

Coset space dimensional reductionを用いた4+8次元模型の探索

arXiv: 2305.01421

埼玉大学 大学院理工学研究科 博士前期課程2年 須田亮介

共同研究者: 浅井健人(東京大学宇宙線研究所), 佐藤文(横浜国立大学), 高西康敬(埼玉大学), 梁正樹(埼玉大学)
素粒子物理学の進展2023 @ 京都大学基礎物理学研究所



概要

- ✓ Coset space dimensional reduction(CSDR): 次元還元(高次元 → 4次元理論の手続き)の一種
- ✓ 余剰空間の対称性 vs ゲージ対称性 → 4次元でのゲージ群と場の表現が決まる
- ✓ 4+8次元のゲージ理論から標準模型フェルミオンを複数世代含む4次元理論が得られた

1. 序論~Higgs場の起源とゲージヒッグス統合理論~

●Higgs場はどこから来たのか?

その答えは標準模型の中にはない

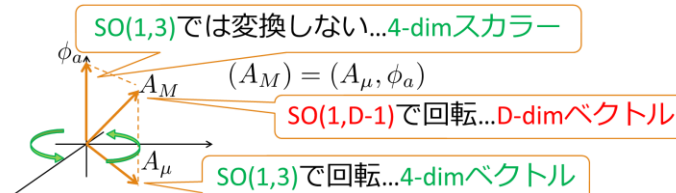
スカラー場のポテンシャルの形 } ゲージ理論の「外から」
湯川相互作用 } 加えたように見える

$SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$
の $(1, 2) \left(\frac{1}{2}\right)$ です



Higgsの起源を求めて標準模型の先へ

電弱ゲージ対称性を自発的に破ります
※イラストは破った後の物理的Higgs場

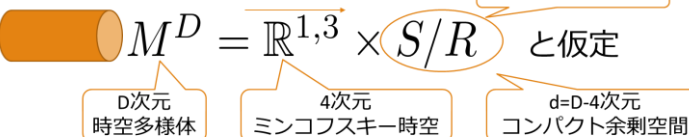


Higgs(スカラー場)をgauge場(ベクトル場)に統合
ゲージ・ヒッグス統合理論

2. Coset space dimensional reduction

●時空の構造を

「等長群sをもつ」



●S/R: コンパクトリー群sの、部分リー群Rによる商空間 = coset space

●高次元理論から4次元理論を得る...次元還元(dimensional reduction)

商空間による次元還元(Coset space dimensional reduction)

P. Forgacs and N. S. Manton, Commun. Math. Phys. 72 (1980), 15-35.
D. Kapetanakis and G. Zoupanos, Phys. Rept. 219(1992), 1-76.

●D次元ゲージ理論(ゲージ群G)の作用A^Dからスタート

$$A^D = \int d^4x d^{D-4}y \mathcal{L}^D(x, y)$$

D次元ラグランジアン
x: 4次元座標
y: 余剰次元(S/R)座標

●4次元の理論を得るには?

●y積分を実行して有効ラグランジアンを導く

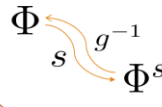
●ふつうは場のy依存性を単純に落とす(ゼロモードのみ拾う)

●「s対称性変換をゲージ変換で打ち消せる」

●記号的には(無限小形で)

$$\delta_{\xi_A} \Phi = D_{\Phi}(W_A) \Phi$$

s変換sのパラメーター ゲージ変換gのパラメーター



➢D次元ラグランジアンがゲージ不変性がs不変性に

➢これに合うゲージ群Hと場が4次元理論に残る

ポイント

INPUTS

●時空次元D(余剰次元d)

●余剰空間S/R

●高次元ゲージ群G

●RのGへの埋め込みRCG

●フェルミオン(スピノル場)のG表現F

対称条件
CSDR

OUTPUTS

●4次元ゲージ群H = C_G(R)

●現れるスカラー場のH表現

●現れるスピノル場のH表現

- どんな模型が出るか?
- Higgs込みの標準模型や統一模型が得られるか?
- 含まれる場の種類は?

3. CSDRによる4+8次元模型の探索

●欲しいもの: 4次元でカイラルな理論

≒左右のフェルミオンのゲージ群表現が異なる理論

➢そのための条件

●D=4n+2のとき: D次元ゲージ群Gの実表現フェルミオン OK

➢D=6,10,14: 先行研究+先輩方の仕事

[T. Jittoh, M. Koike, T. Nomura, J. Sato and T. Shimomura, Prog. Theor. Phys., 120(2008), 1041-1063.]

●D=4nのとき: D次元ゲージ群Gの複素表現フェルミオン OK 実表現 NG

➢はじめから複素表現の片方だけ: 理論的興味はD=4n+2よりは小さかったが...

➢D=8: 先輩方の仕事

[T. Jittoh, M. Koike, T. Nomura, J. Sato and Y. Toyama, Physics Letters B, 675(2009), 450-454.]

D=12 (d=8) は? ...まだ ⇒ やってみよう

●4次元でカイラルな理論を得るために必要なもの

●Rank R = Rank S

[R. Bott, Princeton University Press(1965), 167-186.]

●D=4n ⇒ G, R は複素表現を持つもののみ、高次元でワイルフェルミオンを入れる(今回はSO(1,11)の32)

●作業仮設的なもの

●RのU(1)直積因子は1つまで

➢RのU(1)はそのままHのU(1)に: HのU(1)が多すぎるのは好ましくない

●12-dim フェルミオンのゲージ群G表現Fは dim F ≤ 1000 まで

以上のsetupで

4次元ゲージ群HがSU(3)×SU(2)×U(1), SU(5), SO(10), E₆, およびそれらにU(1)因子がついたものになる場合を探す

4. 解析と結果

① 要請に合う商空間 S/R ⇒ ad S = ad R + (SO(8) 8v) の R 分解により R ⊂ SO(8) を決定

S/R	vector under R	spinors under R
SU(5)/SU(4) × U(1)	$\mathbf{8}_v = 4(1) + \bar{3}(-1)$	$\mathbf{8}_s = 4(-1) + \bar{4}(1)$ $\mathbf{8}_c = 6(0) + 1(2) + 1(-2)$
SU(4)/SU(2) × SU(2) × U(1)	$\mathbf{8}_v = (2, 2)(1) + (2, 2)(-1)$	$\mathbf{8}_s = (3, 1)(0) + (1, 3)(0) + (1, 1)(2) + (1, 1)(-2)$ $\mathbf{8}_c = (2, 2)(1) + (2, 2)(-1)$
SO(7)/SO(6) × SU(2)/U(1)	$\mathbf{8}_v = 6(0) + 1(2) + 1(-2)$	$\mathbf{8}_s = 4(1) + \bar{4}(-1)$ $\mathbf{8}_c = 4(-1) + \bar{4}(1)$
$\frac{G_2/SU(3)}{G_2/SU(3)} \times \frac{SU(2)/U(1)}{G_2/SU(3)}$	$\mathbf{8}_v = 3(0) + \bar{3}(0) + 1(2) + 1(-2)$	$\mathbf{8}_s = 3(-1) + \bar{3}(1) + 1(-1) + 1(1)$ $\mathbf{8}_c = 3(1) + \bar{3}(-1) + 1(1) + 1(-1)$
$\frac{Sp(4)/SU(2) \times SU(2)}{SU(3)/SU(2) \times U(1)}$	$\mathbf{8}_v = (2, 1, 1)(2) + (1, 2, 2)(0) + (2, 1, 1)(-2)$	$\mathbf{8}_s = (1, 2, 1)(2) + (2, 1, 2)(0) + (1, 2, 1)(-2)$ $\mathbf{8}_c = (1, 1, 2)(2) + (2, 2, 1)(0) + (1, 1, 2)(-2)$

② R × H ⊂ G (up to U(1)) となるゲージ群Gを洗い出す ⇒ dim F ≤ 1000 でCSDRを実行

S/R	G	H	result
SU(5)/SU(4) × U(1)	SU(9)	SU(3) × SU(2) × U(1) × U(1)	×(1)
	SU(9)	SU(5) × U(1)	×(2)
	SO(18)	SO(10) × U(1)	○
SU(4)/SU(2) × SU(2) × U(1)	SO(14)	SU(5) × U(1)	×(2)
	SU(9)	SU(3) × SU(2) × U(1) × U(1)	×(3)
	SU(9)	SU(5) × U(1)	×(3)
[SO(7)/SO(6)] × [SU(2)/U(1)]	SO(18)	SO(10) × U(1)	○
	E ₆	SU(3) × SU(2) × U(1)	×(4)
	SU(8)	SU(3) × SU(2) × U(1) × U(1)	×(1)
[G ₂ /SU(3)] × [SU(2)/U(1)]	SU(8)	SU(5) × U(1)	×(3)
	SO(14)	SU(3) × SU(2) × U(1)	×(4)
	SO(18)	SO(10) × U(1)	○

× (望ましい模型が得られない)

- (1) 標準模型フェルミオンが1世代分揃わない
- (2) スカラーフェルミオンの片方しか出ない
- (3) スカラー場が出ない
- (4) 標準模型のハイパーチャージを再現しない

○ (現象論的に興味あり?)

S/R	G	F	H	scalars	fermions
SU(5)/SU(4) × U(1)	SO(18)	256	SO(10) × U(1)	10(1) + 10(-1)	16(2) + 16(0) + 16(-2) + 16(1) + 16(-1)
SO(7)/SO(6) × SU(2)/U(1)	SO(18)	256	SO(10) × U(1)	10(2) + 10(0) + 10(-2)	16(1) + 16(-1) + 16(1) + 16(-1)
Sp(4)/SU(2) × SU(2) × SU(3)/SU(2) × U(1)	SO(18)	256	SO(10) × U(1)	10(2) + 10(0) + 10(-2)	16(2) + 16(0) + 16(-2) + 16(2) + 16(0) + 16(-2)

● SO(10) GUT-like な模型(標準模型にどう破る?)

● 標準模型フェルミオン複数世代(びったり3ではないが...)

● U(1)_{Lμ-Lτ} チャージと同じ割り当て(クォークにも割り当てがある...)

5. 展望

● 作業仮設の緩和 特に R の U(1) 因子の数を増やす / dim F の上限を撤廃する

● 解析の半 ⇒ (ほぼ)全自動化

● ポテンシャルの解析 出てきたスカラーがどのように働くか(SM Higgs? GUT breaking?)

● U(1)_{Lμ-Lτ} 模型をはじめ3世代構造との関連を詳細に調べる