

平成 21 年 5 月 24 日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2005～2008

課題番号：17340070

研究課題名（和文） 高密度 QCD 物質の相構造のくりこみ群による解析

研究課題名（英文） Renormalization group analysis of the phase structure of the high density QCD matter.

研究代表者

青木 健一（AOKI KEN-ICHI）

金沢大学・数物科学系・教授

研究者番号：00150912

研究成果の概要：

自然界を作る物質のほとんどは、陽子・中性子と電子である。陽子、中性子はクォークから作られ、クォークは量子色力学（QCD）によって強い相互作用をしている。この強い相互作用によって対称性の自発的破れが起こり、陽子・中性子の質量が生成され、自然界の質量のほとんどを説明する。2008 年度ノーベル物理学賞はこの機構を最初に提唱した南部陽一郎に与えられた。強い相互作用による自発的対称性の破れは、解析困難な問題であるが、くりこみ群の方法を用いて生成される質量の理論的な計算を行うことができた。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	1,800,000	0	1,800,000
2006年度	6,600,000	0	6,600,000
2007年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
年度			
総計	12,200,000	1,140,000	13,340,000

研究分野：素粒子論、場の理論、数理物理学、統計力学

科研費の分科・細目：物理学 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理（理論）

キーワード：くりこみ群、QCD、カイラル対称性、自発的対称性の破れ、非摂動、有限密度、有限温度、カラー超伝導

1. 研究開始当初の背景

カイラル対称性の自発的破れは素粒子論の根幹にあるテーマである。もともと素粒子を構成している場は、質量を持たないが、それでは現実の素粒子を記述できない。素粒子の間の相互作用がある程度以上強いと、自発的に質量が生じるという現象が起こる。これは、質量を禁止している対称性が自発的に破れることによって起こるので、自発的対称性の破れによる質量生成、と言われている。1960 年代に南部陽一郎によって提唱され、

2008 年度のノーベル物理学賞が授与された。

現代の素粒子論では、原子核を構成する陽子、中性子は更にミクロの構成子であるクォークからできていることが実験的に確かめられている。クォークはグルーオンを交換する相互作用、量子色力学（QCD）によってお互いに引力を及ぼし、複合粒子としての陽子、中性子を作る。同時に、クォークのカイラル対称性の自発的破れが起こり、質量が生成され、この質量が自然界の物質の持つ質量のほとんど全てを説明することになる。

QCDにおけるカイラル対称性の自発的破れは確立した概念であるが、定量的に解析することは困難である。QCDはもともと強い相互作用であり、また、自発的対称性の破れは、摂動論では実現できない現象なので、非摂動的な方法がどうしても必要になる。

非摂動的な取り扱いとしては、平均場近似や梯子近似と呼ばれる近似を用いて、無限個の相互作用を足し上げた解を求める、いわゆるシュウィンガー・ダイソン方程式による方法、QCDを経路積分で量子化して更に時空間を格子で近似し、その真空状態を直接のコンピュータ上の数値シミュレーションで計算する方法、が典型的である。

しかしこれらの方法にはそれぞれ重大な困難がある。シュウィンガー・ダイソン方程式においては、梯子近似から先に近似を改善する系統的な方法が存在していない。QCDの格子シミュレーション法においては、クォークのカイラル対称性を維持する良い方法がなく、その自発的破れを精度よく解析することが困難である。

最近、研究代表者らが開発した新しい非摂動的方法として、非摂動くりこみ群を用いてカイラル対称性の自発的破れを解析する方法がある。これは、朝永振一郎以来のくりこみ理論を現代的に捉えなおしたもので、90年代に大きく発展した手法である。カイラル対称性を維持すること、系統的な近似改善方法が用意できることなどの利点があり、実際、QCDにおいて平均場近似を超えた計算が行われている。ただし、ゲージ理論であるQCDが持っているゲージ不変性をうまく取り入れるのは困難である。この点を現象論的に対処することによって、平均場近似の結果よりはるかにゲージ不変性を改善した結果が得られていた。

他方、宇宙初期、高密度星の内部、重イオン衝突実験などで、高温、高密度状態におけるQCDの振る舞いが実験的、観測的に問題となってきた。これは、全く未知の領域であり、QCDによって記述される物質の相構造や状態方程式を求めることが課題となる。

ゼロ密度の場合にハドロン物理を再現することに成功しているQCDの格子シミュレーションにおいては、温度を上げることは比較的容易であるが、密度を有限にした計算は非常に困難であり、いろいろな工夫がなされてきている。しかし、決定版といえるものは出されていない。

2. 研究の目的

非摂動くりこみ群の方法では、温度、密度を有限にすることによって新たに生じる本質的な困難はない。そこで、非摂動くりこみ群の方法を更に発展させて、有限温度、有限密度におけるQCD物質の相構造の解析を

行うことが本研究計画の基本的な目的である。

QCDの非摂動的方法の中心にある格子シミュレーションの方法では、高温の状態に対しては、格子サイズを変更するだけで対応可能であるが、有限密度状態を表すための作用の変更は、作用に虚数部を与えることになり、経路積分の確率解釈をくずしてしまう。格子シミュレーションは、膨大な多重積分である経路積分を、確率分布とみなしてモンテカルロ法で評価する方法であるから、基本的な作用部分が虚数となってしまうとその部分を確率分布を指定する因子とみなすことができず、モンテカルロ法にそのまま組み入れることができない。これは本質的な困難であり、簡単に解決できるアイデアは未だにない。

他方、非摂動くりこみ群の方法では、くりこみ群のベータ関数を評価するループダイアグラムにおいて、プロパゲータを有限温度、有限密度のものに置き換えるだけで、有限温度、有限密度の系を扱うことができる。この意味で、有限温度、有限密度を扱うことに伴う本質的な困難はなく、単に、計算量が数倍に増えるだけである。

有限温度、有限密度においては、カイラル対称性だけでなく、カラー対称性についても非自明な相が出現すると予想されている。すなわち、非常に高密度の状態になると、フェルミ面近傍は有効的に質量のない励起となり、弱くても引力があれば、ペアが形成されて超伝導状態が生じる。これがカラー超伝導と呼ばれる状態である。クォークの裸の質量が異なるために、いくつもの異なるカラー超伝導状態があると予想されている。

非摂動くりこみ群では、カイラル対称性の自発的破れやカラー超伝導のような、フェルミオンペアの凝縮による相を、直接的に有効作用を計算することによって解析できる。そこで、カイラル対称性、カラー対称性をともに考慮して、有限温度、有限密度における相構造を求めることが可能であり、その手法を確立し、相図を得ることが目的であった。

3. 研究の方法

(1) 非摂動くりこみ群の枠組みの中で、局所ポテンシャル近似を採用し、次元の低い有効相互作用から加え、4フェルミ相互作用についての完全解析をめざした。有限温度、有限密度におけるベータ関数の計算方法を開発し、ゼロ温度、ゼロ密度における一般のゲージ理論におけるベータ関数を得た。数値プログラムに載せて相構造を明らかにし、更に自発的対称性の破れのスケールを計算した。

(2) 長距離相互作用がある場合の自発的対称性の破れを扱う方法を開発するために、自由度を最小限にした1次元イジング模型について、有限レンジの場合にブロック化した

後にくりこみ群を用いて正確に解く方法を新たに開発し、数値的に感受率を計算した。有限レンジスケリングを仮定して、その指数から無限レンジの結果をゼータ関数から推定する手法を与え、具体的な数値結果を得た。また、2次元イジング模型においては、通常のスピン変数ではなくドメインウォール表示を用いた場合のくりこみ群を定式化し、解析的にくりこみ変換を書き下し、その性質を数値解析した。

(3) 数値計算においては、本研究において新たに導入したPCクラスタのシステム(8node-16CPU)を活用し、その上でのC++システム及びIntel Math Kernel Libraryを用いた。

4. 研究成果

研究成果は大きく分けて以下のように5つに分類される。

(1) 有限温度、有限密度におけるくりこみ群のベータ関数の評価

非摂動くりこみ群におけるベータ関数の評価は、ファインマングラフで言えば、1ループのダイアグラムを計算するものである。系を有限温度、有限密度に置いた場合、ループの内線のプロパゲータとして、有限温度、有限密度のものを使うことになる。有限温度では、エネルギー変数が松原振動数の和に変更され、有限密度では、クォークプロパゲータの第0成分に化学ポテンシャルに比例する項が加わる。これらを考慮したベータ関数の評価を行い、一般的な計算方法を確立した。

特に、有効相互作用がベクトル型の場合には、有限温度、有限密度において系のローレンツ不変性が破れている効果のために、時間成分と空間成分の間の対称性が失われ、有効相互作用を分離して扱わねばならないことを明らかにし、その効果によって相境界がずれることを示した。

(2) 一般のゲージ理論におけるベータ関数の評価と相構造の解析

一般のカラー数、フレーバー数を持つ模型を考慮してゼロ温度、ゼロ密度におけるベータ関数を評価した。有効相互作用としては、完全なカイラル対称性の下で許される全ての4フェルミ相互作用を考慮し、ベータ関数の計算においても、いわゆる梯子型(Large N leading)に加えてそれ以外の効果も区別しながら加えた。この結果を用いて、一般のゲージ理論における相構造を明らかにした。

特に、これまでの研究では、ベクトル型相互作用を大きくしても、カイラル対称性の自発的破れはないとされていたが、それはフレーバー数が1の場合の特殊性であり、一般に、ベクトル型相互作用にも臨界点があることを明らかにした。

(3) 4フェルミ相互作用空間におけるカイラル対称性の自発的破れのスケールの評価方法

カイラル対称性の自発的破れのスケールを評価するふたつの方法を考案し、実際に定量的に計算して、ふたつの方法が相互に両立する結果を出すことがわかった。

ひとつの方法は、スカラー型有効相互作用に注目し、それがある値を超えるとときにそのスケールを自発的破れのスケールとする方法である。これは、そのスケールのところで、スカラー型相互作用のみの空間に射影して、評価する方法とも言える。乱暴な方法に見えるが、素粒子論で統一理論を解析するときに、一般に、非摂動的な効果による自発的対称性の破れのスケールを推定するときに使われている論理と同じである。

もうひとつの方法は、カイラル凝縮に対する外場を加えて、直接、その期待値や、有効質量を評価する方法である。外場は裸の質量パラメータと考えられる。4フェルミ相互作用空間の内部でこの方法が働くことを初めて明らかにした。フレーバー数、カラー数に対する依存性を与え、特に、梯子近似が実際には常に良い結果を与えること、フレーバー数が3の時に限りカラー数による依存性が少なく、したがって、カラー数無限大の近似もよいこと、を示した。

(4) 長距離相互作用がある場合の自発的対称性の破れの臨界点の評価方法

もっとも単純な1次元のイジング模型をとって、無限長距離相互作用があるときの自発的対称性の破れの臨界点を評価した。

有限レンジスケリングの仮説を置き、有限レンジ系をくりこみ群による方法で評価し、無限レンジの場合の感受率の発散点から臨界点を与える方法を開発した。得られた結果は、長距離相互作用のダンピング指数の関数として臨界相互作用を与えており、モンテカルロシミュレーションの結果ともきわめてよく一致している。

(5) 新しいタイプのくりこみ群の研究

2次元イジング模型を用いて、自発的対称性の破れを研究するための新しいタイプのくりこみ群を研究した。

スピンの配位をとなり合うスピンの間のドメインウォールの有無で表現し、ドメインウォールの有無を変数として系を表現する。このドメインウォール変数に対するくりこみ群を一般的なテンソルネットワーク系に対するくりこみ群法にならって与え、解析的な表示を得た。固定点は5次代数方程式の根で与えられ、得られた臨界指数は極めて真値に近かった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 14 件)

1. Domain Wall Renormalization Group Analysis of 2-dimensional Ising Model, Ken-Ichi Aoki, Tamao Kobayashi and Hiroshi Tomita, Int. J. M. Phys. B (2009) 掲載確定、査読有.
2. Evaluation of the spontaneous chiral symmetry breaking scale in general gauge theories with non-perturbative renormalization group, Ken-Ichi Aoki and Kazuhiro Miyashita Prog. Theor. Phys. 121 (2009) 875-884, 査読有
3. eta-prime meson from two flavor dynamical domain wall fermions, Koichi Hashimoto and Taku Izubuchi, Prog. Theor. Phys. 119 (2008) 599-641, 査読有
4. Estimate of the critical dissipation of the quantum classical phase transition due to decoherence, Ken-Ichi Aoki, Tamao Kobayashi and Hiroshi Tomita, QIT 19-(2008)172-175 査読無.
5. Finite Range Scaling Approach to Quantum Dissipative Systems, Ken-ichi Aoki and Tamao Kobayashi, Novel aspects of phase transitions with long-range interactions (2008) 17 査読無.
6. Analysis of 1D Systems with Long Range Interactions by Finite Range Scaling, K-I. Aoki, T. Kobayashi and H. Tomita, "Applications of Renormalization Group Methods in Mathematical Sciences", RIMS Koukyuroku 1600 (2008) 1-20, 査読無.
7. A Finite-Range Scaling Method to Analyze Systems with Infinite-Range Interactions, Ken-Ichi Aoki, Tamao Kobayashi and Hiroshi Tomita, Prog. Theor. Phys. 119 (2008) 509-514, 査読有.
8. Perturbative renormalization for static and domain-wall bilinears and four-fermion operators with improved gauge actions. Oleg Loktik and Taku Izubuchi, Phys. Rev. D75 (2007) 0345047-1-11, 査読有.
9. Gauge-independent Abelian mechanism of color confinement in

gluodynamics. Tsuneo Suzuki, Katsuya Ishiguro, Yoshiaki Koma, and Toru Sekido Phys. Rev. D77 (2008) 034502-1-4, 査読有.

10. Renormalization group analysis of chiral phase structure of Nambu-Jona-Lassinio model and QCD in finite temperature and density, Ken-Ichi Aoki, Hokuto Inoue and Kazuhiro Miyashita, Soryushiron-Kenkyu, 115-1(2007), A83-A83, 査読無.
11. Abelian dominance and the dual Meissner effect in local unitary gauges in SU(2) gluodynamics, Toru Sekido, Katsuya Ishiguro, Yoshiaki Koma, Yoshihiro Mori and Tsuneo Suzuki, Phys. Rev. D76 (2007) 031501-1-5, 査読有.
12. Renormalization group analysis of the quantum tunneling suppression due to long range interactions in the time direction, Ken-Ichi Aoki, Tamao Kobayashi and Hiroshi Tomita, Soryushiron-Kenkyu, 115 (2007), A53-A53, 査読無.
13. A Renormalization group Approach to the Critical Dissipation in Quantum Systems, Ken-Ichi Aoki and Tamao Kobayashi, Soryusiron-Kenkyu, 113-1 (2006), A70-A70、査読無.
14. 実空間くりこみ群による量子力学系の解析, 青木健一, 小林玉青、素粒子論研究, 111 巻 3 号 (2005), C59-C59, 査読無

[学会発表] (計 41 件)

1. 非摂動くりこみ群によるカイラル凝縮の直接的計算法, 青木健一, 井上北斗, 宮下和洋, 日本物理学会第64回年次大会, 2009.03.29 (立教大学)
2. 散逸二重井戸ポテンシャルでの臨界現象の解析, 青木健一, 小林玉青、富田洋, 日本物理学会第64回年次大会, 2009.03.29 (立教大学)
3. テンソルくりこみ群による2次元正方格子イジング模型の解析とその改善, 青木健一, 藤井康弘、小林玉青、富田洋, 日本物理学会第64回年次大会, 2009.03.28 (立教大学)
4. SU(N_c)ゲージ理論におけるカイラル対称性の自発的破れの非摂動くりこみ群による解析, 青木健一, 井上北斗, 宮下和洋, 日本物理学会北陸支部例会, 2008.11.29 (福井大学)
5. テンソルくりこみ群による2次元正方格子イジング模型の臨界現象の解析, 青木健一, 藤井康弘、小林玉青、富田

- 洋, 日本物理学会北陸支部例会, 2008.11.29(福井大学)
6. 長距離相互作用のある二重井戸ポテンシャルへの有限レンジスケーリングアプローチ, 青木健一, 小林玉青, 富田洋, 日本物理学会北陸支部例会, 2008.11.29 (福井大学)
 7. Estimate of the critical dissipation of the quantum classical phase transition due to decoherence., Ken-Ichi Aoki, Tamao Kobayashi, and Hitoshi Tomita, QIT19, 2008.11.20 (大阪府立大学)
 8. Finite range scaling approach to quantum dissipative systems, Ken-Ichi Aoki, Tamao Kobayashi and Hiroshi Tomita, "Novel Aspects of Phase Transitions with Long-range Interactions" 2008.10.28 Koshiba Hall, Univ. of Tokyo
 9. テンソルくりこみ群による2次元正方格子イジング模型の臨界現象の解析, 青木健一, 藤井康弘, 小林玉青, 富田洋, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008.09.22 (山形大学)
 10. 1次元量子散逸系における臨界摩擦の有限レンジスケーリングによる評価, 青木健一, 小林玉青, 富田洋, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008.09.22 (山形大学)
 11. $SU(N_c)$ ゲージ理論におけるカイラル対称性の自発的破れの非摂動くりこみ群による解析, 青木健一, 井上北斗, 宮下和洋, 日本物理学会北陸支部例会, 2008.11.29 (福井大学)
 12. $SU(N_c)$ ゲージ理論におけるカイラル $SU(N_f)_L \times SU(N_f)_R$ 対称性の自発的破れの解析, 青木健一, 井上北斗, 宮下和洋, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008.09.22 (山形大学)
 13. 1次元量子散逸系における臨界現象の有限レンジスケーリングによる解析, 青木健一, 小林玉青, 桶琢磨, 富田洋, 日本物理学会第63回年次大会, 2008.03.24 (近畿大学)
 14. テンソルくりこみ群による2次元正方格子イジング模型の解析, 青木健一, 小林玉青, 鈴木浩生, 富田洋, 日本物理学会第63回年次大会, 2008.03.24 (近畿大学)
 15. 非摂動くりこみ群による有限温度・密度でのカイラル相構造の解析, 青木健二, 井上北斗, 宮下和洋, 日本物理学会第63回年次大会, 2008.03.24 (近畿大学)
 16. 梯子近似を超えたカイラル相転移の非摂動くりこみ群による解析, 青木健一, 井上北斗, 宮下和洋, 日本物理学会第63回年次大会, 2008.03.24 (近畿大学)
 17. Critical dissipation breaking quantum coherence., 青木健一, 小林玉青, 桶琢磨, 富田洋, 「量子論の諸問題と今後の発展」, 2008.03.20 (高エネルギー加速器研究機構)
 18. 量子散逸系における臨界現象の有限レンジスケーリングによる解析, 青木健二, 小林玉青, 桶琢磨, 富田洋, 日本物理学会北陸支部例会, 2007.12.01 (富山県立大学)
 19. 長距離相互作用1次元イジング系のRenormalization Groupと有限レンジスケーリングによる解析, 青木健一, 小林玉青, 桶琢磨, 富田洋, 日本物理学会北陸支部例会, 2007.12.01 (富山県立大学)
 20. 非摂動くりこみ群による有限温度・密度でのローレンツ不変でない有効相互作用の効果の解析, 青木健一, 井上北斗, 宮下和洋, 日本物理学会北陸支部例会, 2007.12.01 (富山県立大学)
 21. 非摂動くりこみ群によるゲージ理論における $SU(N_f)_L \times SU(N_f)_R$ 対称性の自発的破れの解析, 青木健一, 井上北斗, 宮下和洋, 日本物理学会北陸支部例会, 2007.12.01 (富山県立大学)
 22. 無限遠までの長距離相互作用を含む1次元イジング模型の有限レンジスケーリングによる解析, 青木健一, 小林玉青, 富田洋, 日本物理学会第62回年次大会, 2007.09.21 (北海道大学)
 23. 1次元量子散逸系における相転移のくりこみ群による解析, 青木健一, 小林玉青, 富田洋, 日本物理学会第62回年次大会, 2007.09.21 (北海道大学)
 24. 非摂動くりこみ群における有限温度・密度でのローレンツ不変性の破れの効果, 青木健一, 井上北斗, 宮下和洋, 日本物理学会第62回年次大会, 2007.09.21 (北海道大学)
 25. 非摂動くりこみ群によるNJL模型での $SU(N)_L \times SU(N)_R$ 対称性の破れの解析, 青木健一, 井上北斗, 宮下和洋, 日本物理学会第62回年次大会, 2007.09.21 (北海道大学)
 26. Analysis of 1D Systems with Long Range Interactions by Finite Range Scaling, Ken-Ichi Aoki, Tamao Kobayashi and Hiroshi Tomita, "Applications of Renormalization Group Methods in Mathematical Sciences", 2007.09.12, RIMS, Kyoto
 27. 長距離相互作用のある1次元イジング系での自発的対称性の破れのくりこみ

- 群による解析, 青木健一、小林玉青、富田洋, 日本物理学会 2007 春季大会, 2007.03.28(東京都立大学)
28. 時間非局所相互作用による量子トンネル効果抑制のくりこみ群による解析, 青木健一、小林玉青、富田洋, 日本物理学会 2007 春季大会, 2007.03.28 (東京都立大学)
29. 有限温度、有限密度でのカイラル相転移のくりこみ群による解析, 青木健一、井上北斗, 宮下和洋, 日本物理学会 2007 春季大会, 2007. 03. 27 (東京都立大学)
30. Renormalization group analysis of the quantum tunneling suppression due to long range interactions in the time direction, 青木健一、小林玉青、富田洋, 「場の理論の基礎的諸問題と応用-場の理論のトポロジ的視点-」, 2006. 12. 14 (基礎物理学研究所)
31. Renormalization group analysis of chiral phase structure of Nambu-Jona-Lassinio model and QCD in finite temperature and density, 青木健一、井上北斗, 宮下和洋, 「場の理論の基礎的諸問題と応用-場の理論のトポロジ的視点-」, 2006. 12. 15, 基礎物理学研究所
32. 長距離相互作用による 1 次元系の相転移について, 青木健一、小林玉青、富田洋, 日本物理学会北陸支部例会, 2006. 12. 02 (金沢大学)
33. くりこみ群による有限温度・有限密度での相構造の解析, 青木健一、井上北斗, 宮下和洋, 日本物理学会北陸支部例会, 2006. 12. 02 (金沢大学)
34. 長距離相互作用のあるイジング模型のくりこみ群による解析, 青木健一、小林玉青、富田洋, 日本物理学会第 61 回年次大会, 2006. 03. 28 (愛媛大学・松山大学)
35. 散逸量子系の臨界摩擦のくりこみ群による評価, 青木健一、小林玉青、富田洋, 日本物理学会第 61 回年次大会, 2006. 03. 28 (愛媛大学・松山大学)
36. 有限密度南部・ジョナラシニオ模型におけるカイラル対称性の回復の非摂動くりこみ群による解析, 青木健一、宮下和洋, 日本物理学会第 61 回年次大会, 2006. 03. 28 (愛媛大学・松山大学)
37. A Renormalization group Approach to the Critical Dissipation in Quantum Systems, 青木健一、小林玉青、富田洋, 「場の理論の基礎的諸問題と応用」, 2005. 12. 20 (基礎物理学研究所)
38. next nearest neighbor相互作用のあるイジング模型の解析, 青木健一、小林

玉青、富田洋, 日本物理学会北陸支部例会, 2005. 12. 03 (福井大学)

39. 散逸量子系での臨界摩擦, 青木健一、小林玉青、富田洋, 日本物理学会北陸支部例会, 2005. 12. 03 (福井大学)
40. 有限密度QCDにおけるカイラル対称性の相構造, 青木健一、宮下和洋, 日本物理学会北陸支部例会, 2005. 12. 03 (福井大学)
41. 量子散逸系のくりこみ群による解析, 青木健一、小林玉青, 日本物理学会 2005 秋季大会, 2005. 09. 15 (大阪市立大)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

青木 健一 (AOKI KEN-ICHI)
金沢大学・数物科学系・教授
研究者番号：00150912

(2) 研究分担者

鈴木 恒雄 (SUZUKI TSUNEO)
金沢大学・総合メディア基盤センター・教授
研究者番号：60019502

出渕 卓 (IZUBUCHI TAKU)
金沢大学・数物科学系・助教
研究者番号：60324068

(3) 協力研究者

小林 玉青 (KOBAYASHI TAMAO)
金沢大学・数物科学系・特任助教
研究者番号：60506822