

研究責任者名 Name	野秋 淳一 Noaki, Jun-ichi	所属機関 Affiliation	高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所
受理番号 Proposal No.	大型14/15-16	研究課題名 Program title	細谷機構の非摂動的解明

研究を終了しましたので、下記の通り報告します。

成果の概要

Abstract

(和文)

本研究ではゲージ対称性を自発的に破る新たな可能性を探るため、細谷機構として知られる機構を数値シミュレーションによって非摂動的に調べた。

ゲージ対称性の破れのパターンと相構造を調べるため、さまざまなセットアップのもとで数値シミュレーションを行った結果、過去に知られている結果を再現しつつ、摂動論による予言とシミュレーション結果とが完全に対応することを見いだした。この果を論文にまとめ、出版することができた。

より理論的に信頼できるフェルミオン定式化のためのコード開発と、系統誤差を調べるためのより大規模なシミュレーションも並行して行った。

(英文)

In this study, we investigated the Hosotani mechanism non-perturbatively by a numerical simulation. Toward our final goal, namely the non-perturbative establishment of this mechanism, we examined the pattern of the symmetry breaking and the phase structure of the theory with a variety of simulation parameters. As a result, we found a perfect match between the perturbative prediction and the simulation data after confirming previous works. These achievements have been published already.

We tested our code for our future runs including those with different fermion formalism or larger lattice volumes.

研究成果を公開しているホームページアドレス

開発したシミュレーションコードについて：

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

研究成果の 公表	口頭研究発表 件数	査読つきの 学術論文数	プロシーディング 論文数	その他 (投稿中を含む)
	7	1	0	0

成果の公表リスト（それぞれの枠に番号をつけて記入願います。）

口頭研究発表 Presentations at scientific meetings concerning the program		
1.	細谷裕、"Lattice simulation of the Hosotani mechanism"、 International Workshop on Theoretical Particle Physics 2013、天橋立、2013年11月6日	
2.	野秋淳一、“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”、HPCI 戦略プログラム分野5 全体シンポジウム、富士ソフトアキバプラザ、2014年3月4日	
3.	G. Cossu, "Hosotani mechanism on the lattice"、日本物理学会 第69回年次大会 (東海大学)、2014年3月29日	
4.	野秋淳一、“格子シミュレーションによる細谷機構の理解” (ポスター発表) 基研研究会「素粒子物理学の進展2014」、基礎物理学研究所、2014年7月31日	
5.	細谷裕、"Hosotani mechanism and gauge symmetry breaking on the lattice"、Summer Institute 2014、富士吉田、2014年8月25日	
6.	幡中久樹、“格子ゲージ理論での細谷機構による相転移と質量生成”、研究会「熱場の量子論とその応用」、理研和光 2014年9月5日	
7.	野秋淳一、“格子シミュレーションによる細谷機構の研究”、研究会「離散的手法による場と時空のダイナミクス2014」、慶應大学日吉キャンパス 2014年9月14日	
査読つきの学術論文(雑誌名等には 巻、頁、発表年を記載) (* 不足する場合には追加願います。		
Refereed Journal Articles (name of journal, volume, page, year)		
1	著者名 Author	G. Cossu, H. Hatanaka, Y. Hosotani and J. Noaki
	タイトル title	"Polyakov loops and the Hosotani mechanism on the lattice"
	雑誌名 name of journal	Phys. Rev. D 89 , 094509
	URL	http://journals.aps.org/prd/pdf/10.1103/PhysRevD.89.094509
2	著者名	
	タイトル	
	雑誌名等	
	URL	
3	著者名	
	タイトル	
	雑誌名等	
	URL	
プロシーディング論文(雑誌名等には 巻、頁、発表年を記載) (* 不足する場合には追加願います。		
International Conference Proceedings (name of journal, volume, page, year)		
1.	著者名 Author	
	タイトル title	
	雑誌名等 name of journal	
	URL	
2.	著者名	
	タイトル	
	雑誌名等	
	URL	
3.	著者名	
	タイトル	
	雑誌名等	
	URL	
その他 (学位論文、紀要、投稿中の論文を含む) (著者、タイトル、論文種別、URL を記載) Others (thesis for a degree, bulletin, papers to be published, etc.)		
特記 (本研究に関係した、新聞記事・著作、受賞など) (過去に遡っても構いません。) Special Notes (newspaper article, literary works, awards, etc.)		

平成 25–26 年度大型シミュレーション研究 「細谷機構の非摂動的な解明」実施報告書

KEK 素粒子原子核研究所
野秋淳一

2014 年 12 月 1 日

1 研究組織

当研究グループ sc-cmpct のメンバーは以下の通りである。

研究責任者	野秋淳一	KEK 素粒子原子核研究所 特任助教
共同研究者	COSSU, Guido 幡中久樹, HETRICK, James E. 細谷裕	KEK 素粒子原子核研究所 研究員 KIAS 研究員 Physics Department, University of the Pacific 教授 大阪大学大学院理学研究科 教授

野秋はゲージ配位生成とコード開発を行い、データ解析の基礎的部分を担当した。Cossu はより進んだデータ解析を行った。幡中はゲージ・ヒッグス統合の立場からデータをまとめ上げに関する助言を行い、並行した摂動計算を行った。Hetrick は主にゲージ場質量の計算に関する研究を行った。細谷機構の提唱者である細谷は素粒子現象論の立場から野秋・Cossu とともに数値シミュレーションを立案し、得られた結果をまとめ上げた。

2 研究の目的

現在の素粒子物理における焦点は、2012 年に発見された“ヒッグス粒子”の起源と電弱対称性の破れとを同時に説明することだといえる。余剰次元のコンパクト化によるアハラノフ・ボーム位相の力学としてそれを説明しようとするのが“ゲージ-ヒッグス統合”である。その基礎を与える細谷機構 [1] は、ゲージ理論の性質に根差したものだという点で、標準理論の一部であるヒッグス機構と大きく異なっている。

ゲージ-ヒッグス統合理論にはいくつかの解決すべき問題がある。特に 4 次元時空+余剰次元の高次元場の理論であり、量子場の理論として定義できているかどうか分からないこと、および、コンパクト化がゲージ対称性を破り得ることが摂動論でしか確立されていないことがあげられる。これらはしばしば同列に議論されているが、本来高次元場の理論の困難と細谷機構とは独立である。これらを明

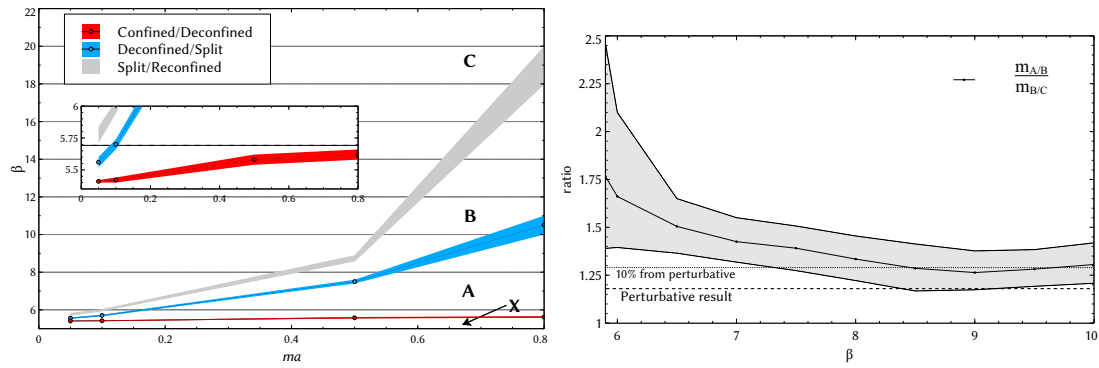


図 1: (左) パラメータ空間における相図 (右) 相転移質量点の比

確に切り離して議論するために、我々はくりこみ可能な時空 3 次元+余剰 1 次元 (すなわち 4 次元) のゲージ理論を考える。

3 これまでの研究

本研究で行うのは、4 次元 $SU(3)$ ゲージ理論のうち 1 次元がコンパクト化された理論の数値シミュレーションである。パラメータ空間を網羅するようなゲージ配位生成を行い、そのうえでコンパクト次元方向のポリヤコフループを計算してゆく。ポリヤコフループの値とゲージ対称性の破れとの関連は細谷のアイデア [2] に依る。すなわちモデルの含む随伴表現フェルミオンの存在によって、ポリヤコフループの値が QCD では生じないある位相をもつことが、3 つあるアハラノフ・ボーム位相に不均衡をもたらし、ゲージ対称性の破れに至る。対称性の異なる 4 つの相が预言され、これらを X, A, B, C とラベル付けして特徴を纏めると、以下のようになる。

X 相：ゲージ対称性は $SU(3)$ のまま。 Z_3 対称性が破れている。

A 相：ゲージ対称性は $SU(3)$ のままだが、 Z_3 対称性が回復している。

B 相： $SU(2) \times U(1)$ のゲージ対称性を持つ。

C 相： $U(1) \times U(1)$ のゲージ対称性を持つ。

我々はスタッガードタイプの格子フェルミオンを用い、単一の格子サイズ $16^3 \times 4$ を用いた。まずは随伴表現フェルミオンを含む場合について先行する研究 (ただし異なる動機による) [3] の結果を追試したのち、この場合と基本表現フェルミオンを含む場合についてより多様なパラメータ領域を調べた。図 1 の左側は、格子シミュレーションにおけるパラメータ空間 (ゲージ結合定数、フェルミオン質量) の相図である。右側の図は $A \rightarrow B$ および $B \rightarrow C$ の相転移質量点の比を摂動による预言と比較したものである。

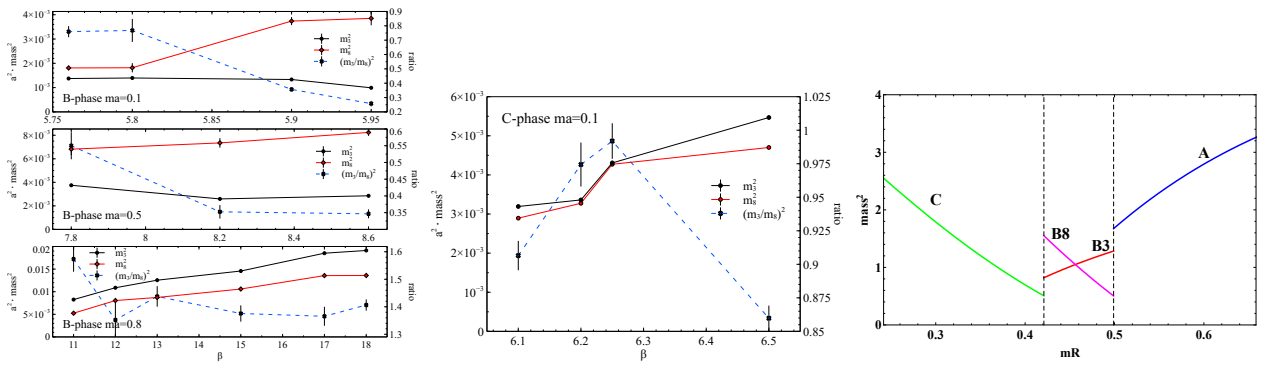


図 2: (左) B 相においてアハラノフ・ボーム位相の分布から再構成したスカラー質量、(中央) C 相におけるスカラー質量、(右) 1-loop 有効ポテンシャルから求めたスカラー質量

4 今期における成果

我々はポリヤコフ・ループのみならず 3 つのアハラノフ・ボーム位相の固有値の分布も詳細に測定した。結果としてアハラノフ・ボーム位相のふるまいが、摂動論により予言されるものと定性的に一致していることを見出した。さらには、このアハラノフ・ボーム位相の分布からポテンシャルを逆算し、スカラー質量を見積った。図 2 の左側が B 相、中央が C 相における格子シミュレーション結果である。これらと 1-loop 有効ポテンシャルから得たスカラーポテンシャルのふるまい (右側の図) とを比較すると、特に B 相において、フェルミオン質量の増大とともに 2 種類の質量の上下関係が変化するふるまいが一致している。

以上のことから、細谷機構が非摂動的にも存在していることを強く示唆している。前項の成果と合わせて発表した論文 [4] は、Physical Review D 誌に掲載された。これと関連し、前シミュレーション期間中に日本物理学会にて 1 件、国内の研究会においても 6 件の (口頭およびポスター) 発表を行った。

しかしながら、非可換ゲージ理論における細谷機構の普遍性を示す目的からみれば、これらの成果はまだ入り口にすぎず、まずは離散化と有限体積による影響を見積るため規模を拡張して数値シミュレーションを行う必要がある。来期に跨るプロジェクトの手始めとして、我々は体積を拡張した数値シミュレーションを行った。一方で、ターゲット理論のフレーバー数をより自由に変えるためのコード開発とテストランを行った [5, 6]。これらを完成・継続して、これまでに得た結果を揺るぎないものとするべく多角的な傍証を積み重ねていく。

5 今後に向けて

本研究で得られた成果に立脚し、今後成さねばならないこととして、ゲージボソンの質量スペクトルを数値シミュレーションで調べることが挙げられる。さらにはこの枠内にとらわれずに、格子シミュレーションによるゲージ-ヒッグス統合の物理への貢献について、手法と実現可能性とを検討中である。

我々がもうひとつの焦点として捉えているのは、非可換ゲージ理論のもつ根本的性質として細谷機構を調べ、ゲージ場の理論自体の深い理解を得ることであり、これを来期の研究の目標としている。

すなわち、ゲージ対称性の破れのパターンと、それに伴う相転移 (あるいはクロスオーバー) について詳しく調べることで、これまで非摂動的手法で議論されてきた描像と細谷機構とを結びつけることが可能になり、ゲージ場の理論について相乗的な理解が得られると期待している。

参考文献

- [1] Y. Hosotani, *Phys. Lett. B* **126**, 309 (1983); *Ann. Phys. (N.Y.)* **190**, 233 (1989).
- [2] Y. Hosotani, AIP Conf. Proc. **1467**, 208 (2012) [arXiv:1206.0552 [hep-ph]].
- [3] G. Cossu and M. D’Elia, *JHEP* **0907**, 048 (2009)
- [4] “Polyakov loops and the Hosotani mechanism on the lattice”, G. Cossu, H. Hatanaka, Y. Hosotani and J. Noaki, *Phys. Rev. D* **89**, 2014 (094509).
- [5] “JLQCD IroIro++ lattice code on BG/Q”, G. Cossu, J. Noaki, S. Hashimoto, T. Kaneko, H. Fukaya, P. A. Boyle, J. Doi, [arXiv:1311.0084 [hep-lat]].
- [6] http://suchix.kek.jp/guido_cossu/documents/DoxyGen/html/index.html