

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03662

研究課題名(和文) 格子上の位相荷の不定性とクォーク質量の定義

研究課題名(英文) Uncertainty of topological charge on the lattice and definition of quark masses

研究代表者

山田 憲和 (Yamada, Norikazu)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・講師

研究者番号：50399432

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：位相荷に着目し、格子ゲージ理論に基づく数値的研究を行った。2次元CP\$ 模型では、 $\beta = 0$ のときgaplessでCP対称性は破れないことが知られているが、SU(2)も同様の性質を示すか否かが長年の疑問であった。これを調べるために、SU(2)格子ゲージ理論上の位相荷の smearing に対する反応を詳細に調べたり、sub-volume法という符号問題を巧みに避ける新手法を開発する等して、4次元SU(2)ゲージ理論は $\beta = 0$ で自発的にCP対称性は破れることを指摘した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ゲージ理論に $\beta = 0$ 項を導入すると作用が複素数になることから生じる符号問題のため通常の計算手法が使えず、これまで理論の $\beta \rightarrow 0(1)$ の領域を調べる手段はなかった。今回開発したsub-volume法により複素作用を持つ系の非摂動領域の研究が可能となった。この新手法については今後詳細を詰める必要はあるが、応用として例えば有限密度QCDの非摂動ダイナミクスの研究が挙げられる。

研究成果の概要(英文)：Focusing on the topological charge, we carried out lattice numerical study. At $\beta = 0$, 2d CP\$ model becomes gapless without CP violation. Whether the same happens or not has been a long-standing problem. We carefully looked at the response of the topological charge on the lattice against the smearing procedure and developed a new method called "sub-volume method", which avoids notorious sign problem, to study this problem. It turned out that 4d SU(2) gauge theory shows spontaneous CP violation at $\beta = 0$.

研究分野：素粒子論

キーワード：素粒子論 数値シミュレーション 非摂動計算 CP対称性 トポロジー

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

Strong CP 問題の一つの有力な解はアクシオン模型の導入であるが、もう一つの解は massless quark の存在である。後者に関しては既に多くの研究があり、その殆どは否定的な結果を導いているが、これまで見落とされている考慮すべき点があるため未だ完全に排除されたとは言えない状況である。見落とされている点とは、quark がトポロジカルな物体との相互作用を通じて質量を獲得する可能性である。本来であれば、この質量の大きさを直接数値計算で評価したところではあるが、非常に計算コストがかかるため、別の効果的な手法が望まれていた。

Quark 質量の問題とは別に、strong CP 問題のより深い理解は SU(N)ヤン=ミルズ理論における真空の理解とも関連しているはずである。これまで格子状で計算された諸量は $\theta = 0$ の値であり、有限の θ のときのダイナミクスや真空の性質は殆ど分かっていなかった。それは、 θ 項を導入した途端に作用が複素数になり、従来の数値手法が使えなくなってしまうという問題(符号問題)が生じるからである。

2. 研究の目的

Quark がトポロジカルな物体と相互作用することにより獲得する additive な質量の定量的な評価を直接行うことは難しいため、まず位相荷を担っているトポロジカルな物体の性質について詳しく調べることにした。実際の計算は格子ゲージ理論に基づく数値シミュレーションで行うが、まず「格子上の位相荷」の緒性質を理解する必要がある。さらに、「格子上の位相荷」に関する情報から「連続理論の位相荷」の情報を適切に抽出する方法も確立しなければならない。これに関連して、真空や温度とともに基底状態はどう変化するのか等についての理解を目指した。

3. 研究の方法

格子ゲージ理論に基づく数値シミュレーションを用いて研究を行った。具体的には、ゲージ配位を生成しその上で位相荷密度、及び位相荷を計算する。生の配位の位相荷分布やその積分値は、artificial な short distance fluctuation により歪められていることが知られている。この歪みを取り除くために、通常 smearing と呼ばれる操作を施すことにより、配位を滑らかに変形する。その結果 global な位相荷は本来の値に安定する。ところが、この smearing の操作は本来取り出したい local な情報をも変形してしまう。よって、本来の物理的な位相荷分布を正しく抽出する手法が必要となる。これを開発するために、各 smearing step 毎に分布を書き出すなどして、smearing に対する分布の response を調べた。

4. 研究成果

まず、「格子状の位相荷」の緒性質、特に smearing により分布がどのような影響を受けるかについて調べた。Smearing 数と global な位相荷の関係を調べたところ、回数が少ない間は激しく増減するが、ある回数を超えると緩やかに変化することが分かった。また、インスタントン数が変わるとき実際には何が起きているのか等を詳細に調べた。これは、まず生の配位に多く含まれる short distance の激しい fluctuation が速やかに滑らかにされ、それが終わると後はゆっくりと変化していつているものと思われる。よって、変化が緩やかに変わった smearing の回数付近のデータを拾って、smearing の回数=0 に外挿することにより、本来の global な位相荷が抜き出せることが予想される。実際、このようにして得られた位相感受率を他の信頼できる方法で計算したものと比べるとよく一致するため、上記の解釈は正当化される。次にここで得られた知見を真空の理解に応用した。真空エネルギー密度は、 $\ll 1$ では、

$$\langle \mathcal{E} \rangle = \frac{1}{2} (a^2 + b_2 a^4 + b_4 a^6 + \dots)$$

のように展開することができる。の係数は、原理的には格子計算により決定することができる。この計算を4次元の SU(2)ヤン=ミルズ理論で行った。と b_2 を求めることはできたが、 b_4 については統計数が足りなかったため有意な結果を得ることができなかった。ところで、SU(N) ヤン=ミルズ理論ではしばしば $N \rightarrow \infty$ 極限を考えることが有用である。その議論によると、 \mathcal{E} は極限で有限であり、 b_2 は0になることが分かっている。SU(2)は無有限から最も遠い理論であるが、それが SU(N) の性質をどれだけ保っているかは興味深い。そこで、これまでいろんなグループが行ってきた SU(N)理論の様々な N での \mathcal{E} や b_2 の結果を集めて、各を $1/N^2$ に対して plot し

てみた。すると、 β (は string tension) は殆ど N に依存しないこと、そして b_2 は $SU(2)$ の結果を含めて原点を通る直線にのることを見出した。つまり、 $SU(2)$ 理論は単純な $SU(N)$ 理論と定性的には同じ性質を示し、特別な理論では無いことが推察された。さらに、sub-volume 法を開発し、4次元の $SU(2)$ ゲージ理論では $\beta = \beta_c$ のとき、CP 対称性が自発的に破れることを見出した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kitano Ryuichiro, Yamada Norikazu, Yamazaki Masahito	4. 巻 2021
2. 論文標題 Is $N = 2$ Large?	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP02(2021)073	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kitano Ryuichiro, Matsudo Ryutaro, Yamada Norikazu, Yamazaki Masahito	4. 巻 822
2. 論文標題 Peeking into the vacuum	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136657 ~ 136657
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136657	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 2件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Norikazu Yamada
2. 発表標題 Peeking into the vacuum of 4d SU(2) Yang-Mills theory
3. 学会等名 Cambridge High Energy Workshop 2021 -Axion Physics- (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Norikazu Yamada
2. 発表標題 Peeking into the vacuum Of 4d Yang-Mills theory
3. 学会等名 Lattice 21 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Norikazu Yamada
2. 発表標題 Peeking into the vacuum
3. 学会等名 YITP workshop QCD phase diagram and lattice QCD (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関