

研究責任者名 Name	大川 正典 Okawa Masanori	所属機関 Affiliation	広島大学大学院理学研究科 Hiroshima University
受理番号 Proposal No.	大型-12/13-01	研究課題名 Program title	ツイストされた時空縮約モデルの数値的研究 Numerical study of twisted space-time reduced model

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

近年、アジョイント表現に属するフェルミオンを伴った $SU(N)$ ゲージ場理論が大きな関心を呼んでいる。その理由のひとつに、AdS/CFT 対応がある。これによると、4次元超対称ゲージ理論と、Anti de Sitter 時空を背景にもつ 5次元超弦理論が対応している。特にゲージ理論でラージ N 極限をとると、対応する弦理論は古典的な超重力理論となる。本年度は、アジョイント・フェルミオンを持つラージ N ゲージ理論を、ツイストされた時空縮約モデルを用いて研究した。

2つのアジョイントフェルミオンを持つ2フレーバー理論は、 N の値に関係なくコンフォーマルな理論であると考えられている。 $N = 289$ として弦定数をクォーク質量 m の関数として計算し、クォーク質量を小さくしたとき、弦定数が急速にゼロに近づき、 $m=0$ でゼロになるように見えることを示した。これは赤外固定点で支配されるコンフォーマル理論の特徴であり、理論的な予想を非摂動的に確かめたことになる。1つのアジョイントフェルミオンを持つ1フレーバー理論は、ラージ N 極限で、完全反対称表現の2フレーバーフェルミオン理論と等価であると考えられており、さらに後者はカラー $SU(3)$ の2フレーバーファンデメンタル・フェルミオンと関係しており、現象論的にも非常に注目されている。弦定数をクォーク質量 m の関数として計算し、2フレーバー理論の場合と異なり、クォーク質量を小さくしても弦定数は有限の値にとどまり、理論はコンファインングなように見えることを示した。

Abstract

In recent years, $SU(N)$ gauge theories coupled with fermions in the adjoint representation have received much attention. One of the reasons is the AdS/CFT correspondence. According to this, the four-dimensional supersymmetric gauge theory is related to the five-dimensional superstring theory with a background in Anti de Sitter space-time. Taking the large N limit in the gauge theory, corresponding string theory becomes a classical supergravity. This year, I have studied the large N gauge theory coupled with adjoint fermions using the twisted space-time reduced models.

Two flavor theory having two adjoint fermions is expected to be conformal regardless the value of N . I have calculated the string tension as a function of quark mass m at $N = 289$. I find that the string tension approaches zero rapidly as m decreases, and it appears to be zero at $m = 0$. This is a feature of the conformal theory governed by an infrared fixed point, thus confirming the theoretical expectation non-perturbatively. In the large N limit, one flavor theory having a single adjoint fermion is thought to be equivalent to the two flavor fermion theory in completely anti-symmetric representation. The latter theory has received much phenomenologically attention, since it is closely related the color $SU(3)$ two flavor fundamental fermions. Unlike the case of two flavors theory, the calculated string tension remains finite even the quark mass deceases, supporting that this theory is a confining theory.

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)
	0	3	3	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. 2.		
査読付きの学術論文(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	A. Gonzalez-Arroyo and M. Okawa
	タイトル title	The string tension from smeared Wilson loops at large N
	雑誌名	Phys. Lett. B718 (2013) 1524
	URL	http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370269312012804
2	著者名	A. Gonzalez-Arroyo and M. Okawa
	タイトル	Twisted space-time reduced model of large N QCD with two adjoint Wilson fermions
	雑誌名等	Phys. Rev. D88 (2013) 014514
	URL	http://prd.aps.org/abstract/PRD/v88/i1/e014514
3	著者名	M. Garcia-Perez, A. Gonzalez-Arroyo and M. Okawa
	タイトル	Spatial volume dependence for 2+1 dimensional SU(N) Yang-Mills theory
	雑誌名等	JHEP 1309 (2013) 003
	URL	http://link.springer.com/article/10.1007%2FJHEP09%282013%29003
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	M. Garcia-Perez, A. Gonzalez-Arroyo, L. Keegan and M. Okawa
	タイトル title	Mass anomalous dimension from large N twisted volume reduction
	雑誌名等	PoS (Lattice 2013) 098
	URL	投稿中
2.	著者名	A. Gonzalez-Arroyo and M. Okawa
	タイトル	Twisted reduction in large N QCD with adjoint Wilson fermions
	雑誌名等	PoS (Lattice 2013) 099
	URL	投稿中
3.	著者名	M. Garcia-Perez, A. Gonzalez-Arroyo and M. Okawa
	タイトル	Perturbative analysis of twisted volume reduced theories
	雑誌名等	PoS (Lattice 2013) 342
	URL	投稿中
その他 (学位論文、紀要、投稿中の論文を含む) (URL を記載) Others (thesis for a degree, bulletin, papers to be published, etc.)		
1. URL: 2. URL:		
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.)		
1. 2.		

高エネルギー加速器研究機構・大型シミュレーション研究
平成 24-25 年度 実施報告書

研究課題名 ツイストされた時空縮約モデルの数値的研究
課題グループ名 sctek
研究代表者 大川正典 広島大学大学院理学研究科教授

素粒子の標準モデルは、その基礎を $SU(N)$ 非可換ゲージ理論においている。一般に $SU(N)$ 非可換ゲージ理論は非常に複雑な構造を持っているが、4次元格子上で定義された $SU(N)$ 格子ゲージ理論は、 N を無限に持っていった極限で時空の自由度を内部空間に吸収できてしまう可能性がある。実際、江口・川合は格子点が1点しかない時空縮約理論を考えた [1]。現在この理論は江口・川合模型 (EK-model) と呼ばれている。EK-model には $Z(N)$ 対称性があり、この対称性が破れていなければ、4次元格子上で $SU(N)$ ゲージ理論と EK-model は N を無限に持っていった極限で同等である。しかしこの対称性は弱結合相および中間結合相で自発的に破れてしまい、2つの理論は等しくない。この困難を解決するために、Gonzalez-Arroyo と申請者は、EK-model にツイストされた境界条件を課した twisted EK-model (TEK-model) を提案した [2, 3]。

TEK-model が正しく $SU(N)$ 格子ゲージ理論を再現するのであれば、ラージ N 極限での弦定数が計算できるはずである。ラージ N ゲージ理論は有限な N の理論に比べ構造は著しく単純化されるが、いまだに非摂動的な物理量の計算が行われたことはない。本年度の研究の大きな目的は、TEK-model を用いてラージ N ゲージ理論の弦定数 σ の計算を世界に先駆けて行うことであった。弦定数を求めることにより、理論に物理的なスケールが導入できるのでこの研究は非常に重要である。図 1 にその結果を要約する [4]。緑のデータが $N = 841$ の TEK モデルで連続理論の弦定数を求めたものである。赤のデータは通常のゲージ理論で、 $N = 3, 4, 5, 6, 8$ として連続理論の弦定数を求めたものであり、弦定数の N 依存性は明らかに $1/N^2$ である。青の直線はゲージ理論の弦定数の N 無限大への外挿を示しており、外挿値は TEK モデルで弦定数を直接計算した値と完全に一致している。TEK モデルの正しさが証明されたと同時に、ラージ N ゲージ理論の弦定数が外挿せずに直接求まったことになる。

近年、アジョイント表現に属するフェルミオンを伴った $SU(N)$ ゲージ場理論が大きな関心を買っている。その理由のひとつに、AdS/CFT 対応がある。これによると、4次元超対称ゲージ理論と、Anti de Sitter 時空を背景にもつ 5次元超弦理論が対応している。特にゲージ理論でラージ N 極限をとると、対応する弦理論は古典的な超重力理論となる。アジョイント・フェルミオンを持つラージ N ゲージ理論も時空を縮約したモデルを考えることができる。本年度より、アジョイント・フェルミオンを含む時空縮約モデルの研究を始めているが [5, 6]、動的クォークの効果を取り入れたシミュレーションには多くの計算時間が必要であり、確定的な結果を出すには複数年にまたがる研究が必要である。モデルの性質はフレーバー数に強く依存しており、以下に示すような研究を行った。

1) 2 フレーバー理論の研究

この理論は N の値に関係なく、コンフォーマルな理論であると考えられている。実際、くりこみ群のベータ関数の 1 次と 2 次の係数は N によらず、また $N = 2$ の理論は色々な研究者により詳細な解析がなされ、それらの結果はコンフォーマルな理論であることを支持している。ただし、質量異常次元の赤外固定点での値 γ_* は 0.3 程度となり、extended technicolor で要求される $\gamma_* \sim 1$ とは大きくかけ離れている。

クォーク質量がゼロのコンフォーマルな理論の特徴は、質量の次元をもつ物理パラメーターがないことであり、必然的に質量の2乗の次元をもつ弦定数はゼロになる。本研究では、 $N = 289$ として弦定数をクォーク質量の関数として計算を行っている。図2は現段階での結果である。計算は't Hooft カップリングの逆 $b = 1/g^2 N = 0.35$ で行った。横軸のクォーク質量 m_q は、positive hermitian Wilson-Dirac operator $Q^2 = (D_W \gamma_5)^2$ の最低固有値 λ から $m_q = \sqrt{\lambda}/(2\kappa)$ として求めたものである。 κ は Wilson フェルミオンのホッピングパラメータである。quark 質量 m_q を小さくしてゆくと弦定数は急速にゼロに近づき、 $m_q = 0$ でゼロになるように見える。理論が質量異常次元 γ_* の赤外固定点で支配されているとすると弦定数は $m_q^{2/(1+\gamma_*)}$ と振る舞うはずであるが、現時点での計算結果からは、質量異常次元の値を正しく評価するには至っていない。今後の研究の最重要の目的は、より多くのホッピングパラメータ κ での計算を行い、弦定数やフェルミオン行列の固有値分布から、質量異常次元の精度良い決定を行うことである。

2) 1フレーバー理論の研究

この理論はラージ N 極限で、完全反対称表現の2フレーバーフェルミオン理論と等価であると考えられており、さらに後者はカラー $SU(3)$ の2フレーバーファンデメンタル・フェルミオンと関係しており、現象論的にも非常に注目されている。フレーバー数が2の場合には、HMC アルゴリズムが使えるコード開発は比較的簡単であったが、1フレーバーの場合はRHMC アルゴリズムを使う必要がある。本年度前半でコード開発を終え、後半からは大規模シミュレーションを行なった。現時点での結果を図3に示す。2フレーバー理論の場合と異なり、クォーク質量 m_q を小さくしても弦定数は有限の値にとどまり、理論はコンファイニングなように見える。確定的な結論を出すには、2フレーバー理論と同様に、より多くのホッピングパラメータ κ での計算が必要であり、この研究を今後行う予定である。

参考文献

- [1] T. Eguchi and H. Kawai, "Reduction of dynamical degrees of freedom in the large N gauge theory", Phys. Rev. Lett. **48** (1982) 1063.
- [2] A. Gonzalez-Arroyo and M. Okawa, "Twisted Eguchi-Kawai Model: a reduced model for large N lattice gauge theory", Phys. Rev. D **27** (1983) 2397.
- [3] A. Gonzalez-Arroyo and M. Okawa, "large N reduction with the twisted Eguchi-Kawai model", JHEP 1007 (2010) 043.
- [4] A. Gonzalez-Arroyo and M. Okawa, "The string tension from smeared Wilson loops at large N ", Phys. Lett. B718 (2013) 1524.
- [5] A. Gonzalez-Arroyo and M. Okawa, "Twisted space-time reduced model of large N QCD with two adjoint Wilson fermions", Phys. Rev. D **88** (2013) 014514.
- [6] A. Gonzalez-Arroyo and M. Okawa, "Twisted reduction in large N QCD with adjoint Wilson fermions", PoS LATTICE2013 (2013) 099.

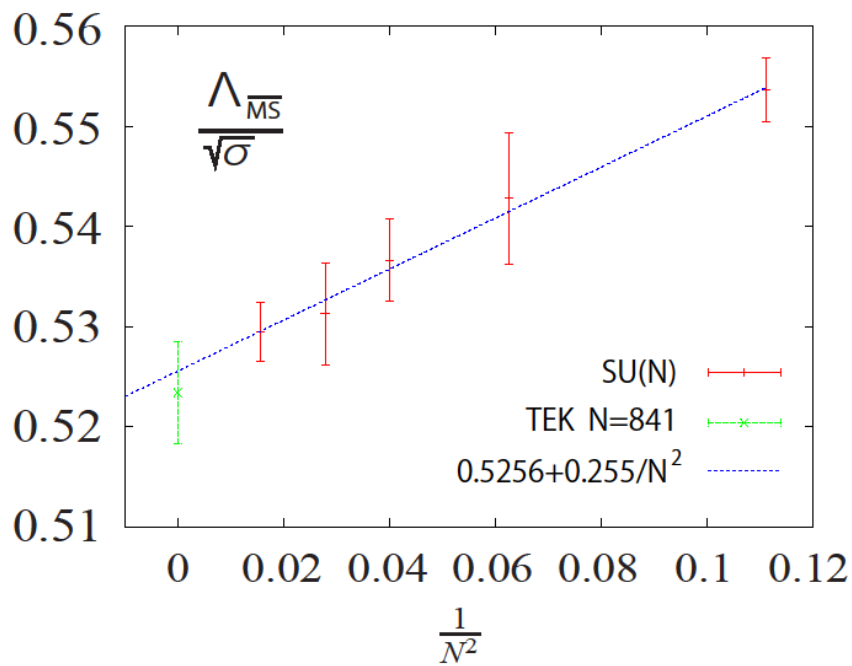


图 1

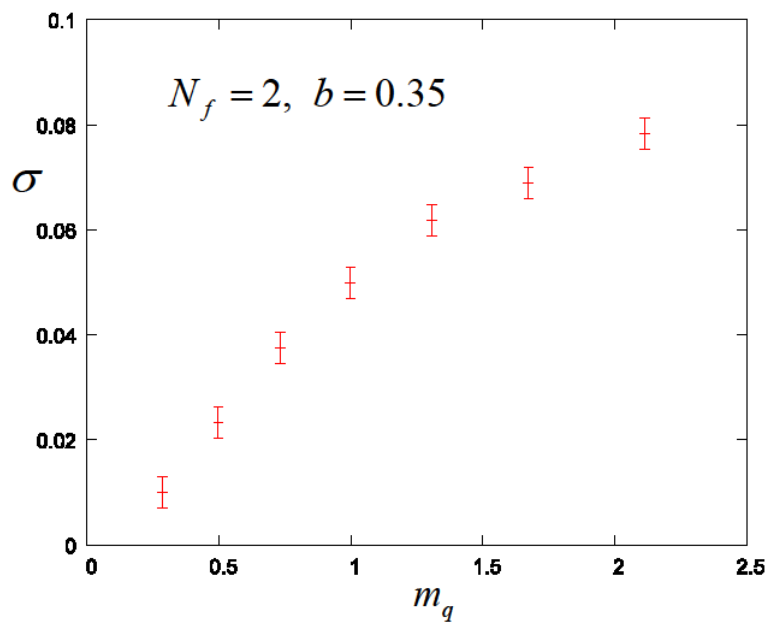


图 2

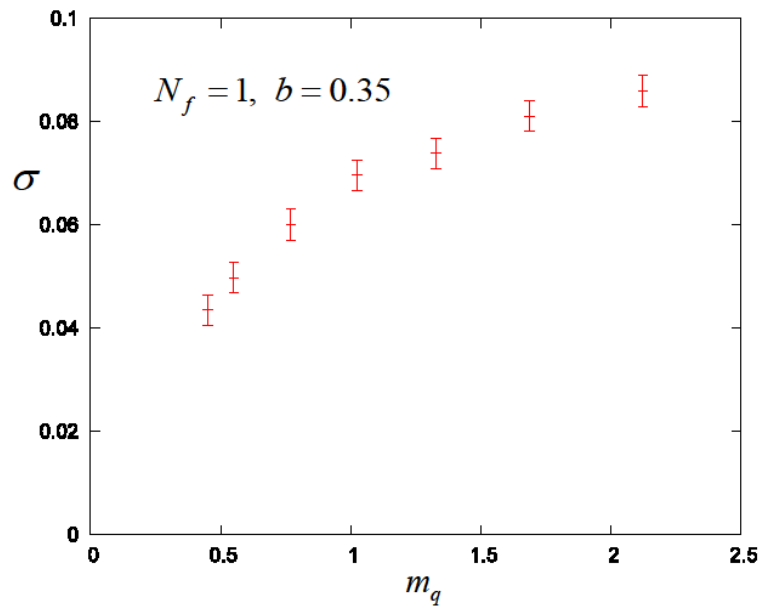


图 3