Higgsless Gauge Symmetry Breaking with a Large Mass Hierarchy

長澤智明（神戸大）
坂本眞人（神戸大）

（参考論文）
T. Nagasawa and M. Sakamoto, hep-ph/0406024

●Introduction

○GUTの階層性問題とその解決

GUTスケール とWeakスケールの階層性をいかに説明するか？

$\left(M_G = 10^{16}\,GeV\right)$　　$\left(M_W = 10^2\,GeV\right)$　　（GUTの階層性問題）

↓

高次元モデルでの解決

スケール：コンパクト化のスケール$\left(1/l\right)$ただ一つ

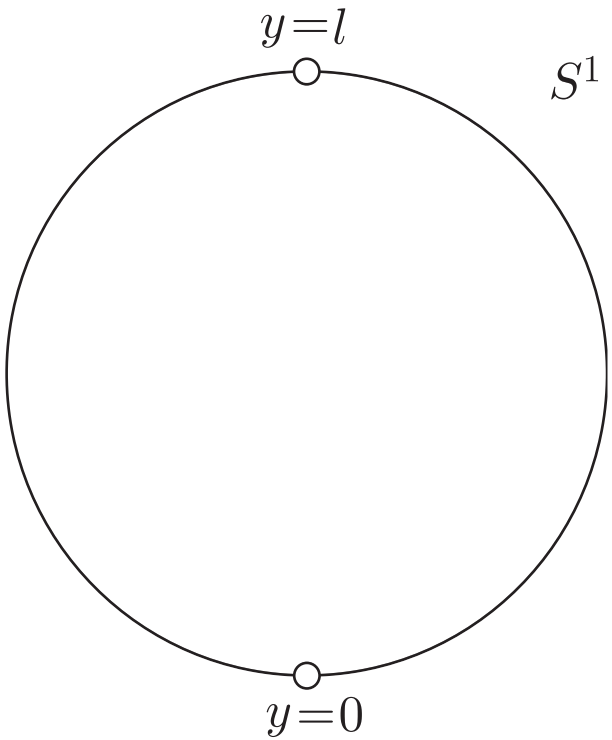
↓

$1/l \cong M_G$ としてWeakスケールを出すモデルを構築した。

●セットアップ

○余剰次元がS^1/Z_2にオービフォールド化されている５次元時空

$M^4 \otimes S^1/Z_2$



yと$-y$を同一視した空間

○$SU(5)$ゲージ対称性をもち、5次元目の座標だけに依存する重み関数がついている作用

$$S = \int d^4x \int_{S^1/Z_2} dy\, \Delta(y) \left[-\frac{1}{4} F_{MN} F^{MN} \right]$$

$$\Delta(y) = \exp\left[-2W(y)\right]$$: 重み関数

$$W(y) = M_G |y|$$

(M. Shaposhnikov and P. Tinyakov, hep-th/0102161)

●目指すモデル

○GUT Symmetry Breaking

$$SU(5) \xrightarrow{M_G} SU(3)\otimes SU(2)\otimes U(1) \xrightarrow{M_W} SU(3)\otimes U(1)_{em}$$

○３つのゲージ場

$SU(3)\otimes U(1)_{em}$: Unbroken Generators

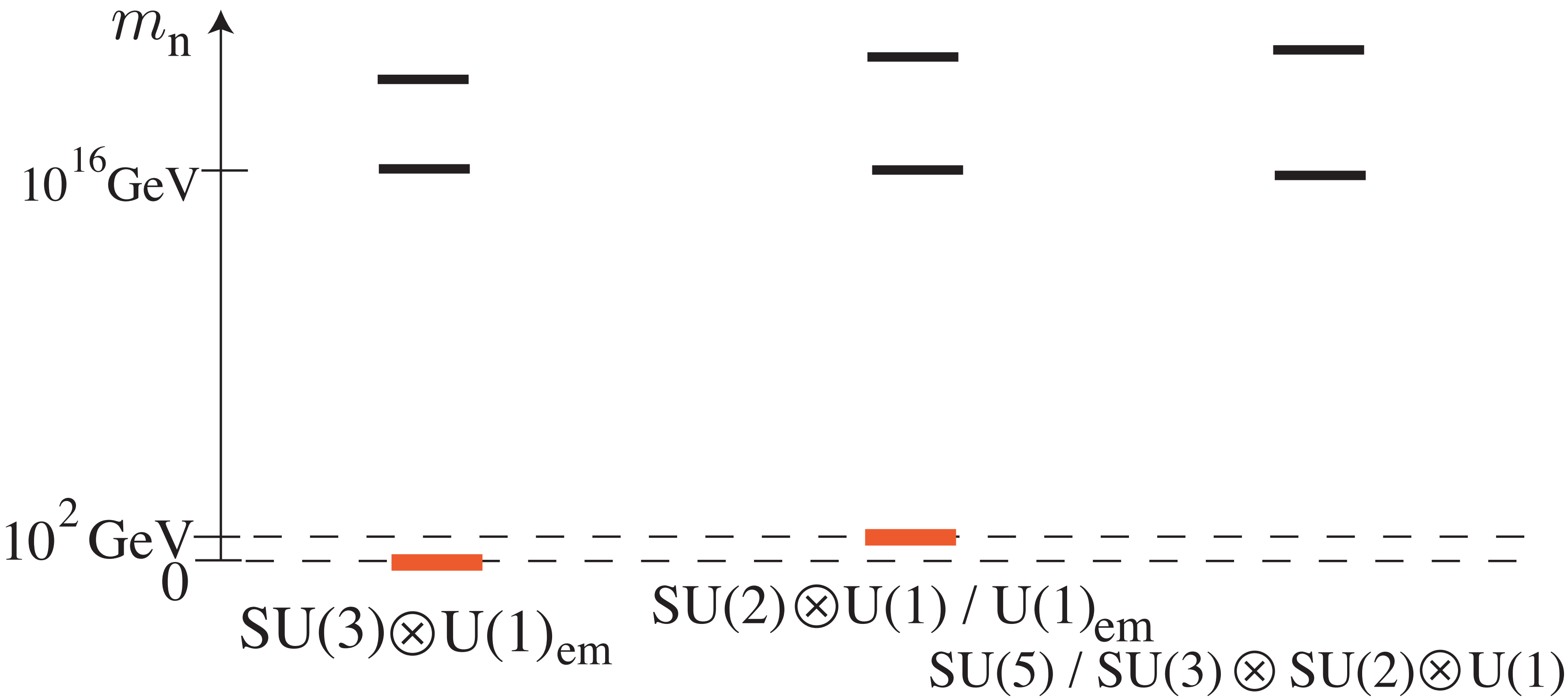
$SU(5)/SU(3)\otimes SU(2)\otimes U(1)$: Broken Generators

$(SU(5)\rightarrow SU(3)\otimes SU(2)\otimes U(1))$

$SU(2)\otimes U(1)/U(1)_{em}$: Broken Generators

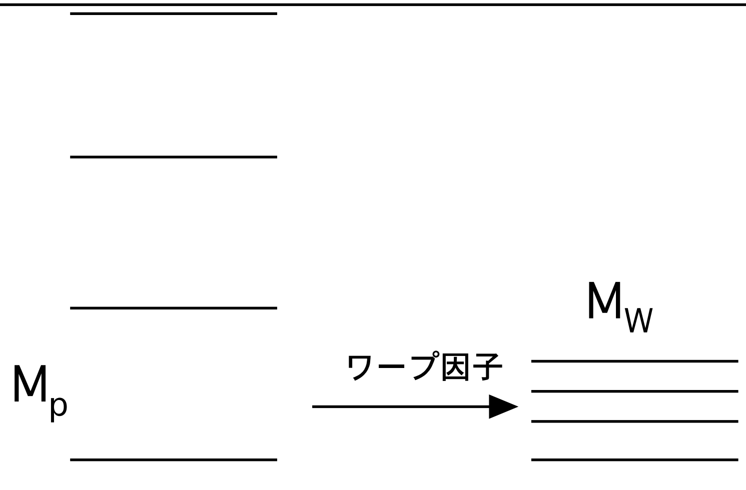
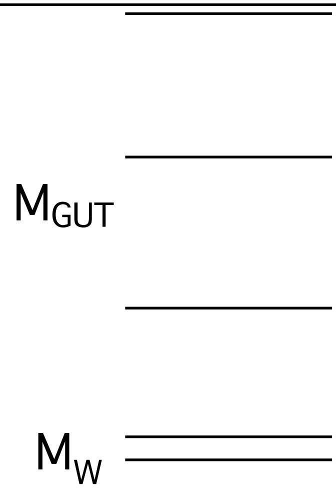
$(SU(2)\otimes U(1)\rightarrow U(1)_{em})$

○ゲージ場のスペクトラム



Orbifold Projectionと境界条件をうまく選ぶことによってこのモデルを構築する

○Randall-Sundrumシナリオとの違い

	R-Sシナリオ	我々のモデル
メトリック	ワープメトリック	平坦（ミンコフスキー）
質量 スペクトラム （K-Kタワー）		
局在化	ゼロモードは局在化しない	局在化する
階層性問題 解決のキー	ワープ因子	背後に存在する超対称性

●Orbifold Projection

$$A_\mu(x,-y) = PA_\mu(x,y)P^{-1}$$

$$A_5(x,-y) = -PA_5(x,y)P^{-1}$$

$$P = \begin{pmatrix} 1 & & & & \\ & 1 & & & \\ & & 1 & & \\ & & & -1 & \\ & & & & -1 \end{pmatrix}$$

○$SU(3)\otimes SU(2)\otimes U(1)$（標準理論のゲージ群）

$$\boxed{A_\mu^a(x,-y) = A_\mu^a(x,y)} \quad : \quad 偶$$

$$\boxed{A_5^a(x,-y) = -A_5^a(x,y)} \quad : \quad 奇$$

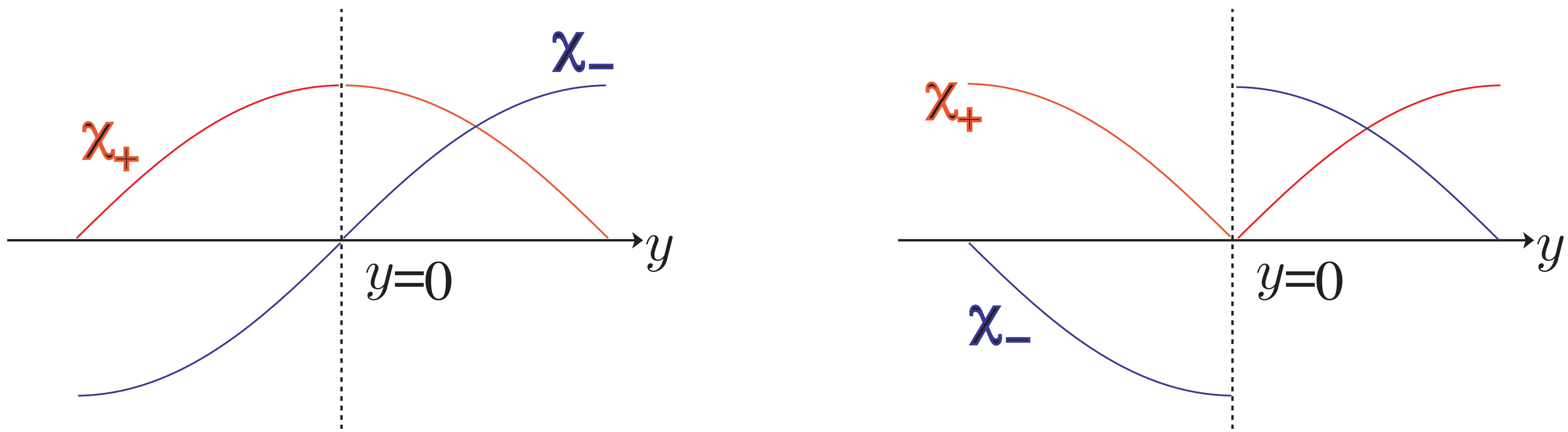
○$SU(5)/SU(3)\otimes SU(2)\otimes U(1)$

$$\boxed{A_\mu^{\hat{a}}(x,-y) = -A_\mu^{\hat{a}}(x,y)} \quad : \quad 奇$$

$$\boxed{A_5^{\hat{a}}(x,-y) = A_5^{\hat{a}}(x,y)} \quad : \quad 偶$$

●固定点での境界条件

- 固定点は特異点 → **固定点で場はなめらかである必要はない！**
- S^1/Z_2 Orbifold → 偶関数と奇関数で別々にモード展開できる。



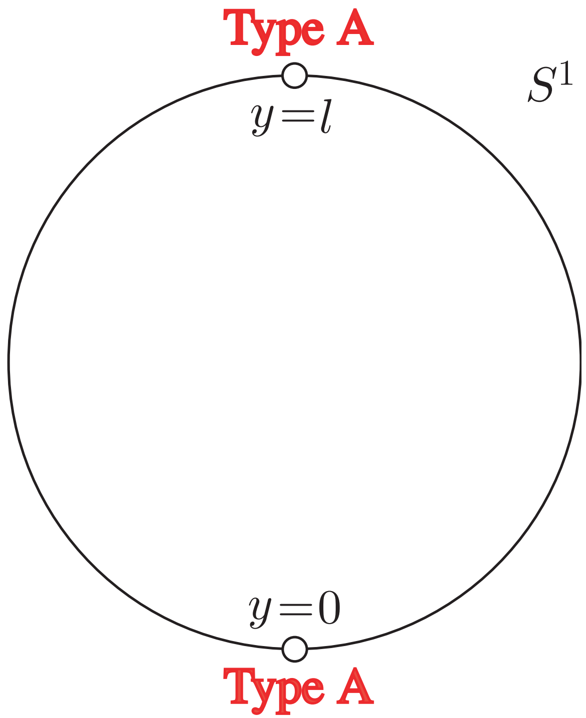
Type A

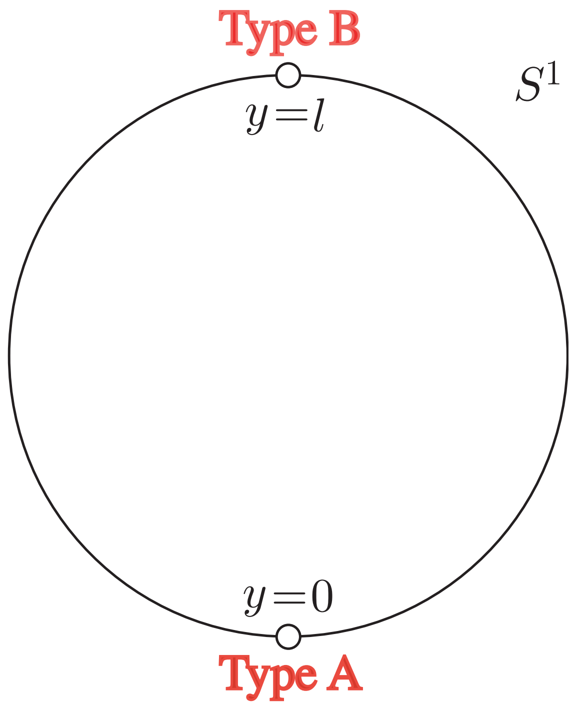
$$\begin{cases} \chi_+'(0_+) = 0 & (Neumann\ BC) \\ \chi_-(0_+) = 0 & (Dirichlet\ BC) \end{cases}$$

Type B

$$\begin{cases} \chi_+(0_+) = 0 & (Dirichlet\ BC) \\ \chi_-'(0_+) = 0 & (Neumann\ BC) \end{cases}$$

○ゲージ場の境界条件





$$SU(3)\otimes U(1)_{em}$$

(unbroken generators)

$$SU(5)/SU(3)\otimes SU(2)\otimes U(1)$$
$$SU(2)\otimes U(1)/U(1)_{em}$$

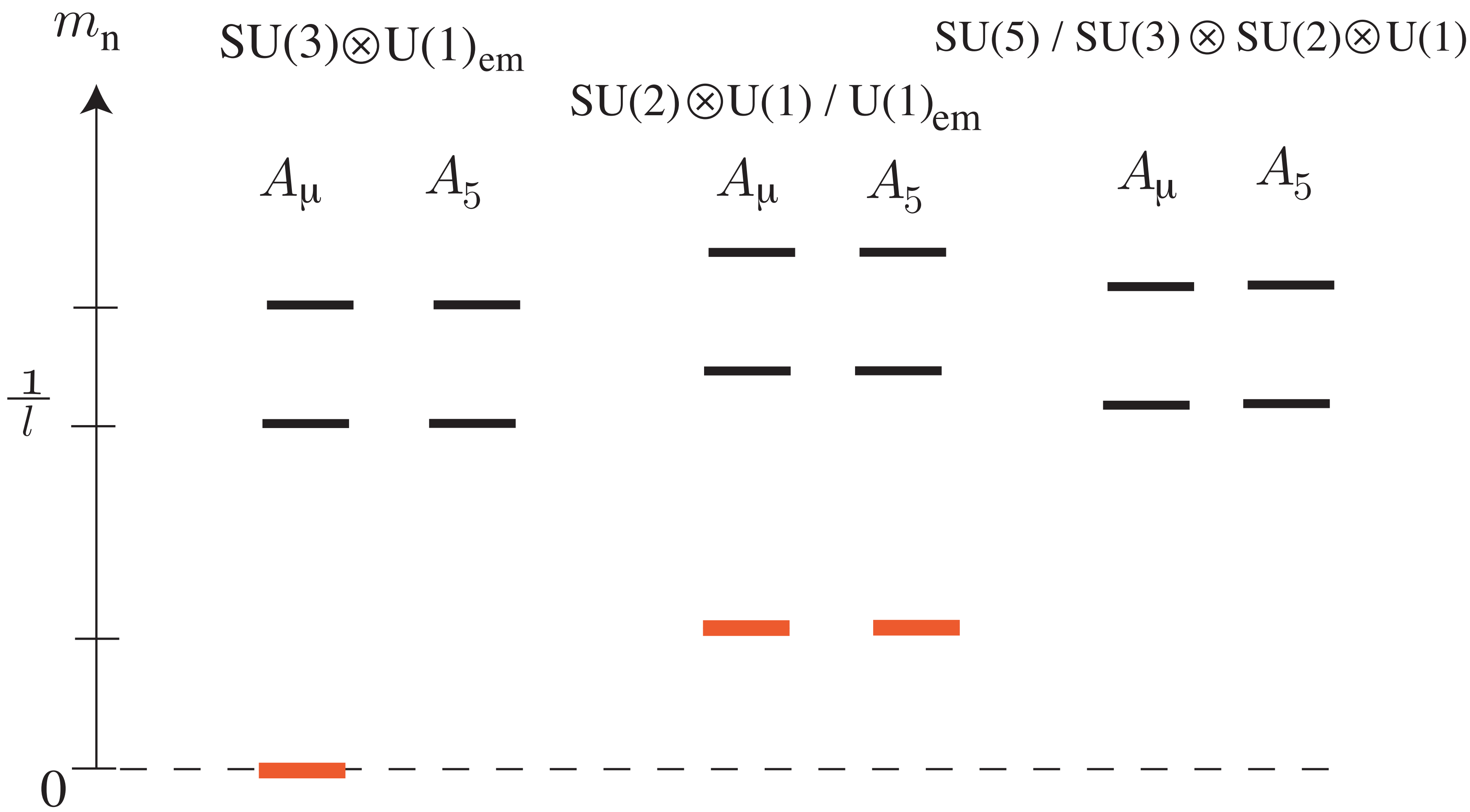
(broken generators)

・２つの固定点$(y=0,l)$で境界条件は同じである必要はない！

●境界条件とZ_2パリティ（まとめ）

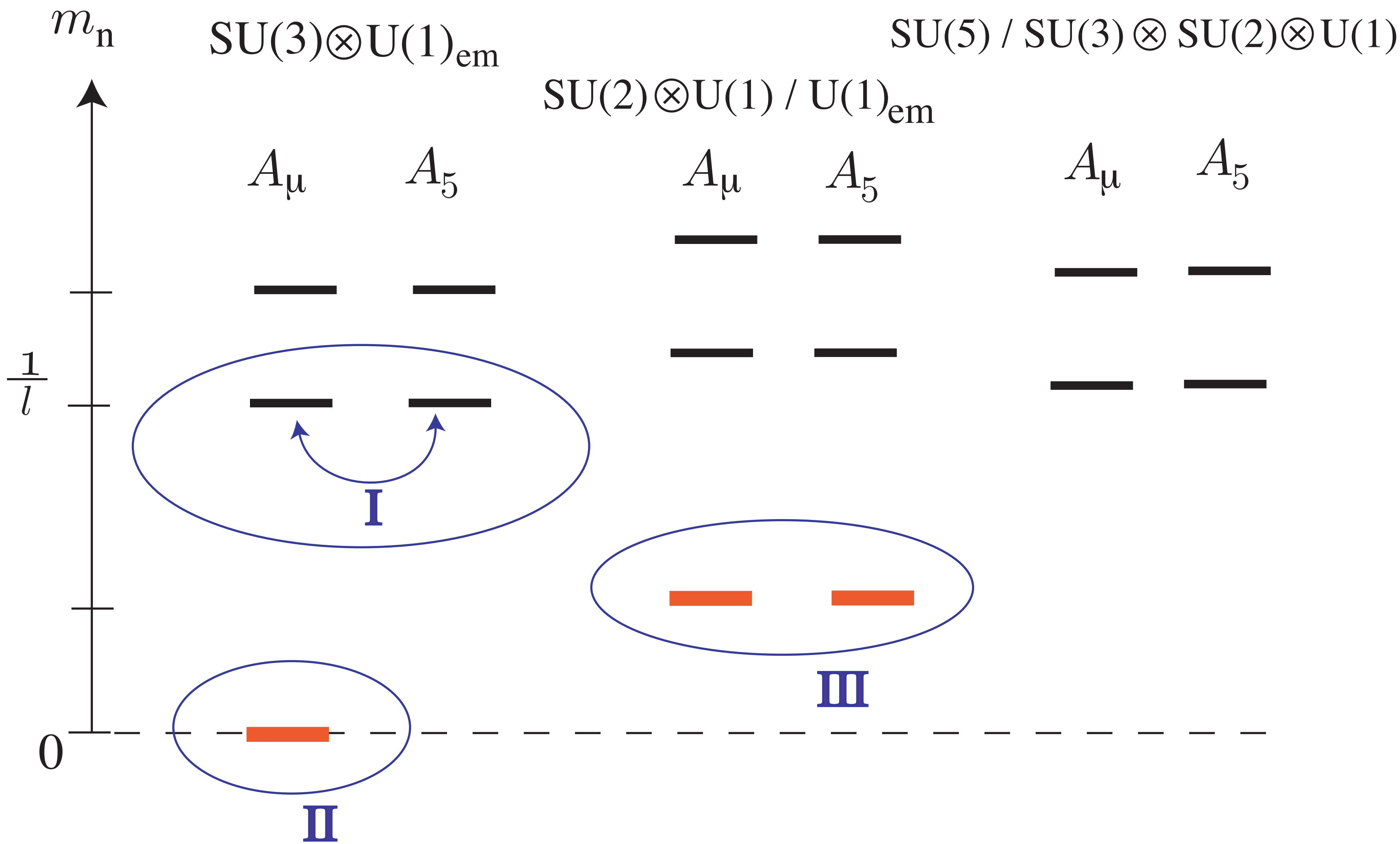
	Z_2 パリティ	境界条件： $y=0$ $y=l$ ↓ ↓
$SU(3)\otimes U(1)_{em}$ $A_\mu\,(A_5)$	$+(-)$	(A,A)
$SU(2)\otimes U(1)/U(1)_{em}$ $A_\mu\,(A_5)$	$+(-)$	(A,B)
$SU(5)/SU(3)\otimes SU(2)\otimes U(1)$ $A_\mu\,(A_5)$	$-(+)$	(A,B)

●K-Kモード



m_n
SU(3)⊗U(1)$_{em}$
SU(2)⊗U(1) / U(1)$_{em}$
SU(5) / SU(3) ⊗ SU(2)⊗U(1)
A_μ
A_5
A_μ
A_5
A_μ
A_5
$\frac{1}{l}$
0

●K-Kモード



m_n
SU(3)⊗U(1)$_{em}$
SU(2)⊗U(1) / U(1)$_{em}$
SU(5) / SU(3) ⊗ SU(2)⊗U(1)
A_μ
A_5
A_μ
A_5
A_μ
A_5
$\frac{1}{l}$
0
I
II
III

●非自明な点

I $\left(A_\mu, A_5\right)$の質量が縮退している

II $SU(3)\otimes U(1)_{em}$ の非自明な真空構造

（A_μしかゼロモードはない）

III $SU(2)\otimes U(1)/U(1)_{em}$のモードの基底状態の小ささ

これらは背後に存在する超対称性を用いると説明できる。

I <u>縮退</u>

○背後に（量子力学での）超対称性がある。

T. Nagasawa, M. Sakamoto, K. Takenaga,

Phys.Lett.<u>B562</u>(2003)358(hep-th/0212192),

Phys.Lett.<u>B583</u>(2004)357(hep-th/0311043)

↓

$$A_\mu^{(n)} \leftrightarrow A_5^{(n)}$$ ：　縮退

→ 質量ゼロ状態を除いてスペクトラムは縮退！

II 非自明な真空構造

○超対称な真空状態は**形式的**には常に存在している。

$$Q\chi_0(y) = 0 \qquad\qquad Q：超電荷$$

○ノンコンパクト空間の場合

$\chi_0(y)$が規格化可能かどうか？

規格化可能　：超対称な真空が存在

規格化不可能：超対称な真空はない

○コンパクト空間の場合

$\chi_0(y)$が**境界条件**を満たしているか？

満たしている：超対称な真空が存在

満たさない　：超対称な真空はない

○今回の場合

$SU(3)\otimes U(1)_{em}$	$\chi_0(y)$は境界条件を満たす（超対称な真空がある）
$\begin{cases} SU(5)/SU(3)\otimes SU(2)\otimes U(1) \\ SU(2)\otimes U(1)/U(1)_{em} \end{cases}$	$\chi_0(y)$は境界条件を満たしていない（超対称な真空がない）

III 非常に小さい質量の起源

○$SU(2)\otimes U(1)/U(1)_{em}$

$$SU(2)\otimes U(1)/U(1)_{em}$$

↓

超対称な真空は境界条件を破っている。

↓

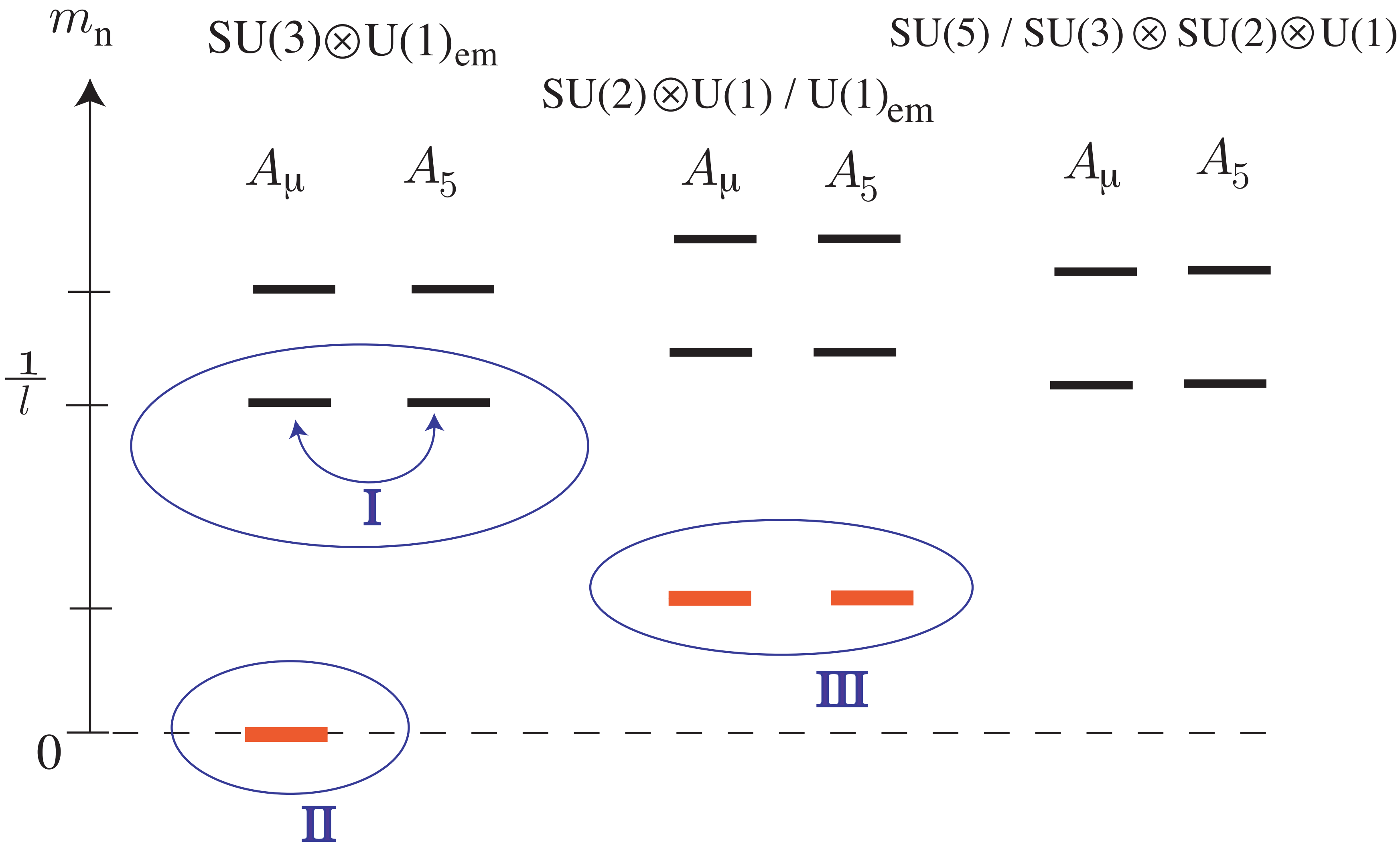
その破れ方が非常に小さい（exponential的）

↓

非常に小さい質量

○$SU(5)/SU(3)\otimes SU(2)\otimes U(1)$

→　大きく境界条件を破っている。



m_n
SU(3)⊗U(1)$_{em}$
SU(2)⊗U(1) / U(1)$_{em}$
SU(5) / SU(3) ⊗ SU(2)⊗U(1)
A_μ
A_5
A_μ
A_5
A_μ
A_5
$\frac{1}{l}$
0
I
II
III

●パラメータと現実的なモデル

○理論に含まれているパラメータは２つ

$$M_G\left(\Delta(y)=\exp\left[-2M_G|y|\right]\right)$$

$1/l$（コンパクト化のスケール）

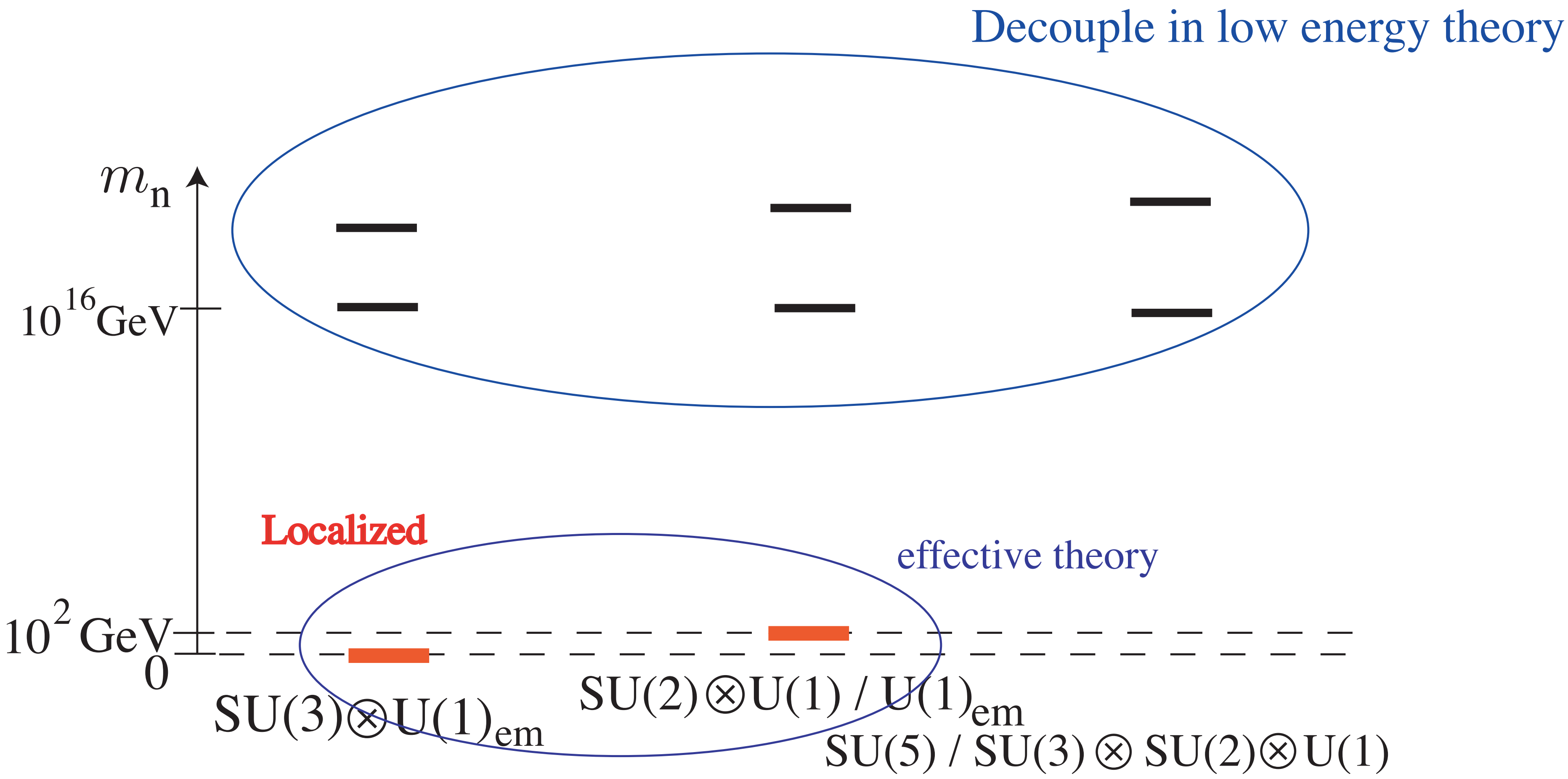
→質量ゼロ状態以外のスペクトラムはパラメータに依存

○両方GUTスケールに取って、Weakスケールを出す

$M_G \sim 10^{16}\ GeV$ $l^{-1} \sim \dfrac{M_G}{33}$	→	$SU(2)\otimes U(1)/U(1)_{em}$の質量 （最低固有値 $W^{\pm}, Z^0$に対応）： $\sim 100\ GeV$

●まとめと結果

○スペクトラム　$(M_G \sim 10^{16}\ GeV$、$M_G l \sim 33)$



○重み関数があるときに、Orbifold Projectionと固定点での境界条件をうまく選ぶことで階層性問題を解決した。

○非常に小さい質量の起源は、超対称性量子力学である。

・超対称な真空が境界条件を満たすとき　→　質量ゼロ

・超対称な真空がほんの少しだけ境界条件を破るとき

→　非常に小さい質量

○４次元有効理論に現れるゲージ場はオービフォールド固定点付近に局在化しているが、重たいK-Kモードは局在化していない！

○A_5は質量ゼロモードは出ない。（細谷機構とは本質的に違う）

●問題点と今後の展開

○ゲージ対称性をオービフォールドと境界条件で破ったのだが、ユニタリティー等の問題は大丈夫なのか？

○量子補正を入れるとどうなるか？

○ヒッグス粒子を用いずにゲージ対称性を破ることができた。しかし標準理論におけるヒッグスはフェルミオンに質量を与える役割も担っている。Higgslessでフェルミオンに質量を与える機構が必要！