

モンテ・カルロ法を用いた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3(1991)年度 科学研究費補助金 一般研究(C) 研究成果報告書
巻	1990-1991
ページ	15p.
報告年度	1992-03
研究課題番号	02640220
URL	http://doi.org/10.24517/00048856



モンテ・カルロ法を用いたQCDでの クォーク閉じ込め機構の研究

課題番号 02640220

平成2年～平成3年度科学研究費補助金
(一般研究C) 研究成果報告書

平成4年3月

研究代表者 鈴木恒雄

(金沢大学・理学部・教授)

モンテ・カルロ法を用いたQCDでの クォーク閉じ込め機構の研究

課題番号 02640220

平成2年～平成3年度科学研究費補助金
(一般研究C) 研究成果報告書

平成4年3月

研究代表者 鈴木恒雄

(金沢大学・理学部・教授)



8000-15368-8

金沢大学附属図書館

1 はしがき

この研究は、平成2年度および平成3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02640220）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）

研究経費

平成2年度	1 2 0 0 千円
平成3年度	8 0 0 千円
計	2 0 0 0 千円

2 研究発表

2. 1 学会誌

1. Maedan, Sinji, Yoshimi Matsubara and Tsuneo Suzuki
Abelian Confinement Mechanism and the *QCD* Vacuum
Prog. Theor. Phys., 84, 130-141(1990)
2. T. Suzuki and I. Yotsuyanagi
Possible Evidence for Abelian Dominance in Quark Confinement
Phys. Rev.D42, 4257-4260(1990)
3. T. Suzuki and I. Yotsuyanagi
Abelian Projection of *QCD* and Abelian Wilson Loops
Nucl. Phys. B.(Proc.Suppl.) 20, 236-239(1991)
4. S.Hioki,S.Kitahara,Y.Matsubara,O.Miyamura,S.Ohno and T.Suzuki
Gauge-fixing Ambiguity and Monopole Number
Phys.Lett.B271, 201-207(1991)
5. S.Hioki,S.Kitahara,S.Kiura,Y.Matsubara,O.Miyamura,S.Ohno and
T.Suzuki
Abelian Dominance in $SU(2)$ Color Confinement
Phys.Lett.B272, 326-332(1991)

6. S.Hioki,S.Kitahara,S.Kiura,Y.Matsubara,O.Miyamura,S.Ohno and T.Suzuki
Abelian Dominance in SU(2) Color Confinement
Nucl. Phys.B.(Proc.Suppl.)

7. S.Kamizawa,Y.Matsubara,H.Shiba and T.Suzuki
A Static Baryon in a Dual Abelian Effective Theory of QCD
DPKU-9202(1992), submitted to Nucl.Phys.B.

8. S.Hioki,S.Kitahara,Y.Matsubara,O.Miyamura,S.Ohno and T.Suzuki
Monopole Condensation in Momentum Space in SU(2) Lattice Gauge Theory
Nucl. Phys. B. (Proc.Suppl.)
DPKU-9204(1992), submitted to Phys.Lett.B.

9. H.Monden,T.Suzuki and Y.Matsubara
Finite-Temperature Transition in a Dual Abelian Effective Theory of QCD(in preparation)

2. 2 口頭発表

A. 国際会議（発表者には†をつける）

1. Tsuneo Suzuki[†] and Ichiro Yotsuyanagi
Abelian Projection of QCD and Abelian Wilson Loops
International Conference on Lattice Field Theory 'Lattice '90' (Tallahassee, Florida, USA, October 8-12, 1990).
2. Tsuneo Suzuki[†], Sinji Hioki, Shunichi Kitahara, Satoshi Kiura, Yoshimi Matsubara, Osamu Miyamura, Shigeyoshi Ohno
Abelian Dominance in SU(2) Color Confinement
International Conference on Lattice Field Theory 'Lattice '91' (Tsukuba, Japan, November 5-9, 1991).
3. Shinji Hioki[†], Shunichi Kitahara, Yoshimi Matsubara, Osamu Miyamura, Shigeyoshi Ohno and Tsuneo Suzuki
Monopole Condensation in Momentum Space in SU(2) Lattice Gauge Theory
International Conference on Lattice Field Theory 'Lattice '91' (Tsukuba, Japan, November 5-9, 1991).

B. 学会発表

1. 松原克己[†]、鈴木恒雄
Baryon Structure in Infrared Effective Theory of Abelian Projected QCD
日本物理学会・応用物理学会北陸支部合同講演会（福井大、1990.12.1）

2. 木浦智[†]、鈴木恒雄
Analysis of Quark Antiquark Static Potential in Pure SU(2) Theory with Abelian Gauge Fixing
日本物理学会・応用物理学会北陸支部合同講演会（福井大、1990.12.1）

3. 神沢聡[†]、松原克己、鈴木恒雄

Color-flux Distribution of a Static Baryon in a Dual Abelian Confinement Model of QCD
日本物理学会第46回年会（北大、1991.9.27-30）

4. 日置慎治、北原俊一、木浦智、松原克己[†]、宮村修、大野成義、鈴木恒雄
SU(2)カラーの閉じ込めにおける Abelian Dominance
日本物理学会第46回年会（北大、1991.9.27-30）

5. 日置慎治、北原俊一、松原克己、宮村修、大野成義[†]、鈴木恒雄
格子上のゲージ固定の不定性とモノポール
日本物理学会第46回年会（北大、1991.9.27-30）

6. 柴博志[†]、鈴木恒雄、神沢聡、松原克己
Dual Abelian Confinement Modelにおけるバリオンポテンシャル
日本物理学会・応用物理学会北陸支部合同講演会（金沢大、1991.12.7）

7. 神沢聡[†]、柴博志、鈴木恒雄、松原克己
Dual Abelian Confinement Model におけるバリオンの形状とポテンシャル
日本物理学会・応用物理学会北陸支部合同講演会（金沢大、1991.12.7）

8. 北原俊一[†]、鈴木恒雄、大野成義、松原克己、日置慎治、宮村修
Monte Carlo Study of Abelian Projected QCD
日本物理学会・応用物理学会北陸支部合同講演会（金沢大、1991.12.7）

9. 大野成義[†]、松原克己、木浦智、北原俊一、鈴木恒雄、日置慎治、宮村修
SU(2) Color Confinement における Abelian Dominance と Monopole
日本物理学会・応用物理学会北陸支部合同講演会（金沢大、1991.12.7）

10. 日置慎治、北原俊一[†]、松原克己、宮村修、大野成義、鈴木恒雄
Abelian Projection された QCD のモンテ・カルロ・シミュレーション
日本物理学会第 47 回年会（慶応大、1992.3.27-30）

11. 大野成義[†]、鈴木恒雄、北原俊一、松原克己、宮村修、
Global Gauge Fixing and Abelian Monopole
日本物理学会第 47 回年会（慶応大、1992.3.27-30）

12. 神沢聡[†]、鈴木恒雄
QCD 赤外有効理論におけるカイラル対称性の自発的破れ
日本物理学会第 47 回年会（慶応大、1992.3.27-30）

13. 柴博志[†]、神沢聡、松原克己、鈴木恒雄
Dual Abelian Confinement Model におけるバリオンポテンシャル
日本物理学会第 47 回年会（慶応大、1992.3.27-30）

14. 門田英子[†]、鈴木恒雄、松原克己
QCD 赤外有効理論での有限温度相転移について
日本物理学会第 47 回年会（慶応大、1992.3.27-30）

C. 研究会発表

1. 鈴木恒雄
Ginzburg-Landau Type Theory of Quark Confinement
「クォーク・ハドロン多体系の相対論的取扱い」研究会（京大・基研、1990.11.26-28）

2. 鈴木恒雄
Study of Abelian Dominance in SU(2) confinement
「格子上の場の理論」研究会（高エネルギー研、1991.3.7-9）

3. 大野成義
Maximally abelian gauge-fixing について
「格子上の場の理論」研究会（高エネルギー研、1991.3.7-9）

4. 日置慎治
Cooling and Topology in Pure SU(2) Lattice QCD
「格子上の場の理論」研究会（高エネルギー研、1991.3.7-9）

D. 特別講義、セミナー

1. 鈴木恒雄
クォークの閉じ込め機構
北陸地区素粒子論グループ合宿（石川・辰口、1990.5.26-28）

2. 鈴木恒雄
Monte-Carlo Study of Abelian Projection of QCD
高エネルギー研究所理論部セミナー（1990.6.26）

3. 鈴木恒雄
A Ginzburg-Landau Type of Quark Confinement Theory
Seminar at Department of Physics, University of Utah (1990.11.15)

4. 鈴木恒雄
A Ginzburg-Landau Type of Quark Confinement Theory
Seminar at Physics Department, University of Colorado (1990.11.18)

5. 鈴木恒雄
Confinement of Quarks
北海道大学素粒子論研究室特別講義（1991.4.24-25）

6. 鈴木恒雄
モノポール凝縮によるクォークの閉じ込め
日本大学理工学部セミナー（1991.11.1）

3 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はばわかっている。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?という事はわかっていない。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)のトーラス群 $U(1) \times U(1)$ 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き 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、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 でのアーベリアン・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ー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。

4 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。

(1990年度)

数値実験では高エネルギー研究所のS820を約100時間、東大のS820を70時間程度の計算を行った。

1. 'tHooft が提唱した abelian projection を lattice 上の $SU(2)$ gauge theory で定式化し、種々の gauge で物理量の振る舞いを調べた。
2. maximal abelian gauge の場合に Wilson Loops と Creutz ratios と static potential を測定したところ abelian dominance の兆候を示す興味ある結果を得た。

これらの結果は、Lattice '90 の国際会議で鈴木によって発表された。参考論文は学会誌発表論文の2、3である。

(1991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。

前年度に発見した abelian projected $SU(2)$ の特徴を monopole の性質との関連から調べた。また、これを $SU(3)$ へ拡張した。

1. maximal abelian gauge-fixing の精度を向上させる改善をし、いわゆる "Gribov" ambiguity が存在することを確認した。つまり iterative にしか決められない non-local なゲージ条件の場合の一つとして、ゲージ固定に不定性があることがわかった。

このことに関して over-relaxation 法などのさまざまな gauge-fixing の technique の開発とそれを使った解決法を $8^4, 12^4, 16^4$ などの lattice size で研究してきた。参考論文は学会誌発表論文の4である。

2. gauge-fixing の不定性による 誤差を評価しつつ、種々の物理量の測定を行った。その結果が abelian dominance を示していることを確認した。

測定した物理量は、abelian Wilson loop, Creutz ratio, static potential, abelian Polyakov loop, electric and magnetic action, abelian flux 等で、 16^4 と $16^3 \times 4$ の格子上で over-relaxation の gauge-fixing 法を使った。参考論文は学会誌発表論文の 5、6 である。

3. monopole から定義される 2 種類の order parameter を発見した。monopole current の時間空間成分の差や、全ての monopole current の長さの和に対する最大の monopole current の長さの比は、monopole に関連した新しい order parameter となることを発見し、monopole が閉じ込め機構に関与していると考えられる。前者は monopole が非閉じ込め相で static になっていることを示し、ドイツのグループと独立に同時に見つけた。後者は monopole が閉じ込め相で dense な状態にあり、非閉じ込め相でばらばらになることを示しており、モスクワの V.G.Bornyakov et al. と独立に調べた。
4. Cooling 法を用いて、 $16^3 \times 4$ の有限温度系では閉じ込め機構に関係しているのは extended monopole であることを確かめた。
5. monopole field の Fourier transformation を行い momentum space での振る舞いを調べ、閉じ込め相で多くの monopole は ground state にあることを発見し、monopole condensation と考えられる結果が得られた。参考論文は学会誌発表論文の 8 である。
6. $SU(3)$ については $12^3 \times 2$ の preliminary data を測定し、first order deconfinement phase transition と考えられる結果を得た。参考論文は学会誌発表論文の 6 である。

これらの結果は、Lattice'91 の国際会議で (1)(2)(3) と (6) を鈴木によって、(4) と (5) を日置によって発表された。

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. 1990年度は、static なクォーク対をいれたときの真空のエネルギー変化、つまり静的なメソンのポテンシャルを、赤外有効理論から導かれる運動方程式の古典解を数値的に解くことで求め、SU(3)での閉じ込め相の真空が第一種と第二種の境界付近のデュアルな超伝導状態らしいことがわかった。また、ポテンシャルは、リニアタイプとユカワタイプでよく表されることがわかった。参考論文は学会誌発表論文の1である。
2. 1991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。参考論文は学会誌発表論文の7である。
3. モンテ・カルロ法では有限温度のQCDを調べると、SU(2)では二次の、SU(3)では一次の閉じ込め・非閉じ込めの相転移が存在している事がわかっている。この事実が、赤外有効理論で正しく再現されるかどうかということは、赤外有効理論の正しさ、さらにモノポール凝縮によるデュアル・マイスナー効果での閉じ込めという考え方の正しさのテストになる。われわれは、Dolan-Jackiwの有効ポテンシャル法によってこれを調べ、確かにこの事実がたいへん見事に再現される事がわかった。参考論文は学会誌発表論文の9である。

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、大学院生の大野成義、神沢聡、北原俊一、柴博志、門田英子）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福山大学の日置慎治講師がわれわれとの共同研究で行っている。

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 のグループなどがすでにあったが、最近
- (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。われわれの研究は彼らに先んじている点も多く、実際モスクワの ITEP のグループからも共同研究を申し込まれており、次年度は共同研究を始める事となっている。

6 さいごに

この二年間の科研費は、研究が幸いにして興味ある結果がでて、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。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きたいしたい。

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および広島・福山大と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大野成義、神沢聡、北原俊一、柴博志、門田英子、元大学院生の木浦智、塩川一登武、広島大学の宮村修助教授と福山大学の日置慎治講師各氏の日頃からの協力に心から感謝したい。特に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、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。