

Dilaton stabilization in heterotic string models

桑木野 省吾 (京産大益川塾)

共同研究者 : 小林達夫 (北海道大学)
Florian Beye (名古屋大学)

arXiv:1304.5621, arXiv:1311.4687と最近の研究に基づく

Plan

- 1.Introduction
- 2.ヘテロ弦のコンパクト化
- 3.3世代模型
- 4.ディラトン安定化
- 5.Conclusion

Introduction

- 超弦理論と標準模型

- ・ 弦理論のコンパクト化で以下のすべての(超対称)標準模型の性質を
すべて再現すべき

- 4次元
- N=1超対称性
- 標準模型群($SU(3) \times SU(2) \times U(1)$)
- 3世代クォーク・レプトン、ヒッグス
- エキゾチック粒子を含まない
- ゲージ結合定数
- 粒子の質量や混合行列(湯川結合定数)
- 陽子の安定性
- Rパリティ
- Doublet-triplet splitting,
....

Introduction

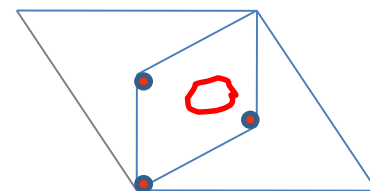
- 超弦理論のコンパクト化 10次元→4次元

オービフォルド, Calabi-Yau, 交差D-brane, Magnetized D-brane, F理論, M理論, ...

- オービフォルドコンパクト化

利点:

- カイラルな理論になる
- 3世代模型が作りやすい



- オービフォルド模型でのMSSMサーチ:
2004年ごろから盛んに研究がなされており
重要な進展があった

- 3世代クォーク・レプトン、ヒッグス
- エキゾチック粒子がない
- 陽子の安定性
- R/パリティ
- トップ湯川
- Doublet-triplet splitting

....

Kobayashi, Raby, Zhang '04
Buchmuller, Hamaguchi, Lebedev, Ratz '06
Lebedev, Nilles, Raby, Ramos-Sanchez, Ratz,
Vaudrevange, Wingerter '07

.....

しかし、すべての湯川行列を再現すること、
モジュライの安定化の問題を解くにはまだ
困難がある

→ 拡張した枠組みを考えたい

Introduction

- モジュライ安定化の問題

- ・ コンパクト化した超弦理論に含まれるモジュライ場は余剰次元の
サイズ・形に対応する
- ・ モジュライ場のVEVは、有効理論の結合定数に関連する
 - ゲージ結合定数
 - 湯川結合定数
- ・ モジュライ場のVEVが適当なところに安定化していないと現実的にならない
→ モジュライ安定化の問題

ディラトンのVEV → ゲージ結合定数 $\langle S \rangle = \frac{1}{g^2} \sim 2$

- ・ すべてのモジュライ場を安定化するポテンシャルが作れるかが問題

Introduction

- タイプII型弦模型 (KKLTシナリオ)
 - ・開弦 + 閉弦 + Dブレーン
 - ・フラックスを入れることが可能 → 一部のモジュライ場を安定化できる
 - ・非摂動的効果 → 残りのモジュライ場を安定化できる
 - ・SUSY breakingの効果 → 小さな宇宙項
- ヘテロ型弦模型
 - ・閉弦のみ
 - ・非摂動的効果でポテンシャルを作る必要がある
 - ・すべてのモジュライ場を安定化することは非常に難しい

Introduction

- 何が原因か？

- ・ゲージ群のランクが決まっている

ランクは16: $E_8 \times E_8, SO(32)$

(一方Dブレーン模型ではランクに制限はない: $U(N_1) \times U(N_2) \times U(N_3) \times \dots$)

--非摂動効果が必要だがhiddenセクターが小さい

- ・モジュライの数が多い

- 解決案

- ・ゲージ群のランクを上げる → エンハンス点

- ・モジュライを少なくする → 非幾何的コンパクト化

⇒ 非対称オービフォルドコンパクト化

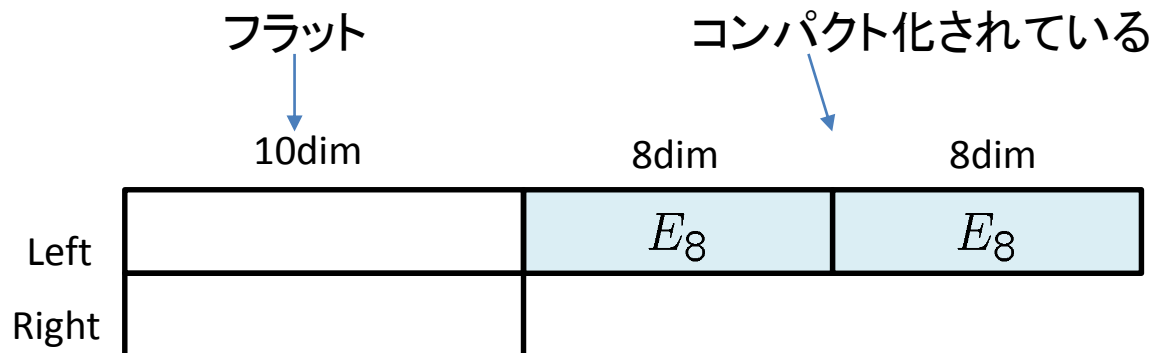
今回の発表: 具体例な3世代模型を構成し、モジュライ安定化を議論する

ヘテロ弦のコンパクト化

ヘテロ型超弦理論

- ヘテロ型超弦理論

- 模型作りの出発点として、ヘテロ型超弦理論を使う
- 自由度
 - 左向きのボソン: 26次元
 - 右向きのボソン・フェルミオン: 10次元
- 10次元時空はフラット
- 余剰16次元部分はコンパクト化されており運動量格子で記述される
- モジュラー不変性 → $E_8 \times E_8$ もしくは $SO(32)$



オービフォールドコンパクト化

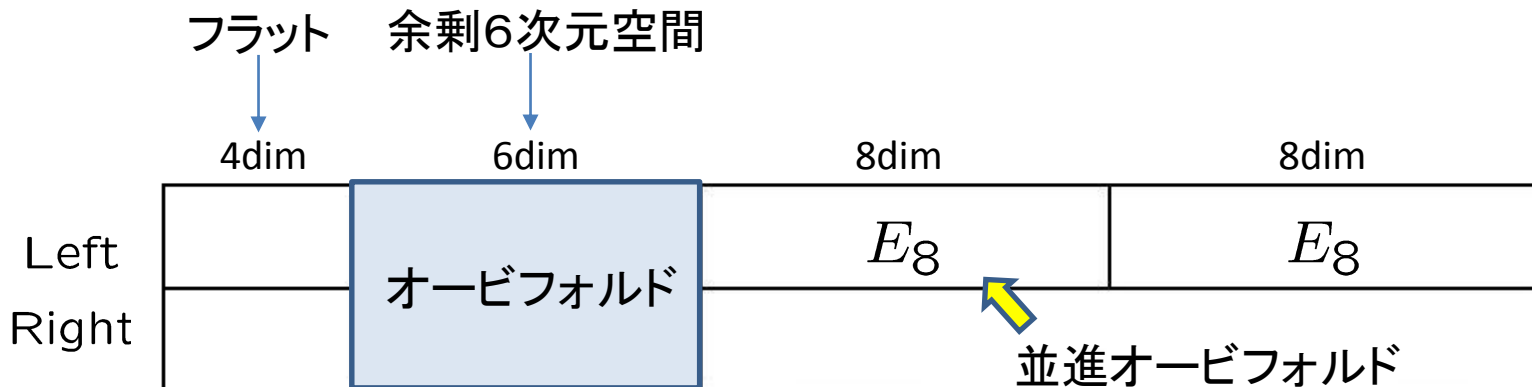
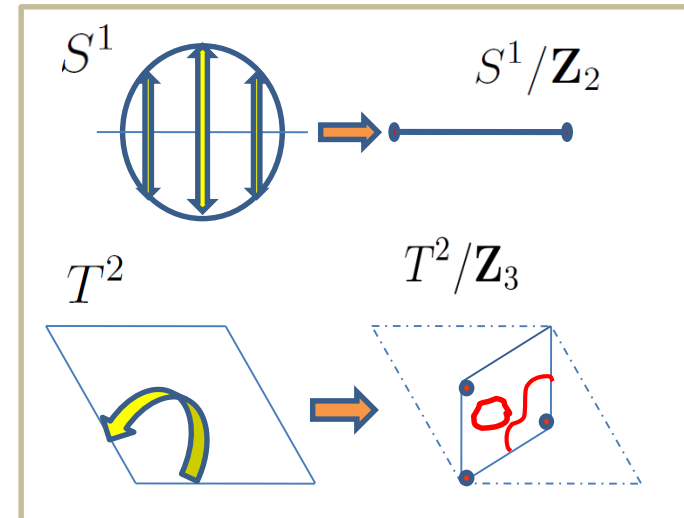
- オービフォールドコンパクト化

- 4次元時空はフラット
- 余剰6次元部分をオービフォールドと仮定する
- オービフォールド=トーラス / 離散対称性
- オービフォールド上の弦を量子化する
- 無矛盾性 → ゲージ群が壊れる

$$E_8 \times E_8 \rightarrow E_6 \times SU(3) \times E_8$$

- 標準模型の持つカイラルな構造などが出しやすい
- ゲージ群のランクは16のまま

→ 今回はゲージ群を大きくしたいので違う方法を考える



エンハンス点

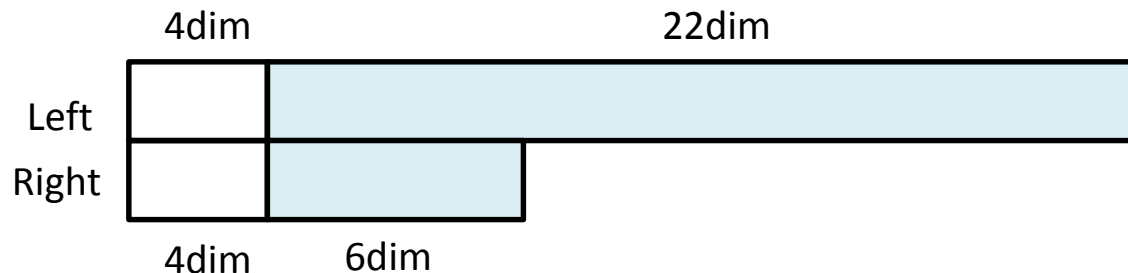
- ナライン格子

- ゲージ群をエンハンスさせたい
- 6次元をトーラスコンパクト化して、モジュライの値をエンハンス点にもっていく
 - 左向き : 22次元
 - 右向き : 6次元
- ゲージ群のランクが**最大22**までエンハンスする
- 左右の運動量 (p_L, p_R) が量子化され、運動量格子にのる。運動量格子は群論で記述される (A_n, D_n, E_6, E_7, E_8)。(計量、B場、ウィルソンラインでも記述可)
- この時点でSUSYは $N=4$

モード展開

$$X_L = x_L + p_L(\tau + \sigma) + \text{Oscillator}$$

$$X_R = x_R + p_R(\tau - \sigma) + \text{Oscillator}$$



非対称オービフォールドコンパクト化

- 非対称オービフォールドコンパクト化

- ・ ナライン格子は左右非対称 → 左右非対称なオービフォールド作用

左向きオービフォールド作用 θ_L

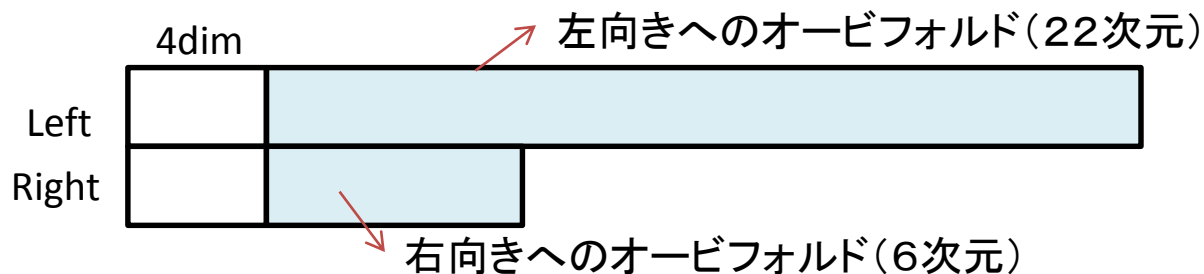
右向きオービフォールド作用 θ_R

オービフォールド作用を左向き、右向きで違う作用をとる
非対称オービフォールド作用

$$\theta_L \neq \theta_R$$

対称の場合

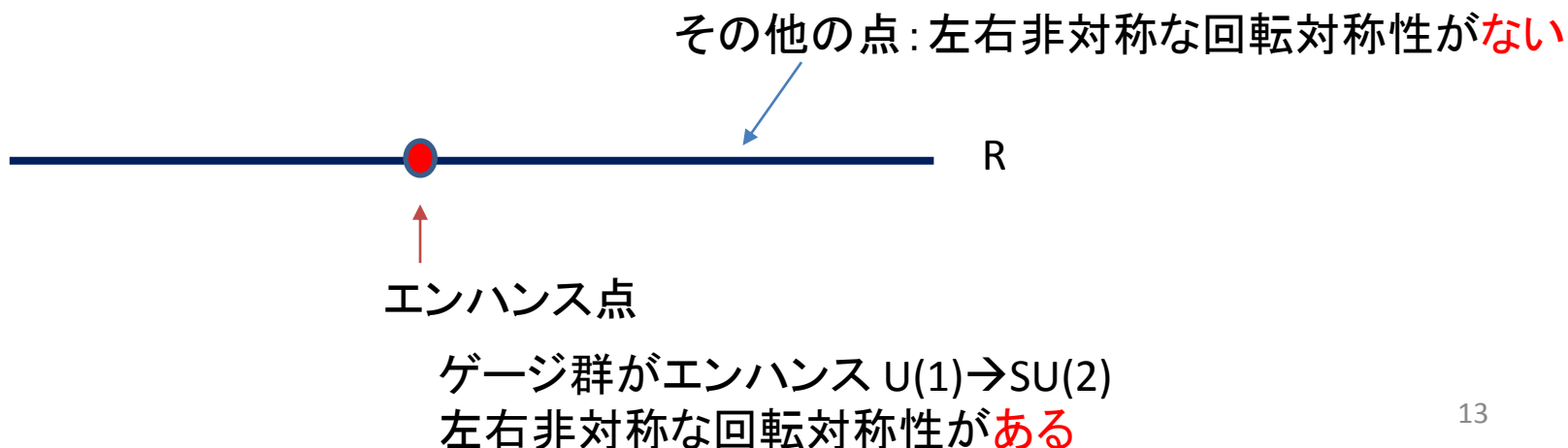
$$\theta_L = \theta_R$$



エンハンス点とモジュライ

- 非対称オービフォールドコンパクト化

- ・モジュライ空間のある点でゲージ群がエンハンス
- ・エンハンス点では左右非対称の回転対称性がある
- ・そこで非対称オービフォールドすると、対応するモジュライ場が
フリーズする
- ・幾何的なモジュライはない → ミニマムなものでディラトンのみを持つ模型

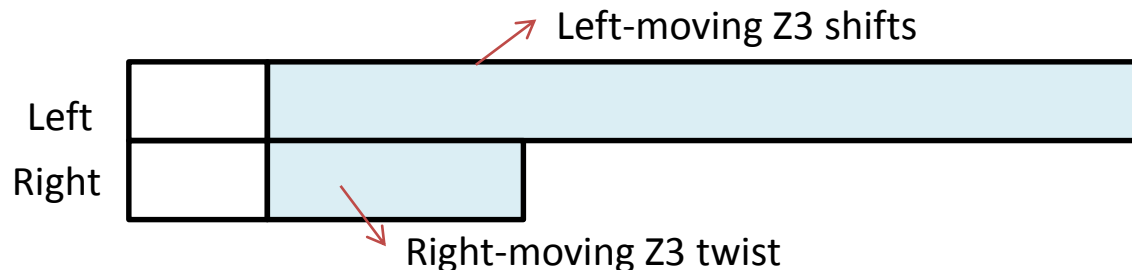


Z3 非対称オービフォールド

非対称オービフォールドコンパクト化 = ナライン格子 $\Gamma_{22,6}$ 上のヘテロ型弦理論
+ 非対称オービフォールド作用

Z3非対称オービフォールド

- (22,6)次元ナライン格子 $\Gamma_{22,6}$ で、右向きに $\overline{E}_6$ もしくは $\overline{A}_2^3$ 格子を持つもの
(Z3の回転対称性がある)
- Z3 shift action $V = (V_L, 0)$
- Z3 twist action (N=4 SUSY $\rightarrow$ N=1 SUSY)
- モジュラー不変性: $\frac{3V_L^2}{2} \in \mathbb{Z}$



格子とゲージ群のパターン

- 出発点 → ナライン格子

対称オービフォルド

非対称オービフォルド

格子

$E_8 \times E_8, SO(32)$

どの(22,6)次元ナライン格子が
出発点として可能か？

ゲージ群のパターン

Classified

どういうタイプのゲージ群が出るか？

10dim

8dim

8dim

4dim

22dim

Left

Left

Right

Right

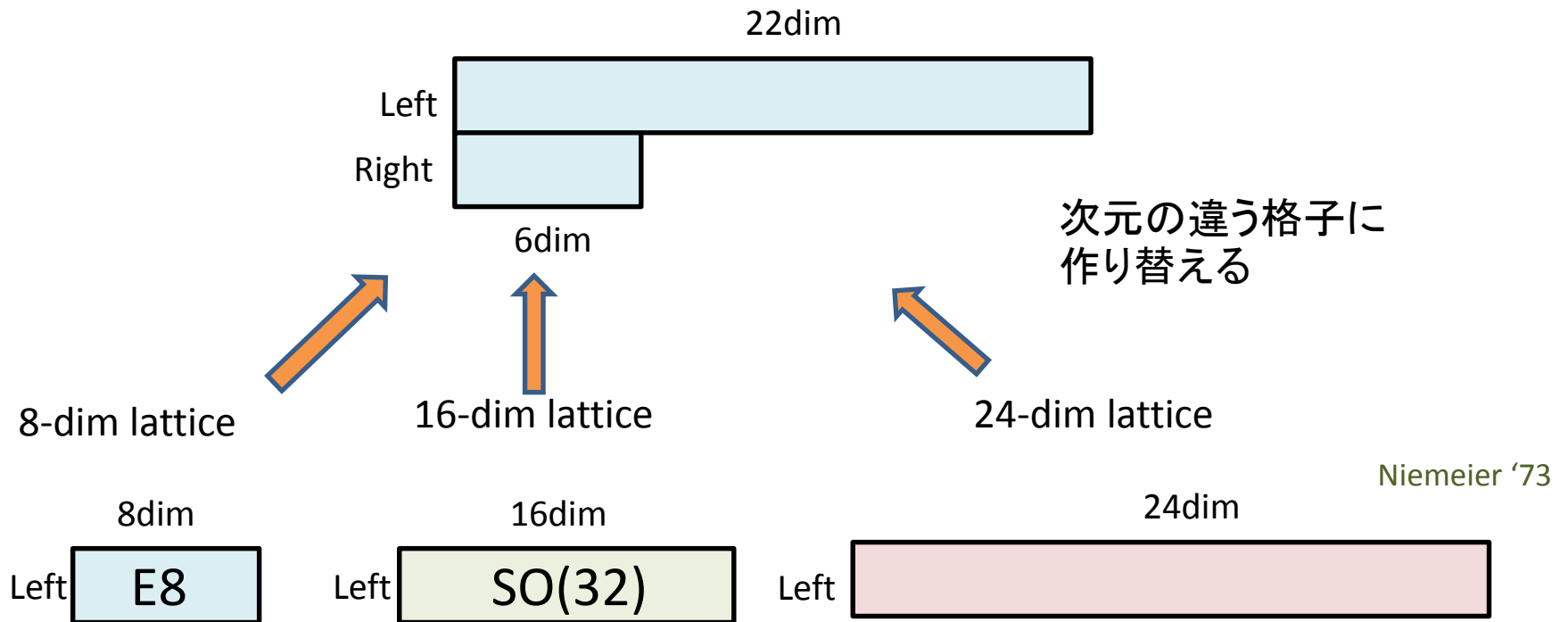
No.	Gauge Group	Z ₃	Z ₄	Z ₆	Z ₇	Z ₈	Z ₁₂	No.	Gauge Group
0	E_8	*	*	*	*	*	*	26	$SU_6 \times SU_3 \times U_1$
1	$E_7 \times SU_2$	AS	AS			AS	AS	27	$SU_6 \times SU_2^2 \times U_1$
2	$E_7 \times U_1$	AS	AS	AS	S	AS	AS	28	$SU_6 \times SU_2 \times U_1^2$
3	$E_6 \times SU_3$	AS		AS		AS	AS	29	$SU_6 \times U_1^3$
4	$E_6 \times SU_2 \times U_1$		AS	S	S	AS	AS	30	$SU_5 \times SU_4 \times U_1$
5	$E_6 \times U_1^2$		AS	S		S	AS	31	$SU_5 \times SU_3 \times SU_2 \times U_1$
6	SO_{16}		AS	AS		AS	AS	32	$SU_5 \times SU_3 \times U_1^2$
7	$SO_{16} \times U_1$	AS	AS	AS	S	AS	AS	33	$SU_5 \times SU_2^2 \times U_1^2$
8						S	AS	34	$SU_5 \times SU_2 \times U_1^2$
9						S	AS	35	SU_4
10						S	AS	36	$SU_4^2 \times SU_2 \times U_1$
11						S		37	$SU_4^2 \times U_1^2$
12	$SO_{10} \times SU_2^2 \times U_1$			AS		S	AS	38	$SU_4 \times SU_3 \times SU_2^2 \times U_1$
13	$SO_{10} \times SU_2 \times U_1^2$			AS	S	S	AS	39	$SU_4 \times SU_3 \times SU_2 \times U_1^2$
14	$SO_{10} \times U_1^3$					AS	S	40	$SU_4 \times SU_3 \times U_1^3$
15	$SO_8 \times SU_4 \times U_1$			AS		AS	AS	41	$SU_4 \times SU_2^2 \times U_1^2$
16	$SO_8 \times SU_2 \times U_1^2$			AS		AS	AS	42	$SU_4 \times SU_2^2 \times U_1^3$
17	$SO_8 \times SU_2^2 \times U_1^2$					AS	AS	43	$SU_4 \times SU_2 \times U_1^4$
									$SU_2 \times U_1$
									$S^2 \times U_1^2$
									$SU_2^2 \times U_1$
									$SU_3 \times U_1^3$
22	$SU_6 \times U_1$	AS	AS	S	S	AS	AS	48	$SU_3 \times SU_2 \times U_1^2$
23	$SU_7 \times SU_2 \times U_1$		S	S	S	S		49	$SU_3 \times SU_2^2 \times U_1$
24	$SU_7 \times U_1^2$		AS	S	S	S	AS		Total # of A
25	$SU_6 \times SU_3 \times SU_2$		AS			AS			Total # of S

Gauge groups realized by the shift (automorphism) of E_8 lattice are denoted by A



Lattice Engineering Technique

- 8, 16, 24次元格子から、(22,6)次元ナライン格子を作る (lattice engineering technique)



24 types of lattices

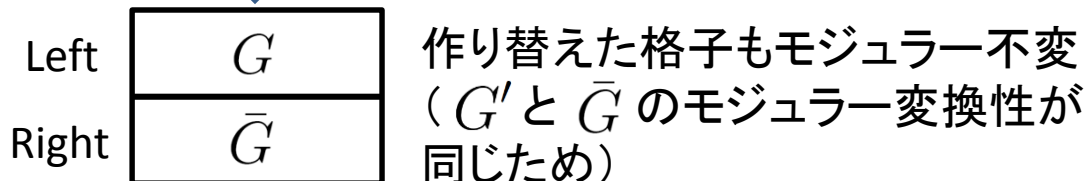
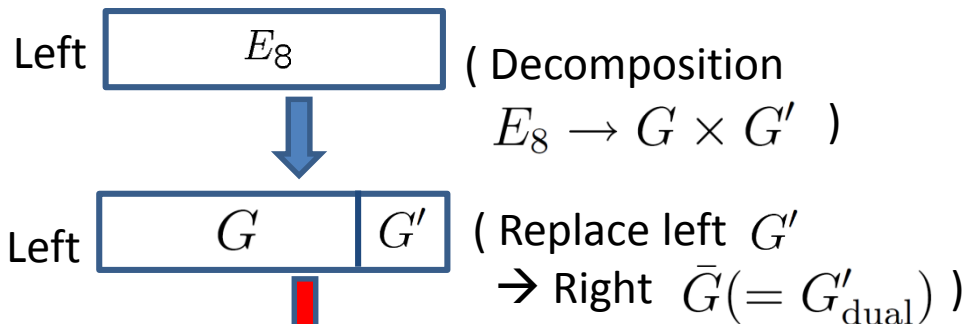
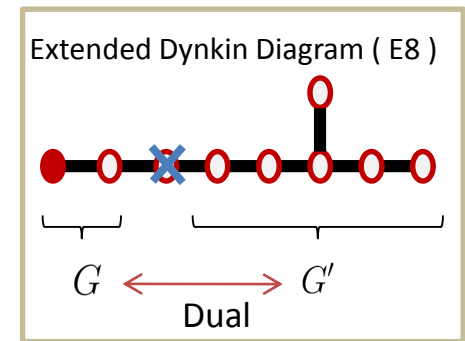
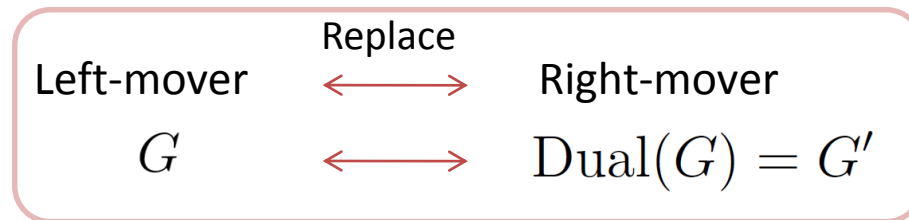
$D_{24}, D_{16} \times E_8, E_8^3, A_{24}, D_{12}^2,$
 $A_{17} \times E_7, D_{10} \times E_7^2, A_{15} \times D_9, D_8^3,$
 $A_{12}^2, A_{11} \times D_7 \times E_6, E_6^4, A_9^2 \times D_6, D_6^4, A_8^3,$
 $A_7^2 \times D_5^2, A_6^4, A_5^4 \times D_4, D_4^6, A_4^6, A_3^8, A_2^{12}, A_1^{24}.$

Lattice Engineering Technique

● Lattice engineering technique

Lerche, Schellekens, Warner '88

- あるナライン格子を他のナライン格子に作り替える方法
- 左向きの格子の一部分を右向きに置き換えることができる

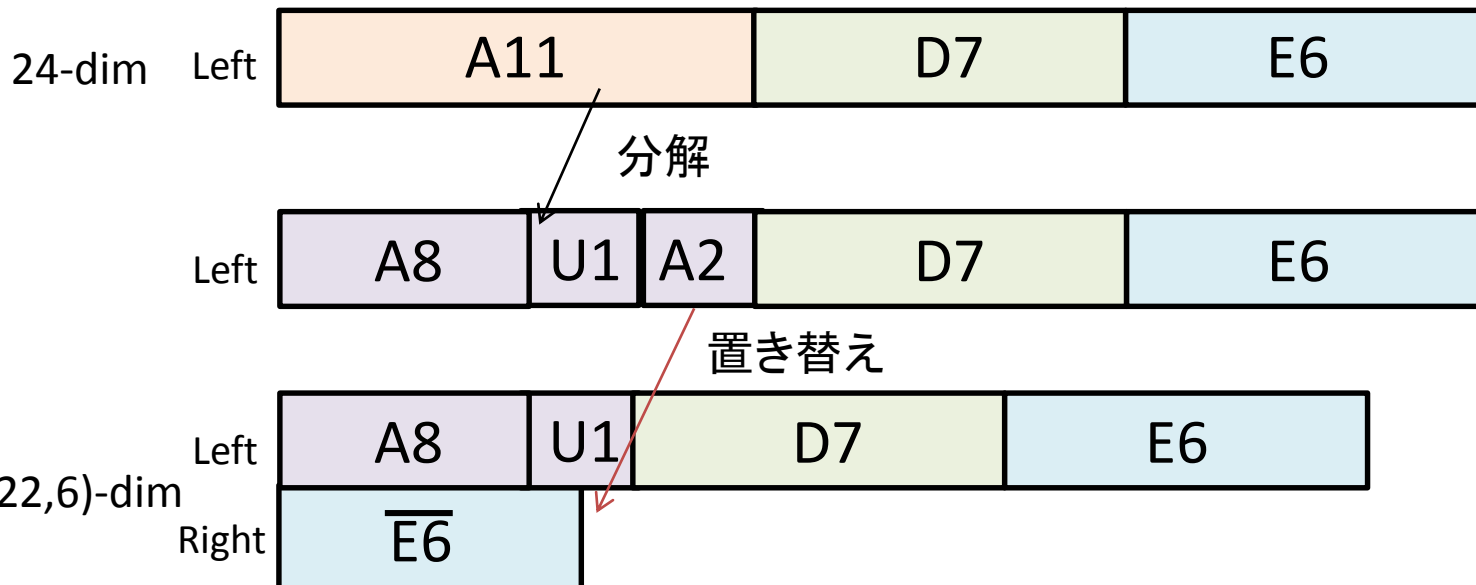


G_L	c_L	$\bar{G}_R$	c_R
E_6	(1)	$\bar{A}_2$	(1)
D_4	(v) (s)	$\bar{D}_4$	(v) (s)
A_2	(1)	$\bar{E}_6$	(1)
A_2^2	(1, 0) (1, 2)	$\bar{A}_2^2$	(1, 2) (2, 0)
$U(1)^2$	(1/3, 1/2) (1/4, 1/4)	$\bar{D}_4 \times \bar{A}_2$	(s , 1) (c , 0)

Lattice Engineering Technique

例: $A_{11} \times D_7 \times E_6$ 24次元格子

ゲージ群: $SU(12) \times SO(14) \times E_6$



$D_7 \times E_6 \times A_8 \times U(1) \times \overline{E}_6$ (22,6)次元格子

ゲージ群: $SO(14) \times E_6 \times SU(9) \times U(1)$

Z3作用でのゲージ群の破れ

● Z3 非対称オービフォールド

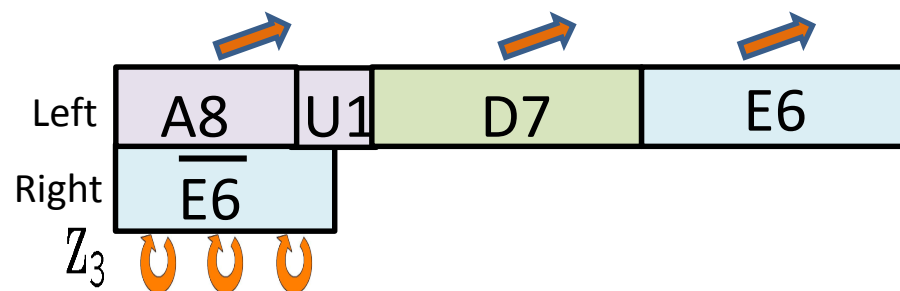
Z3 作用 :

右向き → twist action → N=1 SUSY

左向き → shift action → Gauge symmetry breaking

・SO(14) x E6 x SU(9) x U(1) ゲージ群が壊れる

・SM 群, Flipped SO(10)xU(1),
Flipped SU(5)xU(1), Trinification SU(3)³
などが可能



Group	Group breaking patterns	Group breaking patterns
Shift	(0, 0, 0, 0, 0)	(s, 1, 1, 1/36, 0)
D_7	D_7 $A_6 \times U(1)$ $D_6 \times U(1)$ $A_1 \times D_5 \times U(1)$ $A_2 \times D_4 \times U(1)$ $A_3^2 \times U(1)$ $A_5 \times U(1)^2$ $A_1^2 \times A_4 \times U(1)$	D_7 $A_6 \times U(1)$ $D_6 \times U(1)$ $A_1 \times D_5 \times U(1)$ $A_2 \times D_4 \times U(1)$ $A_3^2 \times U(1)$ $A_5 \times U(1)^2$ $A_1^2 \times A_4 \times U(1)$
E_6	E_6 $A_5 \times U(1)$ $A_2 \times A_2 \times A_2$ $D_4 \times U(1)^2$ $D_5 \times U(1)$ $A_4 \times A_1 \times U(1)$	$D_5 \times U(1)$ $A_4 \times A_1 \times U(1)$
A_8	A_8 $A_6 \times U(1)^2$ $A_5 \times A_2 \times U(1)$ $A_4 \times A_1^2 \times U(1)^2$ $A_3^2 \times U(1)^2$ $A_2^3 \times U(1)^2$	$A_7 \times U(1)$ $A_6 \times A_1 \times U(1)$ $A_5 \times A_1 \times U(1)^2$ $A_4 \times A_3 \times U(1)$ $A_4 \times A_2 \times U(1)^2$ $A_3 \times A_2 \times A_1 \times U(1)^2$
$U(1)$	$U(1)$	$U(1)$

格子とゲージ群のパターン

- 出発点 → ナライン格子

対称オービフォルド

格子

$E_8 \times E_8, SO(32)$

非対称オービフォルド

90種類のナライン格子

ゲージ群のパターン

No.	Gauge Group	Z_3	Z_4	Z_6	Z_7	Z_8	Z_{12}	No.	Gauge Group
0	E_8	*	*	*	*	*	*	26	$SU_6 \times SU_3 \times U_1$
1	$E_7 \times SU_2$	AS	AS	AS	AS	AS	AS	27	$SU_6 \times SU_2^2 \times U_1$
2	$E_7 \times U_1$	AS	AS	AS	S	AS	AS	28	$SU_6 \times SU_2 \times U_1^2$
3	$E_6 \times SU_3$	AS	AS	AS	AS	AS	AS	29	$SU_6 \times U_1^3$
4	$E_6 \times SU_2 \times U_1$	AS	S	S	AS	AS	AS	30	$SU_5 \times SU_4 \times U_1$
5	$E_6 \times U_1^2$	AS	AS	S	S	AS	AS	31	$SU_5 \times SU_3 \times SU_2 \times U_1$
6	SO_{16}	AS	AS	AS	AS	AS	AS	32	$SU_5 \times SU_3 \times U_1^2$
7	$SO_{14} \times U_1$	AS	AS	AS	S	AS	AS	33	$SU_5 \times SU_2^2 \times U_1^2$
8						S	AS	34	$SU_5 \times SU_2 \times U_1^2$
9						S	AS	35	SU_4
10						S	AS	36	$SU_4^2 \times SU_2 \times U_1$
11						S	AS	37	$SU_4^2 \times U_1^2$
12	$SO_{10} \times SU_2^2 \times U_1$		AS	S	S	AS	AS	38	$SU_4 \times SU_3 \times SU_2^2 \times U_1$
13	$SO_{10} \times SU_2 \times U_1^2$		AS	S	S	AS	AS	39	$SU_4 \times SU_3 \times SU_2 \times U_1^2$
14	$SO_{10} \times U_1^3$				AS	S	AS	40	$SU_4 \times SU_3 \times U_1^3$
15	$SO_9 \times SU_3 \times U_1$		AS	AS	AS	AS	AS	41	$SU_4 \times SU_2^2 \times U_1^2$
16	$SO_9 \times SU_2 \times U_1^2$		AS	AS	AS	AS	AS	42	$SU_4 \times SU_2^2 \times U_1^3$
17	$SO_8 \times SU_2^2 \times U_1^2$				AS	AS	AS	43	$SU_4 \times SU_2 \times U_1^4$

Classified

Classified

10dim

E_8

E_8

4dim

22dim

Left

Right

Gauge groups realized by the shift (automorphism) of E_8 lattice are denoted by A

4dim

6dim

格子とゲージ群のパターン

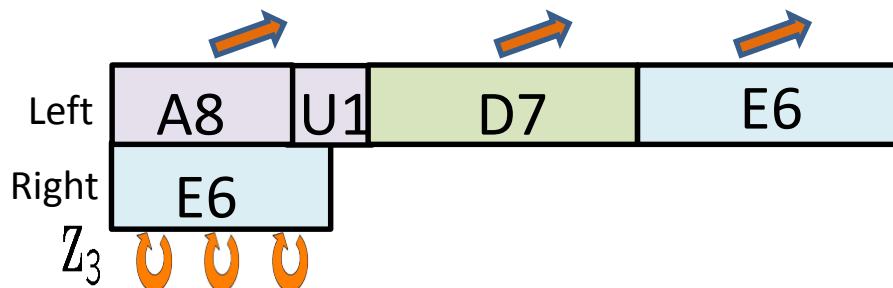
可能なゲージ群のリスト

Group	SM	Flipped $SO(10)$	Flipped $SU(5)$	Pati-Salam	Left-right symmetric
#1		✓	✓		
#2	✓	✓	✓		✓
#3	✓	✓	✓		✓
#4					
#5	✓		✓		
#6	✓	✓	✓	✓	✓
#7	✓	✓	✓		✓
#8	✓		✓	✓	✓
#9	✓	✓	✓	✓	✓
#10	✓	✓	✓	✓	✓
#11	✓	✓	✓	✓	✓
#12	✓	✓	✓	✓	✓
#13	✓	✓	✓	✓	✓
#14	✓		✓	✓	✓
#15	✓	✓	✓	✓	✓
#16	✓	✓	✓	✓	✓
#17	✓	✓	✓	✓	✓
#18	✓	✓	✓		✓

Beye, Kobayashi, Kuwakino (2013)

具体的な模型構築の前に
可能なゲージ群がわかる

↓
模型構築の際の
重要な情報



3世代模型

3世代left-right symmetric模型

Z3非対称オービifoldコンパクト化

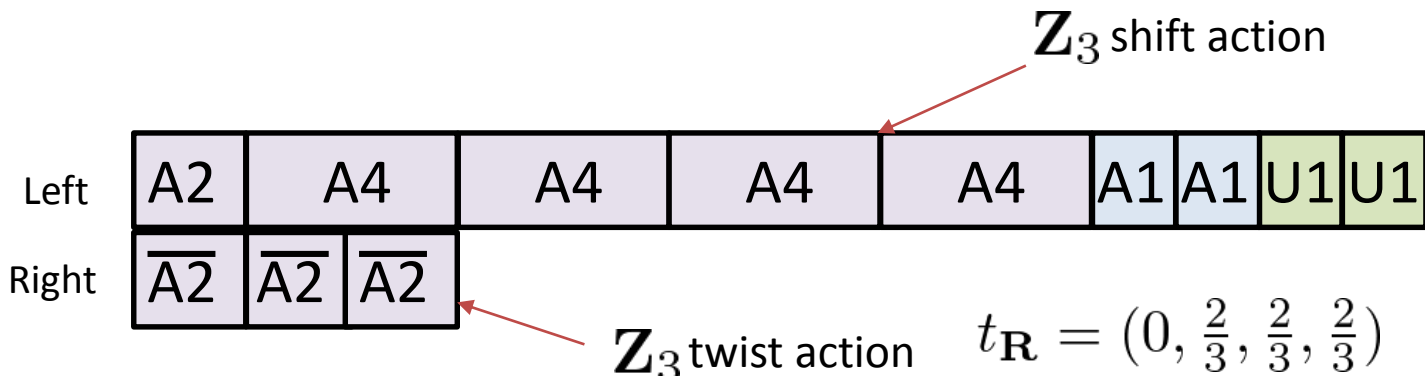
Beye, Kobayashi, Kuwakino(2014)

・ ナライン格子: $A_1^2 \times A_4^4 \times U(1)^2 \times \overline{A}_2^2$ lattice $\oplus A_2 \times \overline{A}_2$ lattice

・ LET: $A_4^6 \xrightarrow{\text{decompose}} (A_2 \times A_1 \times U(1))^2 \times A_4^4 \xrightarrow{\text{replace}} A_1^2 \times A_4^4 \times U(1)^2 \times \overline{A}_2^2$
 $E_8 \xrightarrow{\text{decompose}} E_6 \times A_2 \xrightarrow{\text{replace}} A_2 \times \overline{A}_2$

・ Z3 shift vector: $V = (0, \omega_1^{A_1}, 2\omega_1^{A_4} + \omega_3^{A_4} - 3\alpha_1^{A_4} - 4\alpha_2^{A_4} - 2\alpha_3^{A_4} - \alpha_4^{A_4}, -\omega_1^{A_4} + \alpha_1^{A_4} + \alpha_2^{A_4} + \alpha_3^{A_4} + \alpha_4^{A_4},$
 $-\omega_3^{A_4} - 2\omega_4^{A_4} + 2\alpha_4^{A_4}, \omega_2^{A_4} + 2\omega_4^{A_4} - 2\alpha_3^{A_4} - 2\alpha_4^{A_4}, \frac{\sqrt{30}}{5}, \frac{3\sqrt{30}}{10}, 0, 0, 0, 0)/3$

・ ゲージ群: $SU(5)^4 \times SU(3) \times SU(2)^2 \times U(1)^2 \rightarrow SU(4)^2 \times SU(3)^3 \times SU(2)^3 \times U(1)^7$



3世代left-right symmetric模型

マスレススペクトル($SU(3)_C \times SU(2)_L \times SU(2)_R \times SU(2)_F \times SU(3)^2 \times SU(4)^2$)

U/T		Irrep.	Q_{B-L}	Deg.
U	Q_R	$(\bar{3}, 1, 2, 1; 1, 1, 1, 1)$	$-\frac{1}{6}$	3
U		$(1, 2, 1, 1; \bar{3}, 1, 1, 1)$	$-\frac{1}{2}$	3
T	$\bar{Q}_R$	$(3, 1, 2, 1; 1, 1, 1, 1)$	$\frac{1}{6}$	1
T	Q_R	$(\bar{3}, 1, 2, 1; 1, 1, 1, 1)$	$-\frac{1}{6}$	1
T	Q_{L2}	$(3, 2, 1, 2; 1, 1, 1, 1)$	$\frac{1}{6}$	1
T	Q_{L1}	$(3, 2, 1, 1; 1, 1, 1, 1)$	$\frac{1}{6}$	1
T	H	$(1, 2, 2, 1; 1, 1, 1, 1)$	0	1
T	H	$(1, 2, 2, 1; 1, 1, 1, 1)$	0	1
T		$(1, 2, 1, 1; 3, 1, 1, 1)$	$\frac{1}{2}$	1
T		$(1, 2, 1, 1; \bar{3}, 1, 1, 1)$	$-\frac{1}{2}$	1
T		$(1, 2, 1, 1; 1, 1, 6, 1)$	$\frac{1}{2}$	1
T		$(1, 2, 1, 1; 1, 1, 1, 4)$	$\frac{1}{2}$	1
T		$(1, 2, 1, 1; 1, 1, 1, \bar{4})$	$-\frac{1}{2}$	1
T		$(1, 1, 2, 2; 3, 1, 1, 1)$	$\frac{1}{2}$	1
T		$(1, 1, 2, 1; 3, 1, 1, 1)$	$\frac{1}{2}$	1
T		$(1, 1, 2, 1; 1, 1, 4, 1)$	$-\frac{1}{2}$	1
T		$(1, 1, 2, 1; 1, 1, \bar{4}, 1)$	$\frac{1}{2}$	1
T		$(1, 1, 2, 1; 1, 1, 1, 6)$	$-\frac{1}{2}$	1

U/T		Irrep.	Q_{B-L}	Deg.
T		$(1, 1, 1, 2; 1, 1, 1, 1)$	0	1
T		$(1, 1, 1, 2; 1, 1, 1, 1)$	0	1
T		$(1, 1, 1, 2; 1, 1, 1, 1)$	0	1
T		$(1, 1, 1, 2; 1, 1, 1, 1)$	0	1
T		$(1, 1, 1, 2; 1, 1, 1, 1)$	0	1
T		$(1, 1, 1, 2; 1, 1, 1, 1)$	0	1
T		$(1, 1, 1, 2; 1, 1, 1, 4)$	0	1
T		$(3, 1, 1, 1; 1, 1, 1, 1)$	$-\frac{4}{3}$	1
T		$(3, 1, 1, 1; 1, 1, 1, 1)$	$-\frac{4}{3}$	1
T		$(3, 1, 1, 1; \bar{3}, 1, 1, 1)$	$\frac{2}{3}$	1
T		$(3, 1, 1, 1; 1, 1, 1, \bar{4})$	$-\frac{1}{3}$	1
T		$(\bar{3}, 1, 1, 1; 1, 1, 1, 1)$	$\frac{4}{3}$	1
T		$(\bar{3}, 1, 1, 1; 1, 1, 1, 1)$	$\frac{4}{3}$	1
T		$(\bar{3}, 1, 1, 1; 1, 1, 1, 1)$	$\frac{2}{3}$	1
T		$(\bar{3}, 1, 1, 1; 3, 1, 1, 1)$	$-\frac{1}{3}$	1
T		$(\bar{3}, 1, 1, 1; 1, 1, \bar{4}, 1)$	$\frac{1}{3}$	1
T		$(1, 2, 2, 1; 1, 1, 1, 1)$	1	1
T		$(1, 2, 2, 1; 1, 1, 1, 1)$	-1	1
T		$(1, 1, 1, 2; 1, 1, 1, 1)$	-1	1
T		$(1, 1, 1, 2; 1, 1, 1, 1)$	1	1
T		$(1, 1, 1, 2; 1, 1, \bar{4}, 1)$	-1	1

+ other fields

・ 3世代 $SU(3)_C \times SU(2)_L \times SU(2)_R \times U(1)_{B-L}$ 模型

3世代left-right symmetric模型

マスレススペクトル($SU(3)_C \times SU(2)_L \times SU(2)_R \times SU(2)_F \times SU(3)^2 \times SU(4)^2$)

U/T		Irrep.	Q_{B-L}	Deg.
U	Q_R	$(\bar{3}, 1, 2, 1; 1, 1, 1, 1)$	$-\frac{1}{6}$	3
U		$(1, 2, 1, 1; \bar{3}, 1, 1, 1)$	$-\frac{1}{2}$	3
T	$\bar{Q}_R$	$(3, 1, 2, 1; 1, 1, 1, 1)$	$\frac{1}{6}$	1
T	Q_R	$(\bar{3}, 1, 2, 1; 1, 1, 1, 1)$	$-\frac{1}{6}$	1
T	Q_{L2}	$(3, 2, 1, 2; 1, 1, 1, 1)$	$\frac{1}{6}$	1
T	Q_{L1}	$(3, 2, 1, 1; 1, 1, 1, 1)$	$\frac{1}{6}$	1
T	H	$(1, 2, 2, 1; 1, 1, 1, 1)$	0	1
T	H	$(1, 2, 2, 1; 1, 1, 1, 1)$	0	1
T		$(1, 2, 1, 1; 3, 1, 1, 1)$	$\frac{1}{2}$	1
T		$(1, 2, 1, 1; \bar{3}, 1, 1, 1)$	$-\frac{1}{2}$	1
T		$(1, 2, 1, 1; 1, 1, 6, 1)$	$\frac{1}{2}$	1
T		$(1, 2, 1, 1; 1, 1, 1, 4)$	$\frac{1}{2}$	1
T		$(1, 2, 1, 1; 1, 1, 1, \bar{4})$	$-\frac{1}{2}$	1
T		$(1, 1, 2, 2; 3, 1, 1, 1)$	$\frac{1}{2}$	1
T		$(1, 1, 2, 1; 3, 1, 1, 1)$	$\frac{1}{2}$	1
T		$(1, 1, 2, 1; 1, 1, 4, 1)$	$-\frac{1}{2}$	1
T		$(1, 1, 2, 1; 1, 1, \bar{4}, 1)$	$\frac{1}{2}$	1
T		$(1, 1, 2, 1; 1, 1, 1, 6)$	$-\frac{1}{2}$	1

+ other fields

LR symmetric模型の3世代粒子
+
ベクターライク粒子

ヒッグス場: $SU(2)_R \times U(1)_{B-L} \rightarrow U(1)_Y$

- ・ 3世代 $SU(3)_C \times SU(2)_L \times SU(2)_R \times U(1)_{B-L}$ 模型
- ・ 余分な粒子はベクターライク

3世代left-right symmetric模型

マスレススペクトル($SU(3)_C \times SU(2)_L \times SU(2)_R \times SU(2)_F \times SU(3)^2 \times SU(4)^2$)

ベクターライク粒子

U/T	Irrep.	Q_{B-L}	Deg.
T	$(1, 1, 1, 2; 1, 1, 1, 1)$	0	1
T	$(1, 1, 1, 2; 1, 1, 1, 1)$	0	1
T	$(1, 1, 1, 2; 1, 1, 1, 1)$	0	1
T	$(1, 1, 1, 2; 1, 1, 1, 1)$	0	1
T	$(1, 1, 1, 2; 1, 1, 1, 1)$	0	1
T	$(1, 1, 1, 2; 1, 1, 1, 1)$	0	1
T	$(1, 1, 1, 2; 1, 1, 1, 4)$	0	1
T	$(3, 1, 1, 1; 1, 1, 1, 1)$	$-\frac{4}{3}$	1
T	$(3, 1, 1, 1; 1, 1, 1, 1)$	$-\frac{1}{3}$	1
T	$(3, 1, 1, 1; \bar{3}, 1, 1, 1)$	$\frac{2}{3}$	1
T	$(3, 1, 1, 1; 1, 1, 1, \bar{4})$	$-\frac{1}{3}$	1
T	$(\bar{3}, 1, 1, 1; 1, 1, 1, 1)$	$\frac{4}{3}$	1
T	$(\bar{3}, 1, 1, 1; 1, 1, 1, 1)$	$\frac{1}{3}$	1
T	$(\bar{3}, 1, 1, 1; 3, 1, 1, 1)$	$-\frac{2}{3}$	1
T	$(\bar{3}, 1, 1, 1; 1, 1, \bar{4}, 1)$	$\frac{1}{3}$	1
T	$(1, 2, 2, 1; 1, 1, 1, 1)$	1	1
T	$(1, 2, 2, 1; 1, 1, 1, 1)$	-1	1
T	$(1, 1, 1, 2; 1, 1, 1, 1)$	-1	1
T	$(1, 1, 1, 2; 1, 1, \underline{1}, 1)$	1	1
T	$(1, 1, 1, 2; 1, 1, \bar{4}, 1)$	-1	1

+ other fields

- ・ 3世代 $SU(3)_C \times SU(2)_L \times SU(2)_R \times U(1)_{B-L}$ 模型
- ・ 余分な粒子はベクターライク

3世代left-right symmetric模型

マスレススペクトル($SU(3)_C \times SU(2)_L \times SU(2)_R \times SU(2)_F \times SU(3)^2 \times SU(4)^2$)

U/T		Irrep.	Q_{B-L}	Deg.
U	Q_R	$(\bar{3}, 1, 2, 1; 1, 1, 1, 1)$	$-\frac{1}{6}$	3
U		$(1, 2, 1, 1; \bar{3}, 1, 1, 1)$	$-\frac{1}{2}$	3
T	$\bar{Q}_R$	$(3, 1, 2, 1; 1, 1, 1, 1)$	$\frac{1}{6}$	1
T	Q_R	$(\bar{3}, 1, 2, 1; 1, 1, 1, 1)$	$-\frac{1}{6}$	1
T	Q_{L2}	$(3, 2, 1, 2; 1, 1, 1, 1)$	$\frac{1}{6}$	1
T	Q_{L1}	$(3, 2, 1, 1; 1, 1, 1, 1)$	$\frac{1}{6}$	1
T	H	$(1, 2, 2, 1; 1, 1, 1, 1)$	0	1
T	H	$(1, 2, 2, 1; 1, 1, 1, 1)$	0	1
T		$(1, 2, 1, 1; 3, 1, 1, 1)$	$\frac{1}{2}$	1

1, 2世代はSU(2)_F の二重項

U/T	Irrep.	Q_{B-L}	Deg.
T	$(1, 1, 1, 2; 1, 1, 1, 1)$	0	1
T	$(1, 1, 1, 2; 1, 1, 1, 1)$	0	1
T	$(1, 1, 1, 2; 1, 1, 1, 1)$	0	1
T	$(1, 1, 1, 2; 1, 1, 1, 1)$	0	1
T	$(1, 1, 1, 2; 1, 1, 1, 1)$	0	1
T	$(1, 1, 1, 2; 1, 1, 1, 1)$	0	1
T	$(1, 1, 1, 2; 1, 1, 1, 1)$	0	1
T	$(1, 1, 1, 2; 1, 1, 1, 4)$	0	1
T	$(3, 1, 1, 1; 1, 1, 1, 1)$	$-\frac{4}{3}$	1
T	$(3, 1, 1, 1; 1, 1, 1, 1)$	$-\frac{1}{3}$	1
T	$(3, 1, 1, 1; \bar{3}, 1, 1, 1)$	$\frac{2}{3}$	1
T	$(3, 1, 1, 1; 1, 1, 1, \bar{4})$	$-\frac{1}{3}$	1
T	$(\bar{3}, 1, 1, 1; 1, 1, 1, 1)$	$\frac{1}{3}$	1
T	$(\bar{3}, 1, 1, 1; 1, 1, 1, 1)$	$\frac{1}{3}$	1
T	$(\bar{3}, 1, 1, 1; 3, 1, 1, 1)$	$-\frac{2}{3}$	1
T	$(\bar{3}, 1, 1, 1; 1, 1, \bar{4}, 1)$	$\frac{1}{3}$	1
T	$(1, 2, 2, 1; 1, 1, 1, 1)$	1	1
T	$(1, 2, 2, 1; 1, 1, 1, 1)$	-1	1
T	$(1, 1, 1, 2; 1, 1, 1, 1)$	-1	1
T	$(1, 1, 1, 2; 1, 1, \bar{1}, 1)$	1	1
T	$(1, 1, 1, 2; 1, 1, \bar{4}, 1)$	-1	1

+ other fields

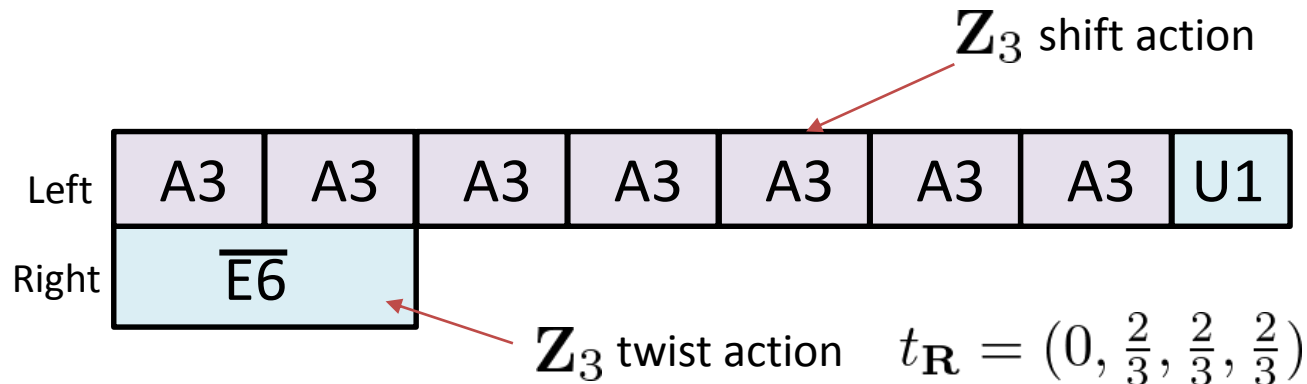
SU(2)_F flavon

- ・ 3世代 $SU(3)_C \times SU(2)_L \times SU(2)_R \times U(1)_{B-L}$ 模型
- ・ 余分な粒子はベクターライク
- ・ ゲージ世代対称性 $SU(2)_F$ が出る

3世代標準模型

Z3非対称オービフォールドコンパクト化

- ・ ナライン格子: $A_3^7 \times \overline{E}_6 \times U(1)$ lattice
- ・ LET: $A_3^8 \xrightarrow{\text{decompose}} A_3^7 \times A_2 \times U(1) \xrightarrow{\text{replace}} A_3^7 \times \overline{E}_6 \times U(1)$
- ・ Z3 shift vector: $V_L = (0, \alpha_1^{A_3} + 2\alpha_2^{A_3}, -\alpha_1^{A_3} - 2\alpha_2^{A_3}, -\alpha_1^{A_3} - 2\alpha_2^{A_3}, \alpha_3^{A_3}, \alpha_3^{A_3}, \alpha_3^{A_3}, 0, 0)/3$
- ・ ゲージ群: $SU(4)^7 \times U(1) \rightarrow SU(4) \times SU(3)^3 \times SU(2)^3 \times U(1)^{10}$



3世代標準模型

マスレススペクトル($SU(3)_C \times SU(2)_L \times SU(3)^2 \times SU(4) \times SU(2)^2$)

U/T	Irrep.	Q_Y	Deg.
U	$(1, 2, 1, 1, 1, 1, 1)$	$-\frac{1}{2}$	3
U	$(1, 2, 1, 1, 1, 1, 1)$	$\frac{1}{2}$	3
U	$(\bar{3}, 1, 1, 1, 1, 1, 1)$	$\frac{1}{3}$	3
T	$(1, 2, 1, 1, 1, 1, 1)$	$\frac{1}{2}$	3
T	$(1, 2, 1, 1, 1, 1, 1)$	$\frac{1}{2}$	3
T	$(1, 2, 1, 1, 1, 1, 2)$	$-\frac{1}{2}$	3
T	$(1, 2, 1, 1, 1, 2, 1)$	$-\frac{1}{2}$	3
T	$(\bar{3}, 1, 1, 1, 1, 1, 1)$	$\frac{1}{3}$	3
T	$(\bar{3}, 1, 1, 1, 1, 1, 1)$	$\frac{1}{3}$	3
T	$(\bar{3}, 1, 1, 1, 1, 1, 1)$	$-\frac{2}{3}$	3
T	$(3, 1, 1, 1, 1, 1, 1)$	$-\frac{1}{3}$	3
T	$(3, 1, 1, 1, 1, 1, 1)$	$-\frac{1}{3}$	3
T	$(3, 2, 1, 1, 1, 1, 1)$	$\frac{1}{6}$	3

+ other fields

標準模型の3世代粒子
+
ベクターライク粒子

- ・ 3世代 $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ 模型
- ・ “3”世代は縮退度の“3”からくる
- ・ 余分な粒子はベクターライク

ディラトン安定化

3世代標準模型

➤ 3世代超対称標準模型

ゲージ群: $SU(2)^3 \times SU(3)^3 \times SU(4) \times U(1)^{10}$

場の数: 144

▪ D-flatness 条件を解くとゲージ群が壊れる

ゲージ群: $SU(3) \times SU(2) \times U(1)_Y \times SU(3)^2 \times SU(4)$

--3世代標準模型の粒子+ベクターライク粒子

--シングレット

-- **3つ**のHiddenセクター $SU(3) \times SU(3) \times SU(4)$

Label	Irrep.	#	Label	Irrep.	#
Q_i	$(\mathbf{3}, \mathbf{2}, \mathbf{1}, \mathbf{1}, \mathbf{1})_{1/6}$	3	$\bar{U}_i$	$(\bar{\mathbf{3}}, \mathbf{1}, \mathbf{1}, \mathbf{1}, \mathbf{1})_{-2/3}$	3
$\bar{D}_i$	$(\bar{\mathbf{3}}, \mathbf{1}, \mathbf{1}, \mathbf{1}, \mathbf{1})_{1/3}$	6	D_i	$(\mathbf{3}, \mathbf{1}, \mathbf{1}, \mathbf{1}, \mathbf{1})_{-1/3}$	3
L_i	$(\mathbf{1}, \mathbf{2}, \mathbf{1}, \mathbf{1}, \mathbf{1})_{-1/2}$	9	$\bar{L}_i$	$(\mathbf{1}, \mathbf{2}, \mathbf{1}, \mathbf{1}, \mathbf{1})_{1/2}$	6
$\bar{E}_i$	$(\mathbf{1}, \mathbf{1}, \mathbf{1}, \mathbf{1}, \mathbf{1})_1$	6	E_i	$(\mathbf{1}, \mathbf{1}, \mathbf{1}, \mathbf{1}, \mathbf{1})_{-1}$	3
Q_{1i}	$(\mathbf{1}, \mathbf{1}, \mathbf{3}, \mathbf{1}, \mathbf{1})_0$	9	$\bar{Q}_{1i}$	$(\mathbf{1}, \mathbf{1}, \bar{\mathbf{3}}, \mathbf{1}, \mathbf{1})_0$	9
Q_{2i}	$(\mathbf{1}, \mathbf{1}, \mathbf{1}, \mathbf{3}, \mathbf{1})_0$	6	$\bar{Q}_{2i}$	$(\mathbf{1}, \mathbf{1}, \mathbf{1}, \bar{\mathbf{3}}, \mathbf{1})_0$	6
Q'_i	$(\mathbf{1}, \mathbf{1}, \mathbf{1}, \mathbf{1}, \mathbf{4})_{-1/2}$	3	$\bar{Q}'_i$	$(\mathbf{1}, \mathbf{1}, \mathbf{1}, \mathbf{1}, \bar{\mathbf{4}})_{1/2}$	3
Q''_i	$(\mathbf{1}, \mathbf{1}, \mathbf{1}, \mathbf{1}, \mathbf{4})_{1/2}$	3	$\bar{Q}''_i$	$(\mathbf{1}, \mathbf{1}, \mathbf{1}, \mathbf{1}, \bar{\mathbf{4}})_{-1/2}$	3
S	$(\mathbf{1}, \mathbf{1}, \mathbf{1}, \mathbf{1}, \mathbf{1})_0$	12			

SU(3):9フレーバー
SU(3):6フレーバー
SU(4):6フレーバー

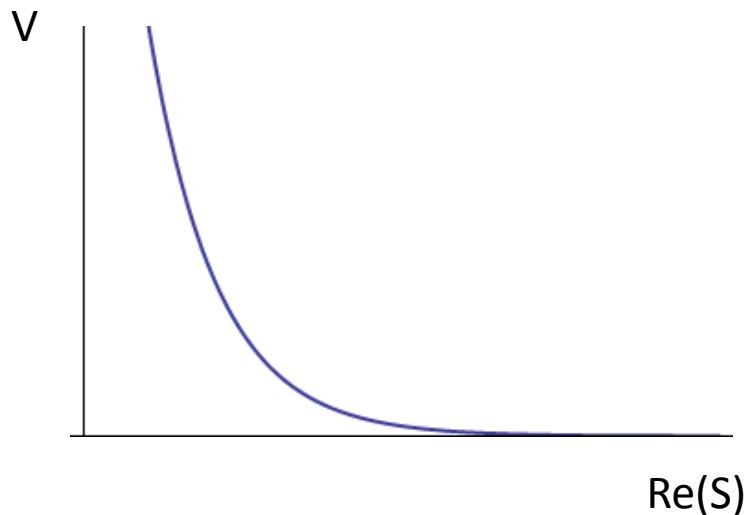
ディラトン安定化

- Racetrackメカニズム

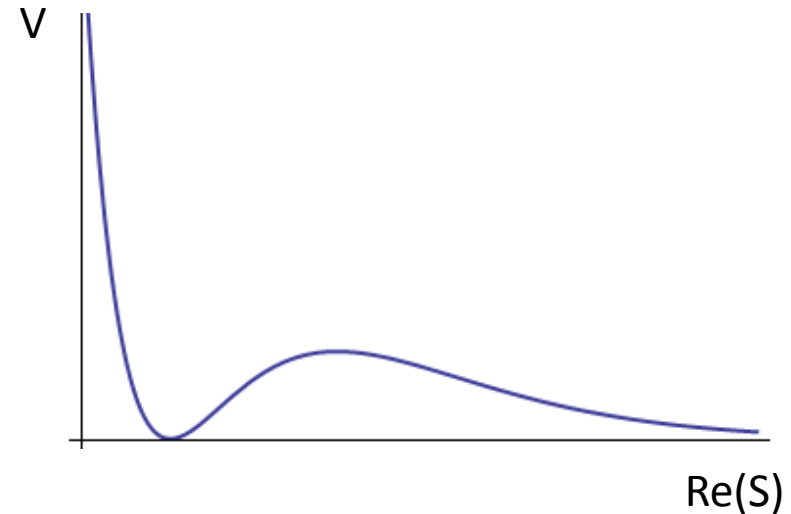
- ・非摂動効果でディラトンのポテンシャルがダイナミカルに作られる
- ・ひとつのゲージノ凝縮 → Runawayポテンシャル
- ・複数のゲージノ凝縮 → ディラトンの安定点ができる

$$Re(S) = \frac{1}{g^2} \sim 2$$

$$W = a_0 e^{-a_1 S}$$



$$W = a_0 e^{-a_1 S} + b_0 e^{-b_1 S}$$



ディラトン安定化

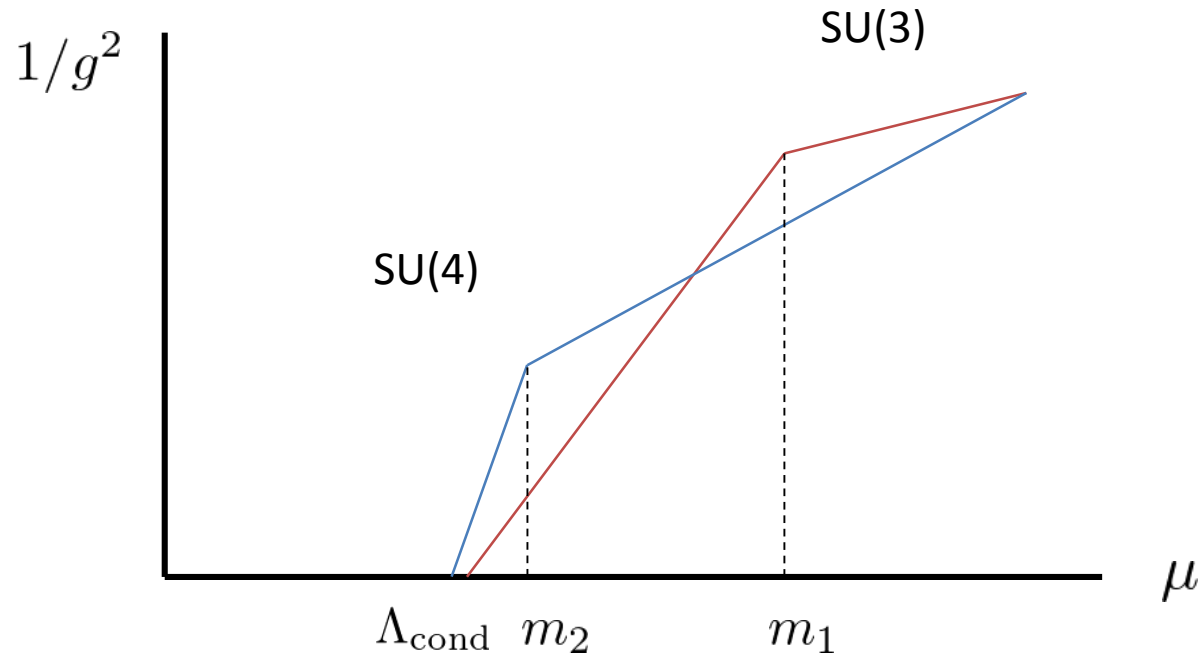
- $SU(3) \times SU(4)$ hiddenセクターを考える

高次元項の質量項により中間スケールの質量を持つと期待できる

$$\sum_{i,j=1\dots 6} m_{2ij}(S_k) Q_{2i} \overline{Q}_{2j} + \sum_{i,j=1\dots 3} m'_{ij}(S_k) Q'_i \overline{Q}'_j + \sum_{i,j=1\dots 3} m''_{ij}(S_k) Q''_i \overline{Q}''_j$$

$SU(3)$: 6フレーバー m_1

$SU(4)$: 6フレーバー m_2



ディラトン安定化

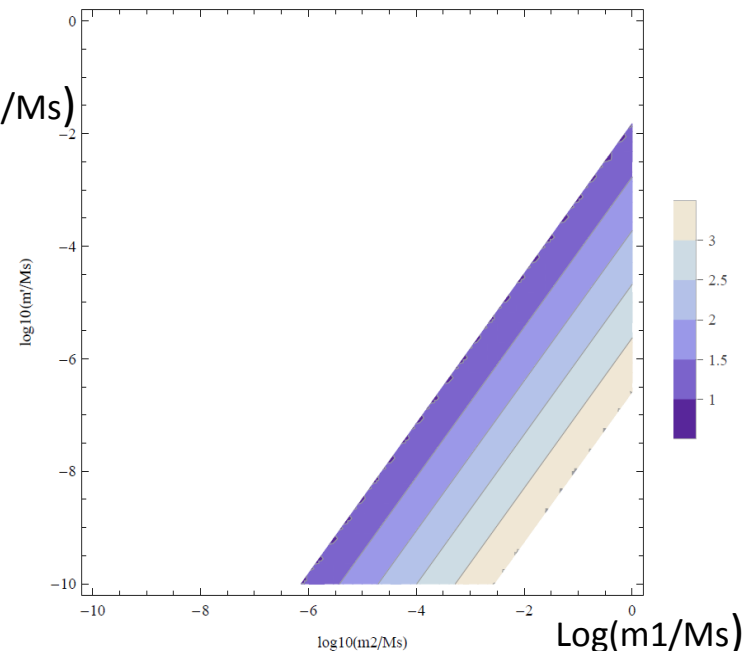
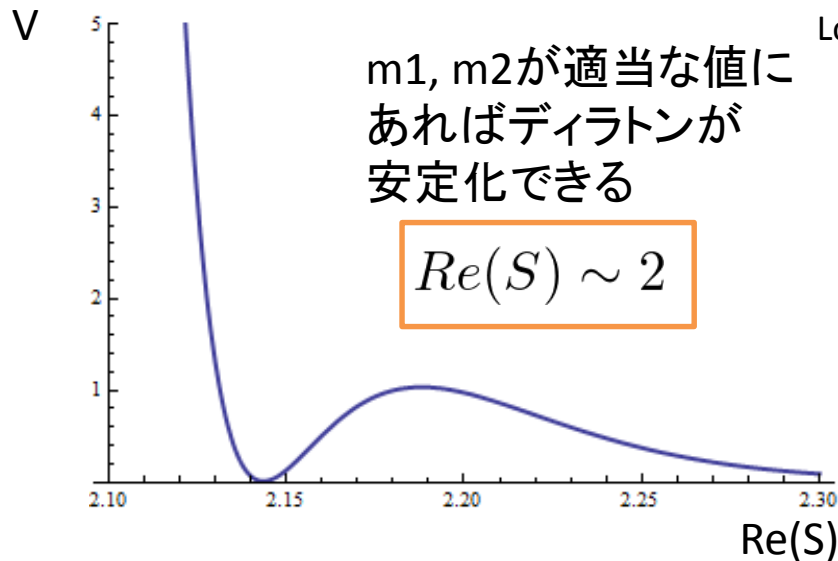
- $SU(3) \times SU(4)$ hiddenセクターを考える

スーパーポテンシャル

$$W = M_s m_1^2 e^{-8\pi^2 S/3} + M_s^{3/2} m_2^{3/2} e^{-8\pi^2 S/4}$$

F-flatness条件

$$\text{Re}(S) = \frac{3 \ln(10)}{2\pi^2} \left[\log_{10} \left(\frac{4}{3} \right) + 2 \log_{10} \left(\frac{m_1}{M_s} \right) - \frac{3}{2} \log_{10} \left(\frac{m_2}{M_s} \right) \right]$$



SUSY breakingについて

- ・残った $SU(3)$ hiddenセクター

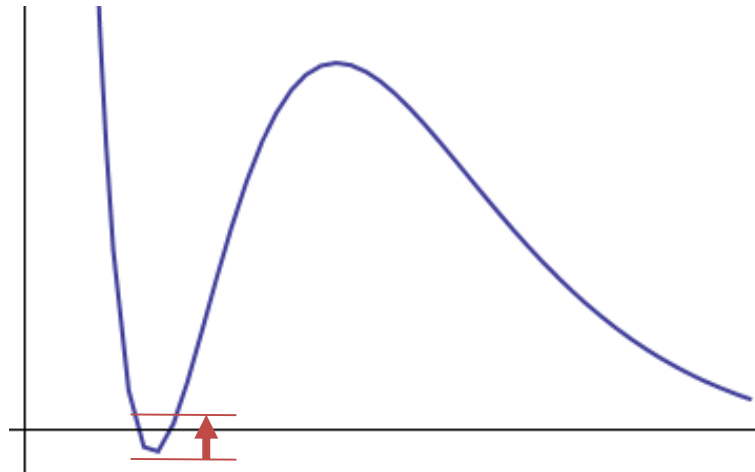
$SU(3)$: 9フレーバー

- Intriligator-Seiberg-Shih型のSUSY brakingが埋め込める可能性

- 準安定なSUSYを破る真空

- SUSY breakingの効果により、負の真空エネルギーを0もしくは小さい正の値に持ち上げ

AdS真空 $\rightarrow$ dS真空 or Minkowski真空



Conclusion

- まとめ

- ヘテロ型弦理論の非対称オービフォールドコンパクト化
- エンハンス点 → Hiddenセクターが豊富
- 非対称オービフォールド作用 → モジュライの数が少ない
- 模型構築に必要なナライン格子の分類
- いくつかの3世代模型が得られた
- Racetrackメカニズムにより、ディラトンの安定化が可能であることを示した

- これから

- SUSY breaking、宇宙項
- 湯川行列の計算、質量・混合行列
- 模型のサーチ
- 低エネルギーでの予言