

モンテ・カルロ法を使ったQCDでのクォーク閉じ込め機構の研究

研究代表者	鈴木 恒雄
雑誌名	平成5(1993)年度 科学研究費補助金 一般研究(C) 研究成果報告書
巻	1992-1993
ページ	18p.
報告年度	1994-03
研究課題番号	04640289
URL	http://doi.org/10.24517/00048855



モンテ・カルロ法を使った QCD での クォーク閉じ込め機構の研究

課題番号 04640289

平成 5 年度科学研究費補助金
(一般研究 C) 研究成果報告書

平成 6 年 3 月

研究代表者 鈴木 恒 雄

(金沢大学 理学部教授)

モンテ・カルロ法を使ったQCDでの
クォーク閉じ込め機構の研究

課題番号 04640289

平成5年度科学研究費補助金
(一般研究C) 研究成果報告書

平成6年3月

研究代表者 鈴木恒雄

(金沢大学・理学部・教授)



8000-30310-8

金沢大学附属図書館

1 はしがき

この研究は、平成4年度および平成5年度にわたって文部省科学研究費補助金（一般C：課題番号04640289）を得て行われたものである。

研究組織

鈴木恒雄（金沢大学・理学部・教授）
松原克己（七尾短期大学・教授）

研究経費

平成4年度	1 1 0 0千円
平成5年度	1 2 0 0千円
計	2 3 0 0千円

2 研究目的とこの研究の特徴

(研究目的)

QCD がクォークの閉じ込めやハドロンの低エネルギー現象をよく再現していることは、最近の計算機実験の結果ほぼわかっている。しかし、クォーク閉じ込めの機構、即ち、何がどの様にして閉じ込めを引き起こしているか?ということとはわかっていない。ここでは、'tHooft によって提唱され我々がこれまで過去3年間研究してきた立場、即ち、SU(3)のトラス群 $U(1) \times U(1)$ のみを残すゲージ固定(abelian projection と呼ぶ)をすると $U(1) \times U(1)$ にカラー磁極子が生じそれが凝縮をおこして $U(1) \times U(1)$ のカラー荷電粒子を閉じ込めるという考えが QCD で実際に正しいかどうかをモンテ・カルロ法を用いた長時間計算機実験によってたしかめ、更に解析的にカラー磁極子の凝縮の機構に基づく QCD の赤外有効理論を用いてハドロンの性質を調べることを目的とする。

(研究の特徴)

従来のモンテ・カルロ法を使った QCD の研究は、たしかにクォークの閉じ込めを実現していそうだという事を示し、また、フェルミオンを入れてハドロンの性質もいくつか興味のある結果を再現しているが、QCD のどういう量がどのように働いてクォークの閉じ込めを実現し、また閉じ込め相の真空を作っているかについては何も情報を与えていない。我々は、この閉じ込めの機構を明らかにし将来は解析的に QCD をコントロールする事をめざしている。そのために物性の超電導で得られたマイスナー効果とそっくりの形で閉じ込めを示せる abelian projection した QCD のアーベリアン・カラー磁極子の凝縮という機構が真に正しいかどうかという問題意識でトラス群のみを残すゲージ固定をしアーベリアンの量に着目して測定をしたり、また計算をするという点が特色である。アーベリアン自由度に着目するため取扱いも、またその物理的解釈も直感的で理解しやすい。

すでにこれまでの4年間の研究で世界に先駆けて、1) 赤外有効理論でアーベリアンの自由度とモノポールのみで閉じ込めの重要な現象である linear potential が導出できること、2) SU(2) QCD でのモンテ・カル

ロ法での数値実験で確かにアーベリアンの物理量のみで閉じ込めの特徴的な振る舞いをすべて再現できること、3) アーベリアンのモノポールが閉じ込めに重要な役割をしているらしいデータの発見を行った。

今回の研究計画は、世界に先駆けたこれまでの研究を発展させ、モンテ・カルロ法で、1) モノポールが閉じ込め機構を本質的に担っていることの直接的証拠を得ること、2) モノポールは古典的なものかどうか、3) モノポールがどのような相互作用をして閉じ込め機構を担っているかといったことのデータを得ることをめざし、平行して、解析的に格子QCDの研究を進めモンテ・カルロ法の結果と比較をしてモノポールの相互作用を含めたクォークの閉じ込め機構を格子QCDの範囲内で全面的に明らかにすることを目標としている。

3 研究成果

モンテ・カルロ法を用いた長時間計算機実験での成果は次の通りであった。

(1992年度)

数値実験では高エネルギー研究所のS820を約200時間、東大のS820を40時間程度の計算を行った。

これまでの結果をふまえ、monopole condensationによるクォークの閉じ込めが正しいかどうかを知るため、monopoleのstring tensionへの寄与、abelian projectionのfull QCD theoryでの有効性を調べた。

1. Abelian projectionの後、link fieldのoff-diagonal partを積分した後のeffective $U(1)$ actionを局所性の仮定のもとに2 plaquetteまでの項でlattice Schwinger-Dyson方程式を利用してfittingにより求めた。Scaling regionでnon-localな項が効いてきて、コンパクトに $U(1)$ plaquette変数でactionを求める事は困難な事が明らかになった。
2. 前年度に発見された有限温度系のmonopoleに関するorder parameterはdynamicalなfermionが入ったときも使えることを $SU(2)$ で調べた。とりわけ、monopole currentの時間空間成分の差はPolyakov loopと比べ相転移点がはっきりわかる非常に良いものであった。

これらの結果は、アムステルダムで開催されたLattice'92の国際会議で大野、北原により、また、日本物理学会北陸支部合同講演会でイリヤルより発表された。また最近のAbelian projectionされたQCDのsimulationについての総合的な報告がLattice'92で鈴木により行われた。参考論文は学会誌発表論文の2、3である。

(1993年度)

数値実験では高エネルギー研究所の S 8 2 0 を約 4 0 0 時間、東大の S 8 2 0 を 2 0 時間程度の計算を行った。

monopole の string tension への寄与を詳細に調べ、予想どおり monopole のみで再現される事が解った。さらに、monopole の effective action を求めることに成功し、compact $U(1)$ と同様の議論で、モノポール凝縮とそれによるクォーク閉じ込めを示す結果を得た。また QCD のデュアルな真空を、外場をいれたときの系の反応から調べた。

1. abelian Wilson loop が photon からの寄与の部分と monopole からの寄与の部分の積に書けることを見出し、 $SU(2)$ gauge theory でそれぞれから static potential を計算した。その結果、monopole の寄与から string tension が再現され、クーロン項は photon から得られることがわかった。
2. 温度ゼロの $SU(2)$ gauge theory で monopole の effective action を求め、真空中では long distance で monopole loop の entropy は energy を上まわり、monopole condensation が起こっていることが明かにされた。
3. $SU(2), SU(3)$ pure gauge theory で、abelian の Wilson loop を外場として入れた、QCD の真空を調べた。monopole current の rotation と abelian の電場を測定し、Dual Ginzburg-Landau 方程式にあてはめることにより、その中のパラメーターである、penetration length と coherence length を求めた。その結果、 $SU(2), SU(3)$ とともに、超伝導の言葉でいうと、type 1 と type 2 の境界あたりであることがわかった。
4. monopole action を cooling 法を用いてより精度よく決められるかどうか調べた。また、その結果は期待通りにはならなかったが、その原因を有限温度系において time like monopole と space like monopole を cooling してその振る舞いの違いを見ることによりつきとめた。

(1)(2)(3)については、それぞれ鈴木、柴、松原により ダラスで開催された Lattice '93 において発表され、その後も、日本物理学会、基研研究会、高エネルギー研等で江尻、柴、鈴木らによって発表された。(4)については日本物理学会北陸支部合同講演会において、伊藤により発表された。

解析的にカラー磁極子の凝縮の機構に基づくQCDの赤外有効理論を用いてハドロンの性質を調べる研究の成果は次の通りである。

1. 1992年度は、静的なクォークを三個入れたバリオン系に拡張した。われわれのモデルは、バリオン系が扱える事が、他のモデルにない優れた点でありどのような結果がでるかは大変に興味をもたれていた。ベクトル化を改善し、メモリーの使い方を大幅に改善をして、大きさの限られた正三角形ばかりでなく、任意の大きさのかつ任意の形の三角形の配置で計算が可能となり、一般の場合のポテンシャルを求める事ができた。その結果は、バリオンのエネルギーは、絞られた領域のみに集中しており、従ってストリングの長さで大体決まる事がわかった。
2. 1993年度は、バリオン系でも、スピンと軌道角運動量をもった場合に拡張した。ウシントン大のベーカー達との共同研究(Baker, Ball, Zachariasen)として行っている。静的な場合と違って、対称性がとても悪いので、取り扱いは大変に複雑となる。しかし、現実のハドロンのスペクトルの研究に適用するにはどうしても必要なのであえて取り組んだ。まず第1段階として、正三角形配置に限って計算し、スピン・スピン相互作用ポテンシャルはもとまった。引き続き、軌道角運動量依存ポテンシャルを計算している。これらの結果は、日本物理学会北陸支部例会で矢沢によって発表された。

4 研究発表

4. 1 学会誌

1. S.Hioki, S.Kitahara, Y.Matsubara, O.Miyamura, S.Ohno and T.Suzuki
Monopole Condensation in Momentum Space in SU(2) Lattice Gauge Theory
Phys.Lett.285B(1992)343.
2. H.Monden, T.Suzuki and Y.Matsubara
Finite Temperature Phase Transition in a Dual Abelian Effective Theory of QCD
Phys.Lett.294B(1992)100.
3. S.Kamizawa, Y.Matsubara, H.Shiba and T.Suzuki
A Static Baryon in a Dual Abelian Effective Theory of QCD
Nucl.Phys.B389(1993)563.
4. S.Ohno, S.Ilyar, S.Kitahara, Y.matsubara, H.Ohkubo and T.Suzuki
Can Monopoles alone reproduce the string tension also in SU(2) lattice QCD?
Nucl. Phys. B(Proc.Suppl.)30(1993)561.
5. T.Suzuki
Monopoles and confinement
Nucl. Phys. B(Proc.Suppl.)30(1993)176.
6. S.Kitahara, Y.Matsubara, H.Ohkubo and S.Ohno
An order parameter of the confinement-deconfinement transition in the presence of dynamical fermions
Nucl. Phys. B(Proc.Suppl.)30(1993)557.
7. T.Suzuki
Monopole Condensation and Confinement in QCD
Proceeding of International School-Seminar '93 -Hadrons and Nuclei from QCD-
(World Scientific, 1994)

8. Y.Matsubara, S.Ejiri and T.Suzuki
The (dual) Meissner effect in SU(2) and SU(3) QCD
Nucl. Phys. B(Proc.Suppl.)(1994).
9. H.Shiba and T.Suzuki
Monopole Condensation and Confinement in SU(2) QCD
Nucl. Phys. B(Proc.Suppl.)(1994).
10. H.Shiba and T.Suzuki
String Tension in SU(2) QCD and Abelian Monopoles
To be submitted to Physics Letters B.

4. 2 口頭発表

A. 国際会議（発表者には†をつける）

1. S.Ohno[†],S.Ilyar,S.Kitahara,Ymatsubara,H.Ohkubo and T.Suzuki
Can Monopoles alone reproduce the string tension also in SU(2) lattice QCD?
International Conference on Lattice Field Theory 'Lattice '92'
(Amsterdam, Netherlands, September 15-19, 1992).
2. T.Suzuki[†]
Monopoles and confinement
International Conference on Lattice Field Theory 'Lattice '92'
(Amsterdam, Netherlands, September 15-19, 1992).
3. S.Kitahara[†],Y.Matsubara,H.Ohkubo and S.Ohno
An order parameter of the confinement-deconfinement transition in the presence of dynamical fermions
International Conference on Lattice Field Theory 'Lattice '92'
(Amsterdam, Netherlands, September 15-19, 1992).
4. T.Suzuki[†]
Monopole Condensation and Confinement in QCD
International School-Seminar '93 -Hadrons and Nuclei from QCD-
(Vladivostok, Russia and Sapporo, Japan , August 24-September 3, 1993).
5. Y.Matsubara[†], S.Ejiri and T.Suzuki
The (dual) Meissner effect in SU(2) and SU(3) QCD
International Conference on Lattice Field Theory 'Lattice '93'
(Dallas, USA, October 12-16, 1993).
6. H.Shiba[†] and T.Suzuki
Monopole Condensation and Confinement in SU(2) QCD(1)
International Conference on Lattice Field Theory 'Lattice '93'
(Dallas, USA, October 12-16, 1993).

7. H.Shiba and T.Suzuki[†]
Monopole Condensation and Confinement in SU(2) QCD(2)
International Conference on Lattice Field Theory 'Lattice '93'
(Dallas, USA, October 12-16, 1993).

B.学会発表

1. 大野成義[†]、S.Ilyar, 北原俊一、松原克己、大久保秀隆、鈴木恒雄
Abelian Projected SU(2) and compact U(1)
日本物理学会秋の分科会（新潟大、1992.10.2-5）
2. 神沢聡[†]
QCD 赤外有効理論におけるカイラル対称性の自発的破れ 2 日本物
理学会秋の分科会（新潟大、1992.10.2-5）
3. S.Ilyar[†]、大野成義、北原俊一、松原克己、鈴木恒雄
Can Monopoles alone reproduce the string tension also in SU(2)
lattice QCD?
日本物理学会・応用物理学会北陸支部合同講演会（富山県立大、1992.12.5
）
4. 大野成義[†]、北原俊一、大久保秀隆、松原克己
Abelian Projection された SU(2) full QCD の Monte Carlo Simula-
tion
日本物理学会・応用物理学会北陸支部合同講演会（富山県立大、1992.12.5
）

5. 江尻信司、柴博志、鈴木恒雄
An effective U(1) Lattice action for SU(2) Confinement
日本物理学会・応用物理学会北陸支部合同講演会（富山県立大、1992.12.5
）
6. 大野成義[†]、S.Ilyar, 北原俊一、松原克己、大久保秀隆、鈴木恒雄
SU(2) QCD においても monopole だけで string tension が再現できるか？
日本物理学会第 48 回年会（東北大、1993.3.29-4.1）
7. 江尻信司[†]、松原克己、鈴木恒雄
Abelian Flux and Abelian Monopole Current in SU(2) and SU(3)
Lattice Gauge Theory
日本物理学会秋の分科会（高知大、1993.10.3-6）
8. 江尻信司[†]、松原克己、鈴木恒雄
SU(2) と SU(3) QCD におけるデュアルマイスナー効果
日本物理学会・応用物理学会北陸支部合同講演会（福井大、1993.12.4
）
9. 矢沢建明[†]、鈴木恒雄、松原克己
QCD 赤外有効理論による spin 軌道角運動量依存ハドロンポテンシャル
日本物理学会・応用物理学会北陸支部合同講演会（福井大、1993.12.4
）
10. 伊藤雅典[†]、鈴木恒雄、サウト・イリヤル
cooling による quark 閉じ込め機構の研究

日本物理学会・応用物理学会北陸支部合同講演会（福井大、1993.12.4）

11. サウト・イリヤル、柴博志、伊藤雅典、江尻信司
U(1)×U(1)格子ゲージ理論における monopole の寄与
日本物理学会第49回年会（福岡工大、1994.3.28-31）
12. 江尻信司、北原俊一[†]、柴博志、鈴木恒雄、松原克己
Abelian Projection された格子QCDの有限温度相転移
日本物理学会第49回年会（福岡工大、1994.3.28-31）
13. 江尻信司[†]、北原俊一、柴博志、鈴木恒雄、松原克己
アーベリアン射影した格子QCDにおけるモノポールの振る舞い
日本物理学会第49回年会（福岡工大、1994.3.28-31）

C. 研究会発表

1. 鈴木恒雄
Monopole condensation and color confinement
「原子核におけるクォーク・ハドロンのダイナミックス」研究会（阪大・RCNP、1992.6.11-13）
2. 鈴木恒雄
The purpose of the meeting
「QCDにおけるカラー閉じ込め機構」研究会（京都大基礎物理研、1993.1.6-8）

3. 北原俊一

Monte-Carlo study of abelian projection and monopoles

「QCDにおけるカラー閉じ込め機構」研究会（京都大基礎物理研、1993.1.6-8）

4. 松原克己

Monopole condensation and QCD infrared effective model

「QCDにおけるカラー閉じ込め機構」研究会（京都大基礎物理研、1993.1.6-8）

5. 柴博志

Monopole condensation and confinement in SU(2) QCD 「クォーク・ハドロンのダイナミクス」研究会（京都大基礎物理研、1993.12.6-8）

6. 鈴木恒雄

Monopole condensation and confinement in SU(2) QCD 「Lattice QCD discussion meeting」研究会（高エネルギー研、1993.12.21-22）

D. 特別講義、セミナー

1. 鈴木恒雄

Monopole condensation and color confinement

京都大学基礎物理研究所・宇治（1992.5.14）

2. 鈴木恒雄

モノポール凝縮とクォークの閉じ込め

東大原子核研究所（1992.7.11）

3. 鈴木恒雄
モノポール凝縮とクォークの閉じ込め
福井大 (1992.7.13)

4. 鈴木恒雄
A Ginzburg-Landau Type of Quark Confinement Theory
Seminar at Department of Physics, University of Heidelberg (1992.10.6)

5. 鈴木恒雄
A Ginzburg-Landau Type of Quark Confinement Theory
Seminar at Physics Department, University of Amsterdam (1992.10.15)

6. 鈴木恒雄
A Ginzburg-Landau Type of Quark Confinement Theory
Seminar at ITEP at Moskow (1992.10.27)

7. 鈴木恒雄
Confinement of Quarks
高知大学特別講義 (1991.7.15-18)

8. 鈴木恒雄
Monopole condensation and confinement in SU(2) QCD Seminar at
Department of Physics, University of Washington (1993.10.22)

9. 鈴木恒雄
Monopole condensation and color confinement
広島大 (1994.3.14)

5 この研究に関する国内及び外国における研究状況

国内では、金沢大学のグループ（現在のメンバーは七尾短大の松原克己教授、ポリテク滋賀の大野成義、大学院生の北原俊一、柴博志、江尻信司、サウト・イリヤル、矢沢建明、伊藤雅典）以外は、モンテ・カルロ・シミュレーションを広島大学の宮村修助教授と日置慎治助手がわれわれとの共同研究で行っている。また金沢のグループは、ワシントン大のベーカー、ユタ大のボール、カルテックのザカリアーゼンのグループともQCDの赤外有効理論で共同研究をしている。

国外では abelian projection という同じ視点で研究をしているグループだけでも

- (1) J.Smit を指導者とする Amsterdam のグループ
- (2) G.Schierholz を指導者とする Desy, Julich, Dubna のグループ、
- (3) モスクワの M.I.Polikarpov を指導者とする ITEP のグループ、
- (4) V.K.Mitrjushkin や V.G.Bornyakov の IHEP のグループ、
- (5) A.Di Giacomo を指導者とする Pisa のグループ、
- (6) J.Greensite のグループ
- (7) R.Haymaker を指導者とする Louisiana のグループ
- (8) P.Cea と L.Cosmai の Bari のグループ

など、abelian projection を行って研究するところが増えてきており、先頭をきったわれわれの論文はどれにも引用されており、注目されつつある。

6 さいごに

この二年間の科研費は、国際的にも注目されだしたときで、大変に有効であった。とくにスーパーコンピューターを使った数値計算は、われわれの場合、高エネルギー研究所の共同利用研究に参加する以外、予算的に不可能であるが、高エネルギー研究所では長時間ジョブはネットワークに解放されていないので、特に若い院生を派遣する旅費として大変に助かった。1993年1月6-8日には、鈴木が主催して「QCDにおけるカラー閉じ込め機構」というテーマで研究会を京大基礎物理研究所の研究計画の一つとして開催し、UCLAのTomboulis教授の参加の下に集中的に討議をした。これにも、若手の参加補助として、科研費が役にたった。1993年度後半からは、広島大学理学部に導入されたインテル社製の超並列計算機パラゴンを宮村助教授との共同研究で使用しているが、これも何度か実際に広島大学に出かけなければ仕事にならず、科研費はこの面でも大変に役にたった。まさに科研費のおかげでこれらの研究は進展したといえる。心から感謝するとともに、今後もますます国際的に競争して発展していく段階であり、ぜひとも引き続きご援助を期待したい。

この報告は金沢大学の「クォークの閉じ込め」研究グループでの共同研究に基づいている。七尾短大の松原克己教授、金沢大学の現大学院生の北原俊一、柴博志、江尻信司、サウト・イリヤル、矢沢建明、伊藤雅典各氏の日頃からの協力を心から感謝したい。また研究の初期からの協力者で1990年8月ガンのため若くして急逝した元金沢医科大学助教授の四柳一郎氏には、あらためて最大の感謝の気持ちを捧げたい。彼のモンテ・カルロ法を用いた研究に対する非凡な才能による協力がなければ、我々の研究が現在のように興味ある発展を遂げなかったことであろう。