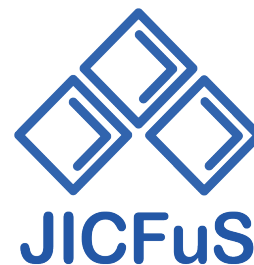


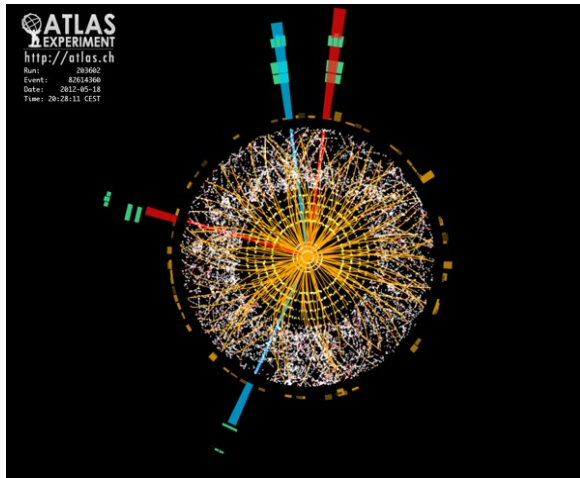
素粒子標準模型を超えた模型の探索 とそのダイナミクス

野秋淳一 (KEK)

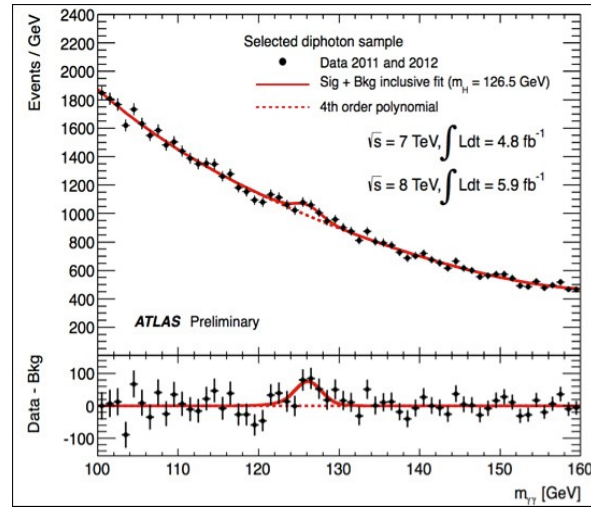


HPCI 戦略プログラム分野 5 全体シンポジウム 2014 年 3 月 3-4 日

2012 年 7 月 LHC でヒッグス粒子発見



$h \rightarrow 4e$



$m \sim 126$ GeV



やっと見つかった、だけではない。これが始まり。

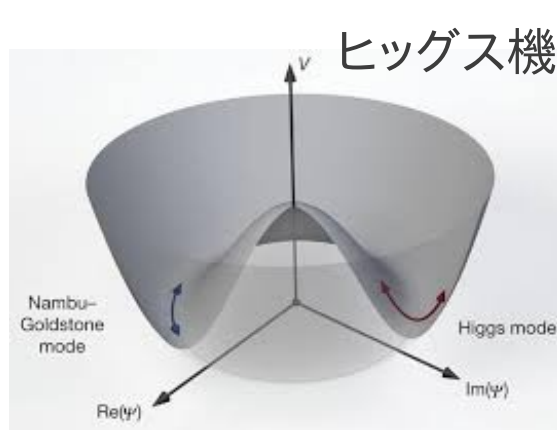
“The next step will be to determine the precise nature of the particle and its significance for our understanding of the universe.”

--- CERN press release ---

新しい素粒子理論探索への突破口といえる。

電弱対称性の破れ

- ビッグバンから今日の宇宙を説明するために必要



ヒッグス機構:

$SU(2)_L \times U(1)_Y$ 対称性



フェルミオン質量ゼロ、ヒッグスポテンシャル

$U(1)_{em}$ 対称性

フェルミオン質量, W, Z, **ヒッグス粒子**

- 素粒子標準理論

$$\mathcal{L}_{SM} = \mathcal{L}_{\text{gauge}} + \mathcal{L}_{\text{fermion}} + \mathcal{L}_{\text{higgs}} + \mathcal{L}_{\text{yukawa}}$$

- ▶ ヒッグス場を何ら原理なく導入している。そもそもヒッグス粒子は "素" 粒子なのか？
- ▶ ヒッグス質量に 10^4 桁以上大きな量子補正。不自然に巧妙な引き算を要する。
- ▶ ヒッグス - フェルミオン相互作用の結合定数は不定。クォーク質量が预言できない。
- ▶ バリオン数、ダークマター、 etc

ヒッグス粒子 ($m=126$ GeV) の発見で、これらの解決への重要な手掛りが得られた。

素粒子標準理論を超えて

- さまざまな模型が検討されている:

- テクニカラー → 複合粒子としてのヒッグス
- 超対称性 → 量子補正の抑制
- 余剰次元 → ゲージ-ヒッグス統合 (GHU)
- etc

- どれが本物か? 状況はいまだ混沌としている。

LHC スケジュール: 2009-2013 7-8 TeV run ← ヒッグス発見、他に無し
 2013-2014 メンテナンス / アップグレード
 2015- 13-14 TeV run ← " ここが本番 "

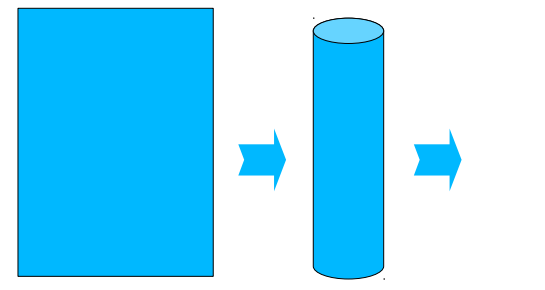
- 数年後を見据えた理論的・数値的研究を

余剰次元模型の基礎確立にむけて

- ゲージ - ヒッグス統合による大統一シナリオ

Hatanaka, Inami and Lim 1998

- ▶ 標準理論を含む、高次元のゲージ理論
- ▶ 4次元を残し、余剰次元はコンパクト化される。



- ▶ コンパクト化にはゲージ対称性の自発的破れが伴う：細谷機構

$$\text{eg. } \text{SU}(5) \rightarrow \text{SU}(3) \times \text{SU}(2) \times \text{U}(1)$$

- ▶ ゲージ場の余剰次元成分をヒッグス場とみなす。その質量は有限の量子効果。

- 細谷機構が GHU の根幹

- ▶ 摂動的な議論を超え、ゲージ場の理論の普遍的性質であることを確かめたい
→ 格子シミュレーションによる非摂動的検証

もくじ

G. Cossu, H. Hatanaka, Y. Hosotani and JN,

“Polyakov loops and the Hosotani mechanism on the lattice”, arXiv: 1309.4198 [hep-lat]

- 細谷機構とその数値的検証
- 格子シミュレーション
- 摂動論との比較
- まとめ

- 次元コンパクト化により、ゲージ対称性が自発的に破れる

- ▶ アハロノフ - ボーム効果により、新たな力学変数 θ_H が生じる

- ゲージ場、フェルミオン場が質量を獲得
- θ_H の 4 次元のゆらぎ = Higgs 場

- ▶ 摂動 (1-loop) Hosotani 1989, Hatanaka & Hosotani 2011

- $V_{\text{eff}}(\theta_{AB}) \rightarrow$ ゲージ対称性の破れを予言

- 我々のアプローチ: 3+1 次元 SU(3) 格子ゲージ理論 (toy model だが、)

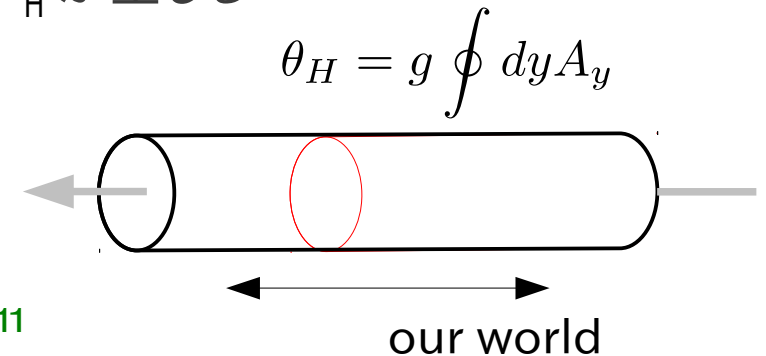
- ▶ GHU の問題 = 高次元理論の定式化 + 細谷機構の普遍性

- 後者を数値シミュレーションによって確立したい



A C++ code system for lattice gauge theory

http://suchix.kek.jp/guido_cossu/documents/DoxyGen/html/index.html



SU(3) ゲージ理論 ($R^3 \times S^1$)

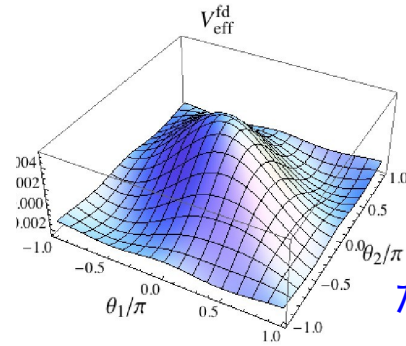
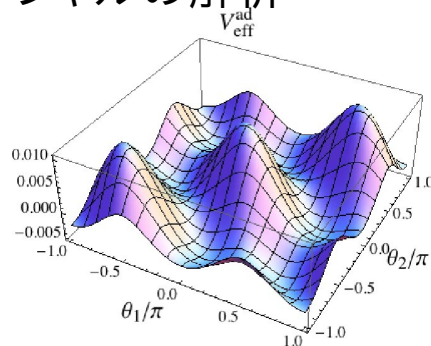
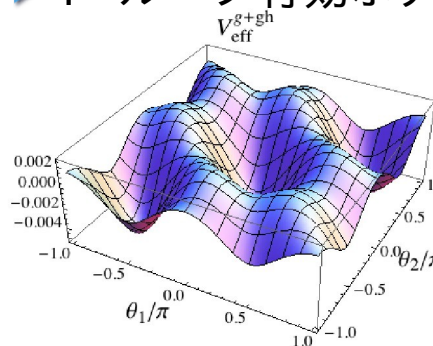
● 基本表現 + 随伴表現のフェルミオン

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{2}F_{MN}F^{MN} + \bar{\psi}_{\text{fd}}(D_{\text{fd}} - m_{\text{fd}})\psi_{\text{fd}} + \bar{\psi}_{\text{ad}}(D_{\text{ad}} - m_{\text{ad}})\psi_{\text{ad}}$$

▶ ゲージ場 (カルツァ - クラインゼロモード) の質量 : $(m_A^{(0)})_{jk}^2 = \left(\frac{\theta_j - \theta_k}{2\pi R}\right)^2$, $j, k = 1, 2, 3$

- $\theta_j \neq \theta_k \rightarrow$ ゲージ対称性の破れ
- θ_H の配位によって、破れのパターンが決まる

▶ 1- ループ有効ポテンシャルの解析



たしかに $\theta_j \neq \theta_k$ なる真空あり

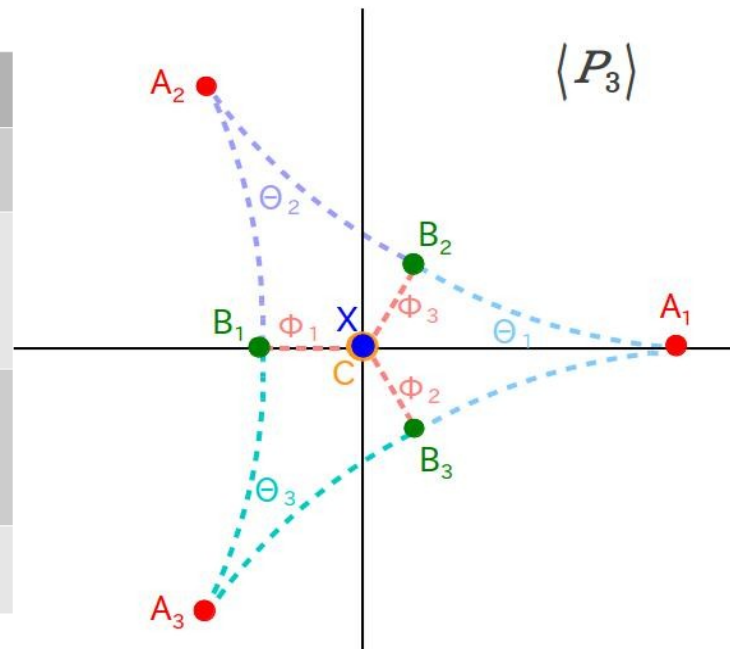
▶ ポリヤコフループの θ_H 依存性に注目

$$P_3 = \frac{1}{3}(e^{i\theta_1} + e^{i\theta_2} + e^{i\theta_3}), \quad P_8 = \frac{1}{4}[1 + \cos(\theta_1 - \theta_2) + \cos(\theta_2 - \theta_3) + \cos(\theta_3 - \theta_1)]$$

- 格子計算で得られる Polyakov loop のふるまいからゲージ対称性の破れを調べる

Polyakov loop による相分類

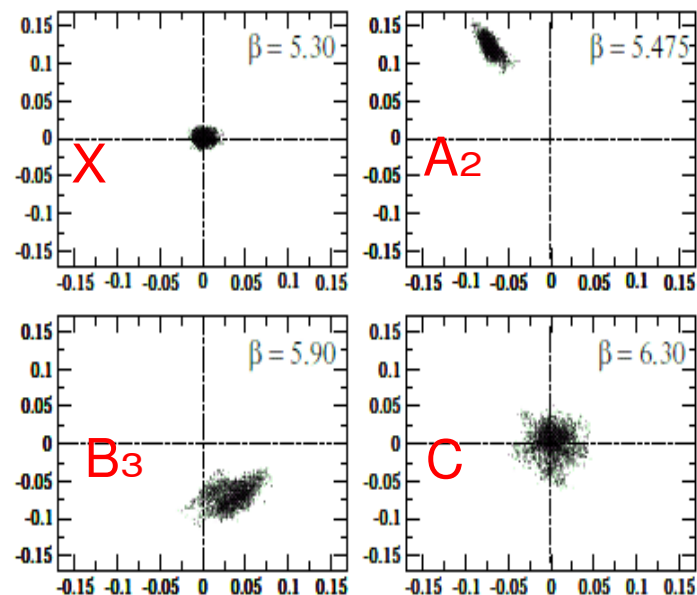
	θ_H	P3	P8	対称性
X	不定	0	$-1/8$	SU(3)
A	$(0, 0, 0),$ $\pm 2\pi(1, 1, 1)/3$	1, $e^{\pm 2\pi i/3}$	1	SU(3)
B	$(0, \pi, \pi),$ $\pm \pi(2, -1, -1)/3$	$-1/3,$ $e^{\pm \pi i/3}/3$	0	SU(2)xU(1)
C	$2\pi(0, 1, -1)/3$	0	$-1/8$	U(1)xU(1)



モチベーションは異なるものの、Cossu & D'Elia 2010
による先行研究あり

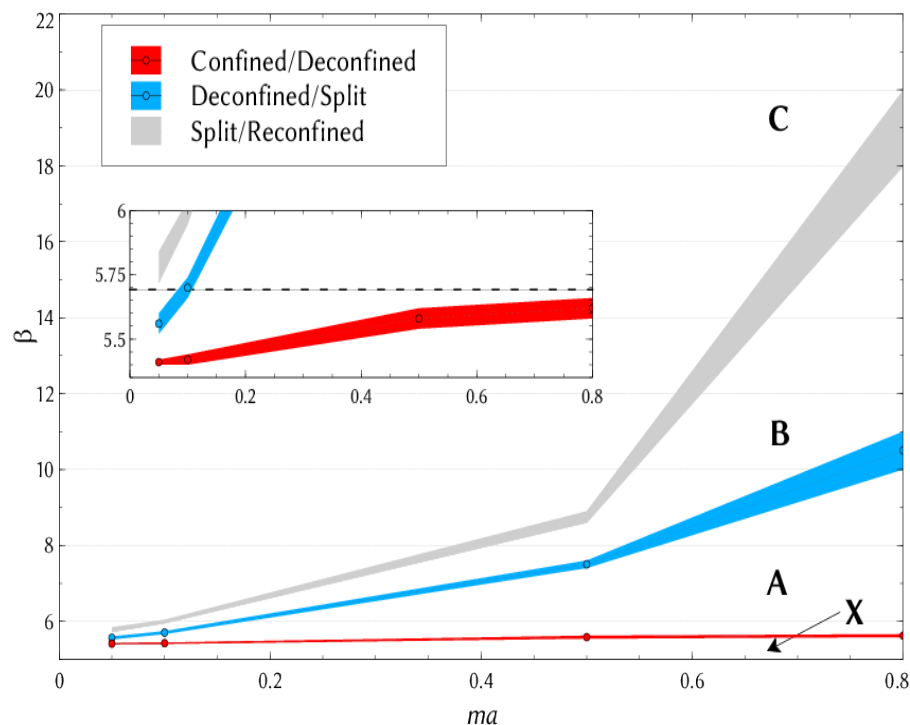
同様のセットアップ

(随伴表現 ($N_{ad} = 2$) スタッガードフェルミオン、
 $16^3 \times 4$ 格子) にて追試

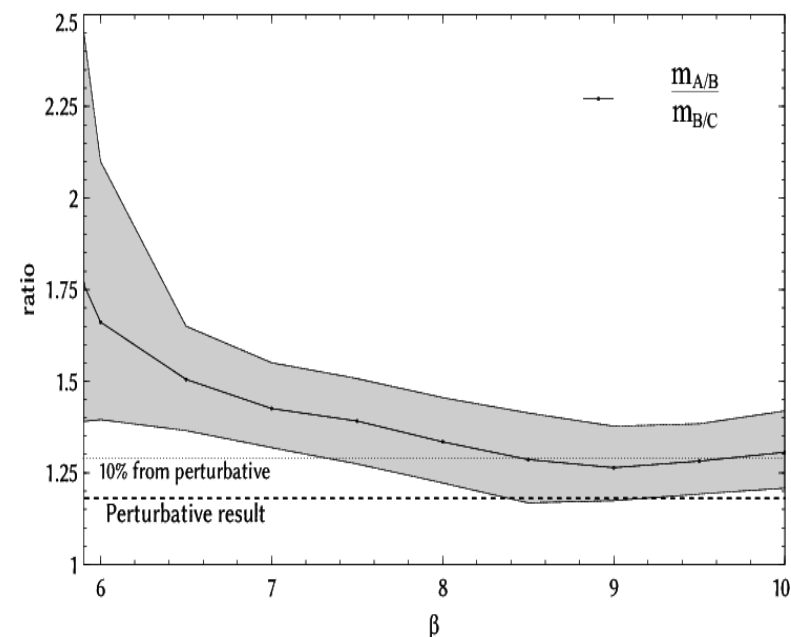


パラメータ空間の相構造

- $(N_{\text{ad}}, N_{\text{fd}}) = (2, 0)$, 周期境界条件の場合



質量の臨界値の比 $m_{A/B}/m_{B/C}$ を
摂動の場合と比較



- $(N_{\text{ad}}, N_{\text{fd}}) = (0, 4)$ の場合、境界条件依存性が重要

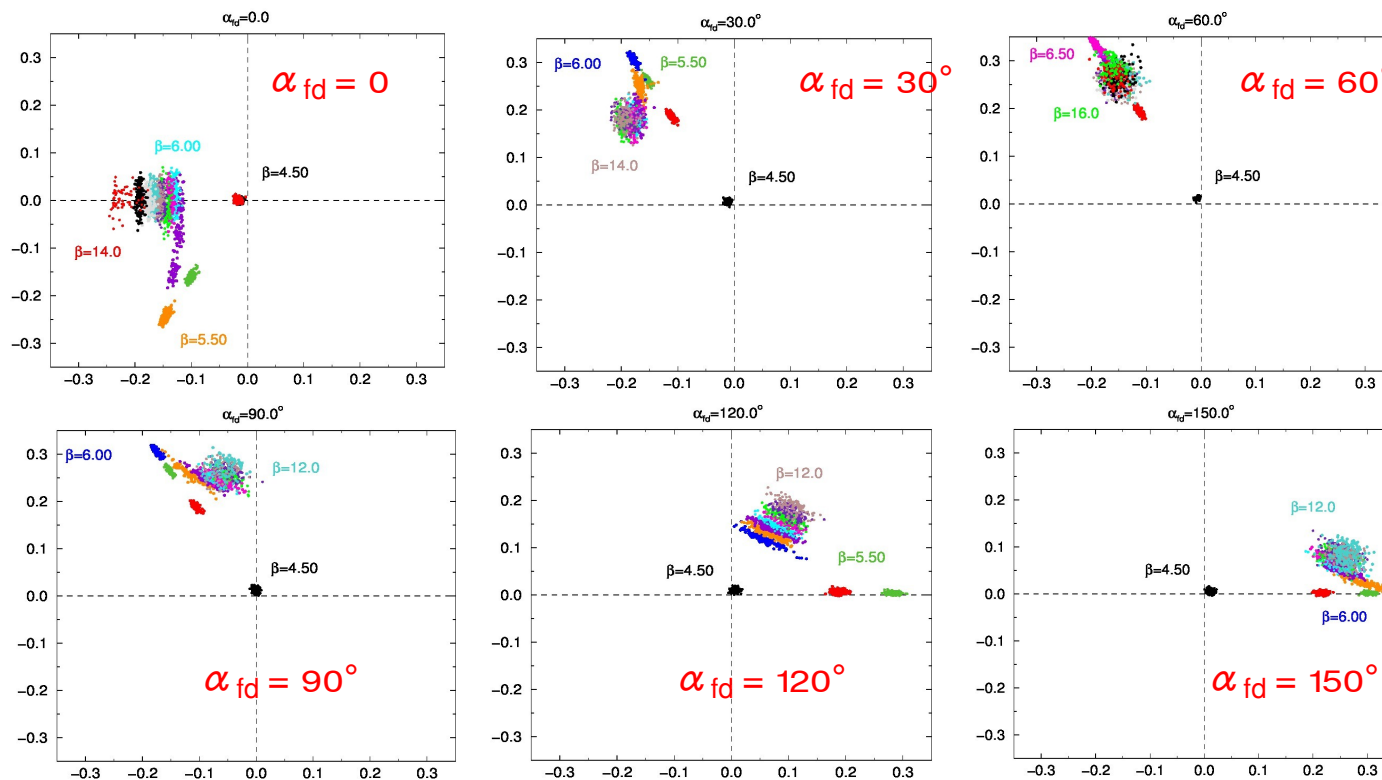
$$e^{-i\alpha_{\text{fd}}} U_{(x, y+N_y), 4} = U_{(x, y), 4}$$

- ▶ 虚時間有限密度 QCD と等価、ポリヤコフループのふるまいも摂動で理解できる

パラメータ空間の相構造 (つづき)

● $(N_{\text{ad}}, N_{\text{fd}}) = (2, 4)$ への拡張

- ▶ 基本表現フェルミオンがある方が "現実的"
- ▶ Z3 対称性が陽に破れるので、真空がユニークに決まる
- ▶ 基本表現の境界条件によって、実現する相が変化するはず



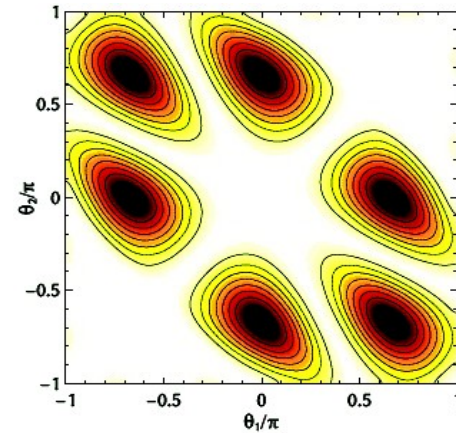
very preliminary

固有値解析

- Trace をとるまえに対角化しておくと、 θ を直接扱うことができる

$$\{e^{i\theta_1}, e^{i\theta_2}, e^{i\theta_3}\} \quad \text{where} \quad \sum_{i=1}^3 \theta_j = 0 \pmod{2\pi}$$

ただし Haar measure $\prod_{i>j} \sin^2 \frac{\theta_i - \theta_j}{2}$ に注意

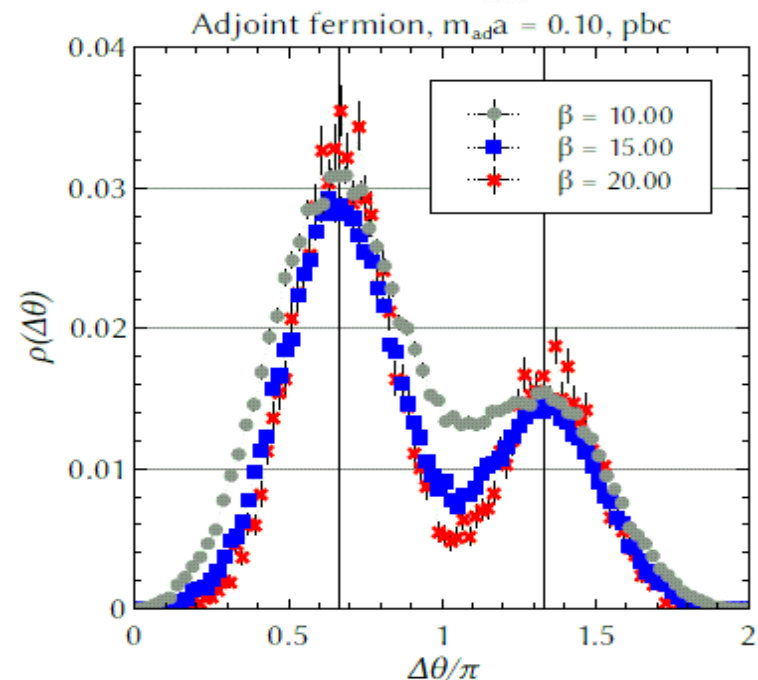


- phase の差 $\Delta \theta = \theta_i - \theta_j$ をみる

▶ C 相に注目: $\theta_H = (0, 2\pi/3, -2\pi/3)$

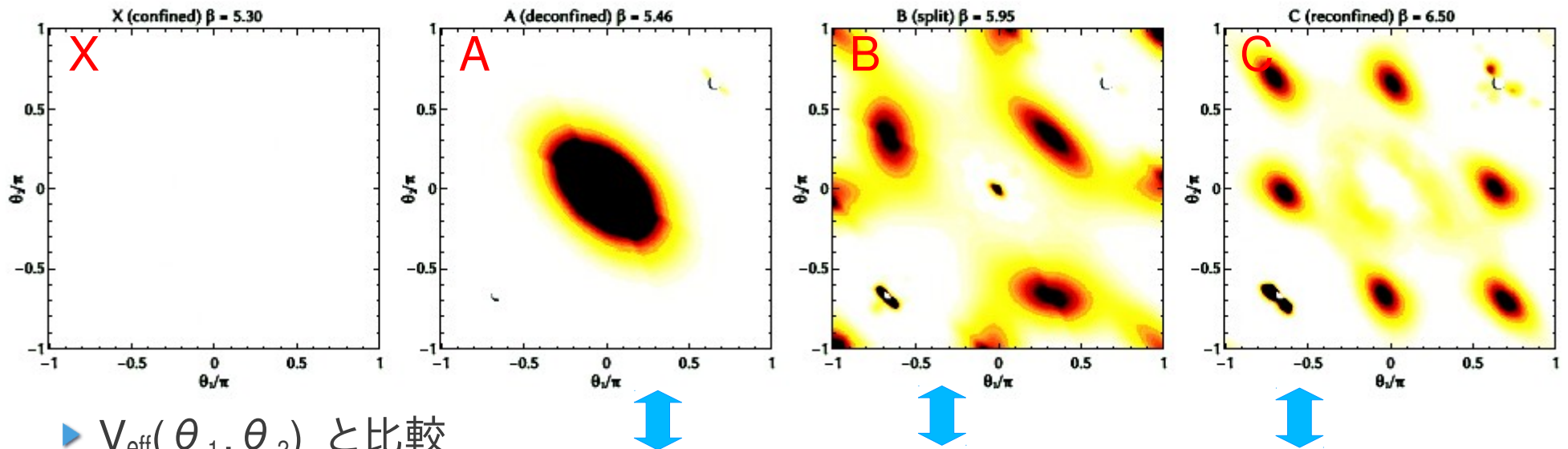
→ $\Delta \theta = 2\pi/3, 4\pi/3$ が 2 : 1

$\beta \rightarrow \text{large}$ で顕著

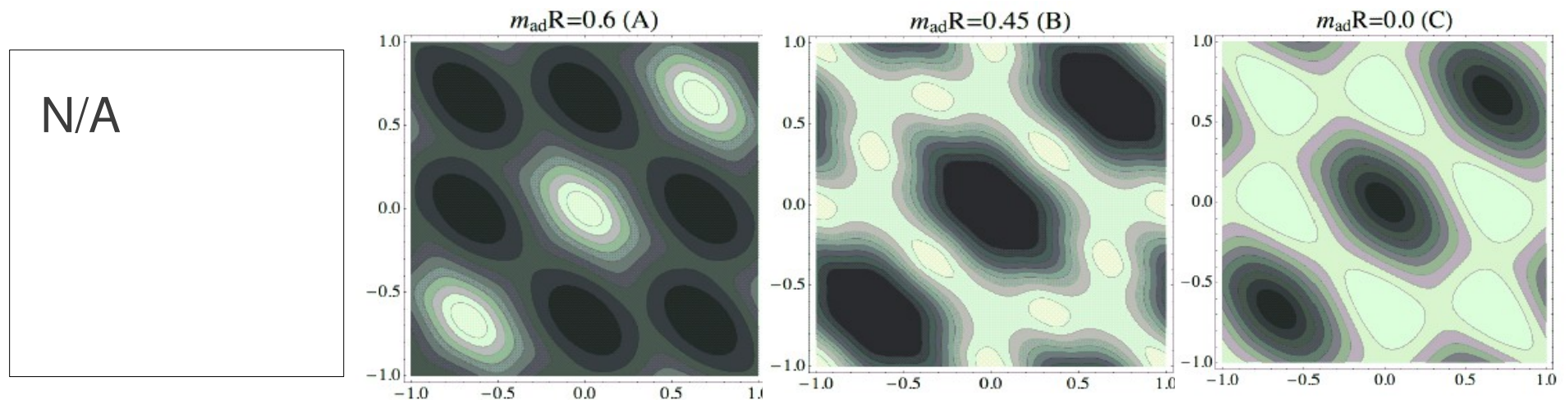


摂動論との比較

- ▶ (θ_1, θ_2) 平面の密度プロット smearing + Haar measure を手で落とす



- ▶ $V_{\text{eff}}(\theta_1, \theta_2)$ と比較



スカラー質量

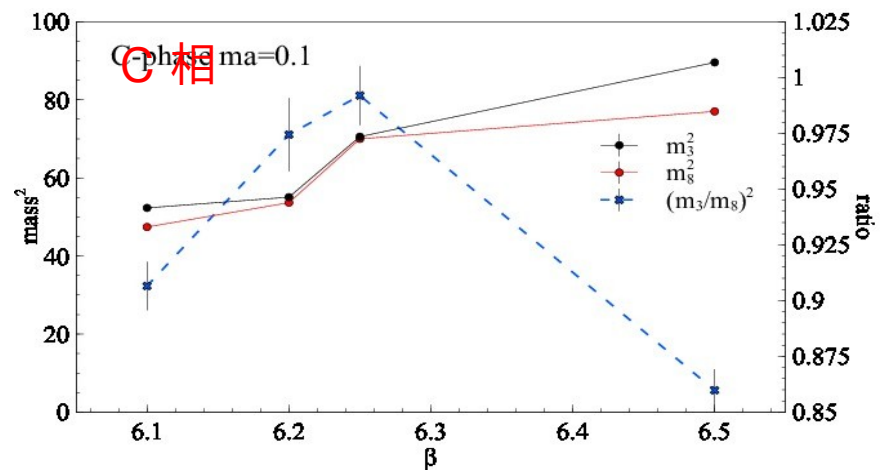
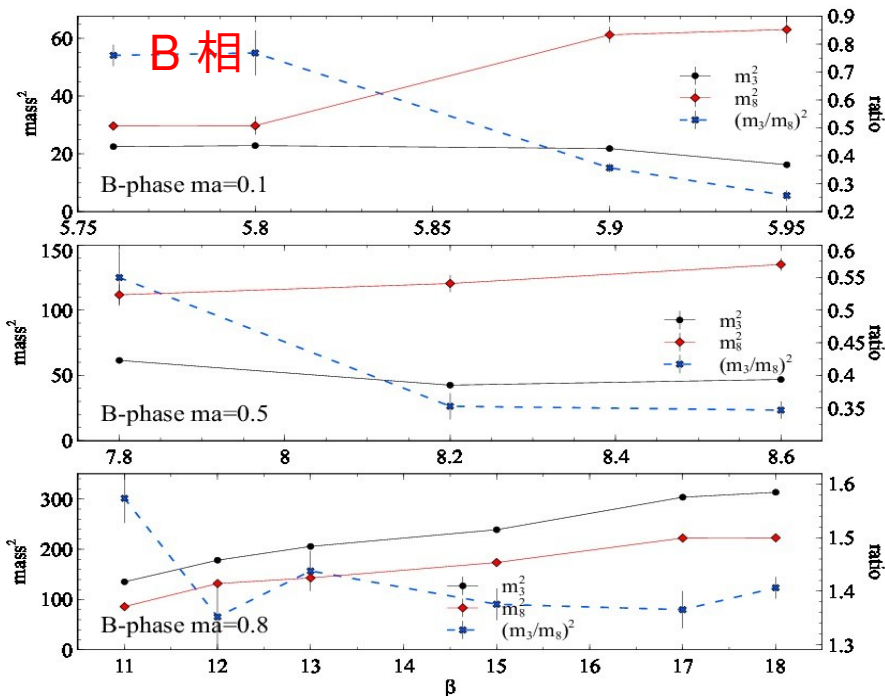
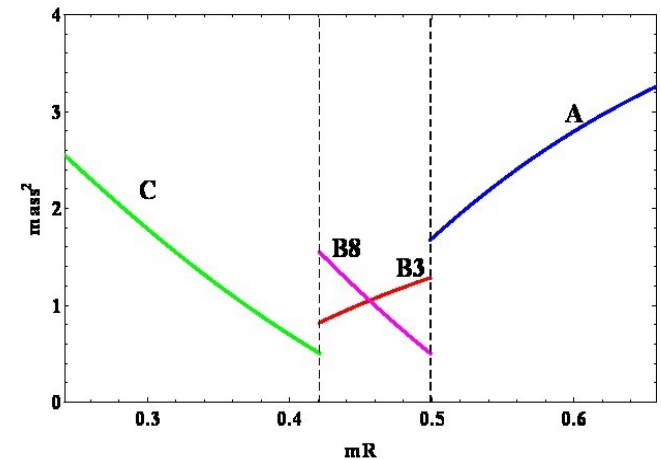
● " ヒッグス場 " $A_y^{(0)} = \sum_{a=1}^8 \phi_a T^a$

▶ $a=3, 8$ は吸収されずに残る自由度 :

$$(\theta_1, \theta_2, \theta_3) = g \sqrt{\frac{\pi R}{2}} \left(\phi_3 + \frac{\phi_8}{\sqrt{3}}, -\phi_3 + \frac{\phi_8}{\sqrt{3}}, -\frac{2\phi_8}{\sqrt{3}} \right)$$

▶ 質量 m_3, m_8 を θ -分布のガウス係数より求めてみた

cf. 連続理論では $V_{1\text{-loop}}(\theta_1, \theta_2)$ の 2 回微分 $\Rightarrow$



摂動の結果と定性的によく一致

まとめ

- 素粒子標準理論を超えた模型を探るため、余剰次元模型に注目した。
 - ▶ 余剰次元模型のゲージ - ヒッグス統合は、細谷機構によるゲージ対称性の自発的破れに基づく
- 格子シミュレーションによる、細谷機構のスタディ (3+1 次元、SU(3))
 - ▶ " 細谷機構は単連結でない時空間の非可換ゲージ理論に普遍的 " であることを見たい。
 - ▶ ポリヤコフループのふるまいからコンパクト化によるゲージ対称性の破れ (のサイン) を --
 - ▶ パラメータ ($N_{\text{ad}}, N_{\text{fd}}$), β , am_{ad} , am_{fd} , α_{fd} をカバーし、相図を得た
 - 相構造は摂動論とよく一致
 - ▶ 固有値より ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$) の情報を抜き出した
 - それ自身はもちろん、スカラー質量のふるまいも摂動論と定性的に一致
 - ▶ やるべきこと
 - **連続極限**: 物理一定のライン上で $\beta \rightarrow \text{large}$
 - **体積効果**: コンパクト次元サイズ / 時空間サイズ の依存性
 - **摂動との (良すぎる) 一致** → 今まではこれらに鈍感な量 / 解析 を見ていたにすぎない

今後の研究

- 細谷機構をさらに検証するため、別の切り口が必要
 - ▶ 質量スペクトラム：ゲージ対称性の破れを直接調べる
 - ・ スカラーモードが有限の質量を持つことが重要
 - ・ 十分な格子サイズで 基本 + 随伴 のゲージ配位を生成
 - ・ オブザーバブル計算の手法 (演算子 , ゲージ etc.) を検討中
 - ▶ fermionic な物理量
 - ・ 異なる相では " ハドロン " の構成に変化が見られるはず
 - ・ たとえば B 相 ($SU(2) \times U(1)$) では $SU(2)$ singlet が有限値？
- GHU ($3+1+1$ 次元) を調べられないか？
 - ▶ フェルミオンの入った高次元シミュレーションはハードルが高い
 - ▶ 有限温度系での電弱対称性の破れ：次元縮約により $3+1+1 \rightarrow 3+1$ 次元