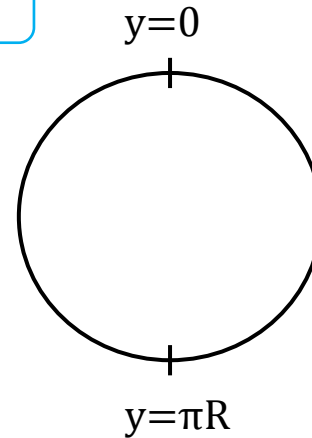
Orbifold

多様体Mを固定点(もしくは固定面)を持つように離散群Hの下で割った商空間M/H

S^1



S^1/Z_2



Z_2 対称性

$$y \sim -y$$

$y=0, \pi R$ で反転

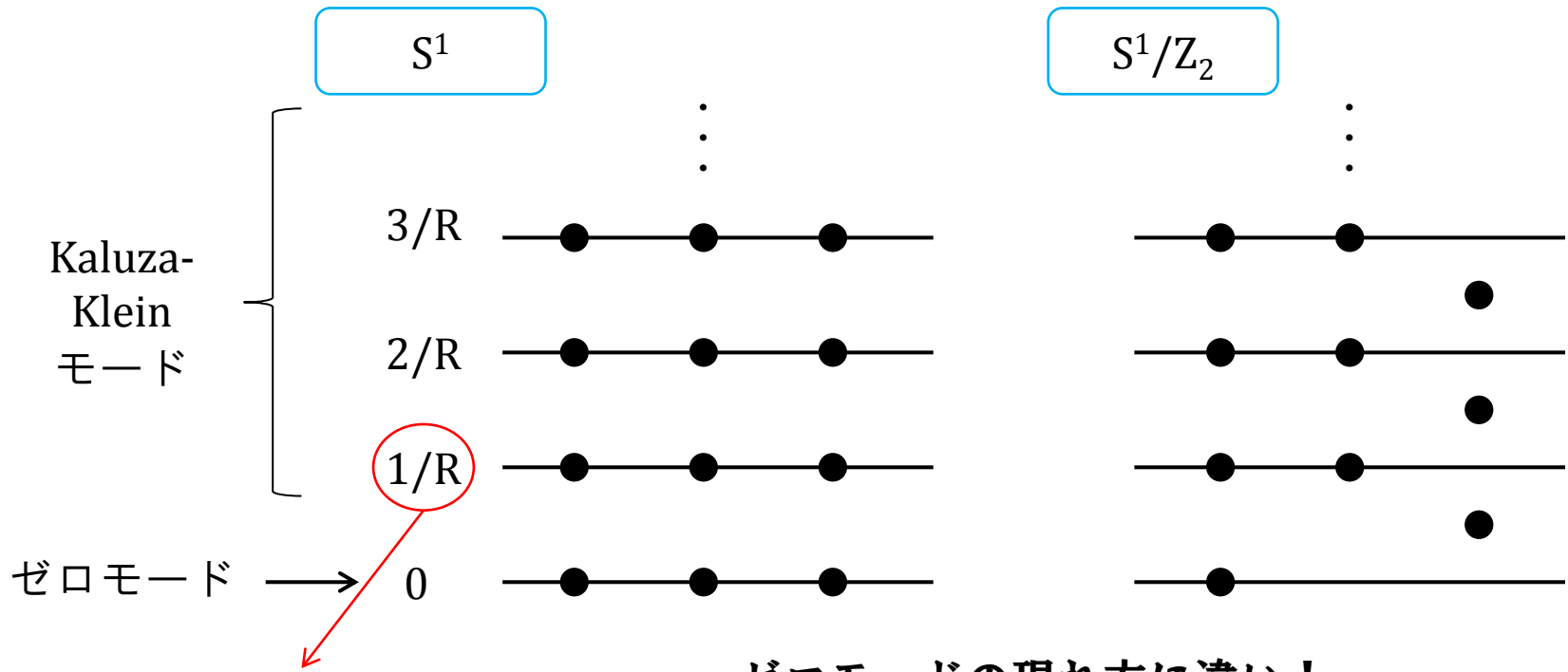
考える領域

$$0 \leq y \leq \pi R$$

固定点を特別視 \longrightarrow 4次元ブレーン世界

Orbifold

余剰次元に基づく対称性の破れから得られる mass spectrum



対称性の破れのスケール

ゼロモードの現れ方に違い！

KKモードは低エネルギーで現れない

余分な粒子を余剰次元による対称性の破れにより排除できる

Orbifold (example)

Doublet-Triplet splitting problem

SU(5) SUSY GUT

$$H_5 = (h_C, h_W) \quad \langle A_{24} \rangle = \begin{pmatrix} 2v & 0 \\ 0 & -3v \end{pmatrix} \quad v \sim 10^{16} \text{GeV}$$

$$W = f_h \bar{H}_5 A_{24} H_5 + \mu_h \bar{H}_5 H_5 + \dots$$



$$M_{h_C} = 2f_h v + \mu_h$$
$$M_{h_W} = -3f_h v + \mu_h$$

$$M_{h_C} \gg 10^{16} \text{GeV} \leftarrow \text{陽子崩壊}$$

$$M_{h_W} \sim 10^2 \text{GeV} \leftarrow \text{電弱対称性の破れ}$$



Fine-tuning of 10^{14}

解決法の一つ : Orbifold GUT

Orbifold (example)

ゼロモードの現れ方

→ 場の境界条件の選び方で決まる

(場の境界条件は行列で表される)

適当な場の境界条件を選ぶ

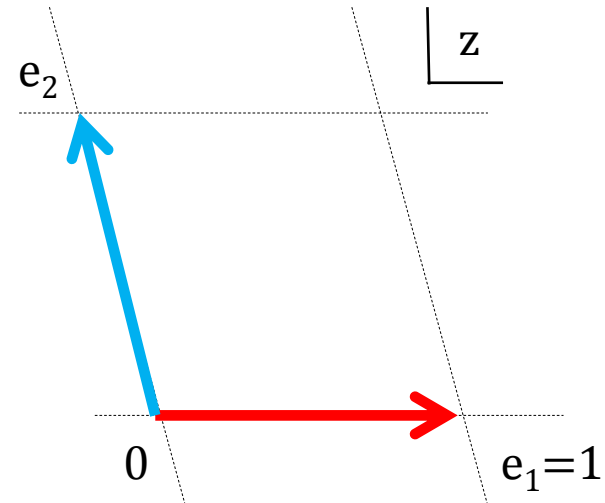
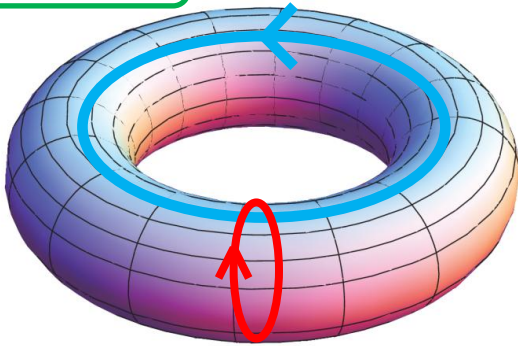
→ h_W のEW成分とSMゲージ粒子のみ
がゼロモードを持つ

余剰次元に基づく対称性の破れにより
DT splitting problem の解決

物質粒子の統一

6次元時空 $M^4 \times (T^2/Z_M)$ ($M=2,3,4,6$) **上でのSU(N)**
ゲージ理論において、世代・フレーバー数
の統一の可能性を探求する。

T^2 : 2次元トーラス



$$Z_M : z \sim \rho z \quad (\rho = e^{2\pi i/M})$$

5次元時空 : Y.Kawamura, T.Kinami and K.Oda, Phys.Rev.**D76**,035001 (2007)

6次元時空 : Y.G, Y.Kawamura and T.Miura, Phys.Rev.**D88**,055016 (2013)

物質粒子の統一

6次元時空上のSU(N)ゲージ群のある反対称表現[N,k]($= {}_N C_k$)に3世代分の物質粒子が含まれる解(モデル)はあるのか？

↓
どのような境界条件を選べば、高次元粒子から物質粒子3世代分に対応するゼロモードが現れるか？

2つのbreaking patternについて考察

$$SU(N) \rightarrow SU(5) \times SU(p_2) \times \cdots \times U(1)^m$$

$$SU(N) \rightarrow SU(3) \times SU(2) \times SU(p_3) \times \cdots \times U(1)^m$$

↓
余剰次元に基づく対称性の破れ

物質粒子の統一

6次元時空上におけるアノマリー相殺

5dimでは, Dirac fermion を定義できない

⇒ 6次元 Dirac fermion が必要

↓ 余剰次元に基づく対称性の破れ

4次元時空上に多くの状態が現れる

適切な場の境界条件を選ぶ

→ 標準模型の物質粒子3世代のみ含まれる

このような境界条件を探す

↓ SU(N)ゲージ群の破れ方が決まる

物質粒子の統一

$$SU(N) \rightarrow SU(5) \times SU(p_2) \times \dots \times SU(p_n) \times U(1)^{n-m+1}$$

$$SU(N) \rightarrow SU(3) \times SU(2) \times SU(p_3) \times \dots \times SU(p_n) \times U(1)^{n-m+1}$$

	T^2/Z_2	T^2/Z_3	T^2/Z_4	T^2/Z_6
$SU(8)$	-	[8,3]:24 [8,4]:12	[8,3]:14 [8,4]:16	[8,3]:28 [8,4]:20
$SU(9)$	[9,3]:192	[9,3]:182 [9,4]:348	[9,3]:142 [9,4]:32	[9,3]:512 [9,4]:800
$SU(10)$	-	[10,3]:852 [10,4]:1308 [10,5]:48	[10,3]:160 [10,4]:92	[10,3]:2484 [10,4]:2654 [10,5]:1532
$SU(11)$	[11,3]:768 [11,4]:768	[11,3]:1608 [11,4]:1716 [11,5]:1794	[11,3]:456 [11,4]:436 [11,5]:186	[11,3]:6530 [11,4]:6768 [11,5]:5540
$SU(12)$	[12,3]:1104	[12,3]:2214 [12,4]:1020	[12,3]:748 [12,4]:676 [12,5]:534 [12,6]:632	[12,3]:17084 [12,4]:13692 [12,5]:10498 [12,6]:13188

	T^2/Z_2	T^2/Z_3	T^2/Z_4	T^2/Z_6
$SU(8)$	-	-	-	-
$SU(9)$	[9,3]:32	-	[9,3]:8	[9,3]:8 [9,4]:32
$SU(10)$	-	-	-	[10,3]:80 [10,4]:108
$SU(11)$	[11,3]:80 [11,4]:80	[11,4]:80	[11,3]:20 [11,4]:20	[11,3]:84 [11,4]:144 [11,5]:156
$SU(12)$	[12,3]:120	[12,3]:80	[12,4]:88 [12,6]:240	[12,3]:392 [12,4]:120 [12,5]:72 [12,6]:552
$SU(13)$	[13,3]:144	-	[13,4]:40	[13,3]:712 [13,4]:88 [13,5]:140 [13,6]:200

表現

模型の数

場の境界条件

6次元Weylフェルミオン ψ_{\pm} の固有 Z_M 要素

の差による。

質量階層性・フレーバー混合

数多くのモデルの中に現象論的に特徴を正しく導くモデルは存在するのか？



導出した物質粒子を3世代分含むモデルから質量階層性が導けるかどうか探求する。

フレーバー対称性をどう扱うか？

解決法：フレーバー対称性を破るスカラー場の導入



Yukawa typeの繰り込み不可能な相互作用を考える

質量階層性・フレーバー混合

繰り込み不可能な相互作用

$$\frac{f}{M} \psi_i \psi_j h \phi^{ij} \longrightarrow \text{フレーバー混合が起こらない}$$
$$\left[\langle \phi^{ij} \rangle = \begin{pmatrix} v_1 & & \\ & v_2 & \\ & & v_3 \end{pmatrix} \right]$$

$$\frac{f}{M^2} \psi_i \psi_j h \phi_1^i \phi_2^j \longrightarrow \text{1世代分のみしか質量を持ってない}$$

(スカラー場のVEVがrank1になってしまう)



$$f \psi_i \psi_j h \left(\frac{\phi^{ij}}{M} + \frac{\phi^i \phi^j}{M^2} \right)$$

質量階層性&フレーバー混合を導ける可能性

質量階層性・フレーバー混合

6次元時空上でローレンツ不変な次元5,6の繰り込み不可能な相互作用

$$\mathcal{L}_{NG}^{(6)} = f_1 \bar{\Psi} \Psi H \left(\frac{\Phi_1}{M} + \frac{\Phi_2 \Phi_3}{M^2} \right) + f_2 \Psi^T \Gamma^1 \Gamma^3 \Gamma^6 \Psi H \left(\frac{\Phi_4}{M} + \frac{\Phi_5 \Phi_6}{M^2} \right) + h.c.$$

Dirac type

Majorana type

余剰次元に基づく対称性の破れ

$\left(\begin{array}{l} \Psi : 6\text{次元Dirac fermion} \\ \Gamma^1, \Gamma^3, \Gamma^6 : 6\text{次元ガンマ行列} \end{array} \right)$

Ψ には,物質粒子3世代分が含まれている

$$\bar{q}_{Li} d_{Rj} h \left(\frac{\phi_1^{ij}}{M} + \frac{\phi_2^i \phi_3^j}{M^2} \right) + h.c., \quad \bar{q}_{Li} u_{Rj} \tilde{h} \left(\frac{\phi_4^{ij}}{M} + \frac{\phi_5^i \phi_6^j}{M^2} \right) + h.c., \quad \bar{l}_{Li} e_{Rj} h \left(\frac{\phi_7^{ij}}{M} + \frac{\phi_8^i \phi_9^j}{M^2} \right) + h.c.$$

$(i, j = 1, 2, 3 : \text{世代の添字})$

スカラー場が真空期待値を持つことによってフレーバー対称性が破れ、世代間で異なる質量を持つ

Summary

- ゼロモードとして現れる粒子が低エネルギーでも現れることができる。
- 余剰次元としてOrbifoldを用いることにより、欲しい粒子以外に大きな質量を与えることができる。
- Orbifoldを用いた余剰次元による対称性の破れを用い、2つのパターンのSU(N)ゲージ群の破れにおいて、それぞれ多くの3世代を導く解(モデル)を導いた。
- 繰り込み不可能な相互作用において、新しく導入したスカラー粒子が真空期待値を持つことにより、フレーバー対称性の破れを引き起こし、物質粒子の質量階層性、フレーバー混合を導く。

課題

- 新しく導入したスカラー場に関するスカラーポテンシャルから、欲しい真空期待値が得られるのか。(fine tuningが必要?)
- フレーバー対称性の破れのスケールは？