

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K03974

研究課題名（和文）ハドロン・クォーク転移のトポロジーのパーシステントホモロジーを使った解析

研究課題名（英文）Topological analyses of hadron-quark transition by persistent homology

研究代表者

河野 宏明 (Kouno, Hiroaki)

佐賀大学・理工学部・教授

研究者番号：80234706

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,000,000円

研究成果の概要（和文）：この研究では、ハドロン・クォーク転移をトポロジカル・データ解析の有力な方法であるパーシステントホモロジーを使って解析した。陽子・中性子の仲間であるバリオンや核力を媒介する中間子は総称してハドロンと呼ばれ、クォークで構成されている。高温や高密度ではハドロンが壊れてクォーク物質が出現すると考えられるが、このハドロン・クォーク転移は高温では連続的なクロスオーバー転移であり、両相の区別は難しい。この研究では強い相互作用の基本理論である量子色力学やその有効模型（現象論模型）によるシミュレーションのデータをパーシステントホモロジーの手法で解析する事で両者が区別できる事を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

クォーク物質は加速器での生成が成功したと考えられているが、それ以外にも宇宙初期の高温状態や中性子星などの超高密度天体の内部にも存在していると考えられる。したがって、高温高密度におけるハドロンからクォーク物質への転移は、素粒子・原子核物理学のみならず、宇宙物理学や天体物理学においても非常に重要な問題である。しかし、その転移の性質はまだよく解明されていない。この研究は、この転移の解明に新しい手法を提案するものであり、大きな学術的意義がある。また、素粒子・原子核や宇宙・天体物理学は人類の根源的な問に答えるものであり、その意味で社会的意義も大きいと考えられる。

研究成果の概要（英文）：Using the persistent homology method, topological properties of hadron-quark transition was studied. It is well known that hadrons (baryons and mesons) consist of quarks and anti-quarks. At high temperature and/or high density, transitions from hadrons to quark matter are expected to occur. In principle, this phenomenon is described by Quantum chromodynamics (QCD) which is the basic theory of strong interaction. However, at high temperature, this transition is smooth crossover and it is difficult to distinguish quark phase from hadron phase. In this research, topology of the data obtained by using the simulations of QCD and its effective theory was analyzed by using the persistent homology analyses. It was shown that quark phases can be distinguished from hadron phase by the persistent homology analyses.

研究分野：原子核理論（理論核物理）

キーワード：パーシステントホモロジー 量子色力学 現象論模型 クォーク 相転移

1. 研究開始当初の背景

(1) 現在の素粒子物理学では、物質を構成する基本的な粒子はクォークと電子などのレプトンであると考えられている。このうち、クォークは3個で組になり原子核を構成する陽子や中性子を構成している。また、陽子や中性子の間には中間子が飛び核力を伝達して、この力により原子核がまとまっているが、中間子はクォークとその反粒子である反クォークでできている。陽子や中性子の仲間をバリオンと呼び、バリオンと中間子を総称してハドロンと呼ぶ。クォークや反クォークはハドロンの中にあるが、それを単体で取り出す事はできないと考えられている。これをクォークの閉じ込めという。クォークの閉じ込めはクォーク間に働く基本的な相互作用の1つである強い相互作用によって起こっていると考えられているが、まだ、正確なメカニズムは未解明である。

(2) 強い相互作用は、近距離では弱く、遠距離では強くなる性質がある。クォーク同士がバリオン内にいるときは、互いの距離が短く相互作用が弱い。この状態を漸近自由と呼ぶ。一方、クォークを他のクォークや反クォークから引き離そうとすると、強い引力が生じて引き離す事ができない。これが閉じ込めである。また、クォークはバリオン内ではかなり軽い粒子であるが、外からみるとバリオンの質量の3分の1を担うように見え、重くなる。この現象を説明するのがカイラル対称性の自発的破れである。強い相互作用を伝達する粒子はグルーオンと呼ばれる。強い相互作用を記述する基本理論は量子色力学(QCD)と呼ばれるが、この理論に摂動論を適用する事により漸近自由は既に説明されている。しかし、閉じ込めとカイラル対称性の破れは、非摂動的な議論を必要とし、それらの説明はまだきちんとはなされていない。

(3) QCD を非摂動的に扱う有力な方法として、格子 QCD の方法がある[文献]。これは、計算機上に作られた離散的 4 次元空間にクォークやグルーオンを配置し、非摂動的なシミュレーションを行うものである。格子点を増やしていく極限を考える事で連続時空が扱えると考えられる。統計力学的計算も行う事ができ、その結果、高温ではハドロンが溶けてクォークとグルーオンのプラズマ状態であるクォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)と呼ばれる状態が出現すると予測されている[文献]。一方、クォークが反クォークより過剰にある高密度状態では符号問題と呼ばれる困難のため信頼のおける格子 QCD の計算はできていないが、いくつかの QCD の有効模型(現象論模型)から、QGP とは異なるタイプのクォーク物質が存在するであろう事が予測されている。

2. 研究の目的

(1) 高温におけるハドロンからクォーク物質への転移は、格子 QCD により、その存在が数値的にはほぼ確立しており、高エネルギーの原子核衝突実験で QGP のような物質が既に作り出されていると考えられている。しかし、格子 QCD の結果から、高温におけるハドロンからクォーク物質への転移は連続的なクロスオーバー転移である事もほぼ確立しており、この転移においてハドロン相とクォーク相を区別する事は難しい。両相を区別する方法を確立する事が理論的にも実験的にも急務である。この研究では、格子 QCD やその有効模型によるシミュレーションによって得られたデータを、トポロジカル・データ解析の有力手法であるパーシステントホモロジーの方法[文献]により解析する事で両相を区別する事を目的とする。

(2) パーシステントホモロジーの手法は、物性物理学や化学の分野では多くの応用例があり、ガラスの構造の解析などに大きな成果を上げている。しかし、素粒子・原子核物理学分野では適用例がほとんどなく[文献]、この研究はその先駆けとなることを目標とする。したがって、分析結果そのものももちろん重要であるが、解析手法の確立も大きな目的である。有力な解析手法がきちんと確立すれば、将来的には素粒子・原子核物理学の他の現象や実験データの解析も可能となるからである。

3. 研究の方法

(1) 格子 QCD のシミュレーションを行い、必要なゲージ配位を生成する。計算機上に 4 次元の格子空間を設定し、格子点上にクォーク場を、辺上にグルーオン(ゲージ)場を配置する。そこで統計力学の大正準分布の分配関数に対応するゲージ配位を生成する。ゲージ配位の生成は、ハイブリッド・モンテカルロ法を用いる[文献]。すなわち、クォーク場を積分した後、擬フェルミオン場で書き換え、擬フェルミオン場とグルーオン場の理論において、仮想時間についての発展方程式を作り、それを発展させてゲージ場を生成し、最後にモンテカルロ法を用いて配位受け入れの可否を判定する。通常の QCD だけでなく、Z3 対称性を持つ、Z3-QCD[文献]についても同様の計算を行い、両者を比較する。

(2) 通常の格子 QCD に関しては、一般公開されている Lattice QCD Tool Kit [文献]のプログラムを使用し、Z3 対称な格子 QCD に関しては、Lattice QCD Tool Kit のプログラムを 3 重化して使うことにより、Z3 対称化して使用した。シミュレーションの数値計算には、大阪大学 CMC、RCNP の大型計算機 SX-ACE およびその後継機である SQUID を使用した。

(3) 有限化学ポテンシャルの領域では、符号問題があるため、位相クエンチ近似を用いて、配位の生成を行う。

(4) 得られた配位をもとに、物理量の計算を行う。物理量としては、ゲージ場のブラケット、ポリヤコフープ、粒子数である。Lattice QCD Tool Kit では、格子 QCD のフェルミオン場として、Wilson fermion を使用している事、計算時間の関係から現実より重いクォーク質量を使っているなどの理由から、カイラル凝縮の計算は行わなかった。

(5) 格子 QCD は第 1 原理的な計算であるが、計算に時間やコストが多くかかる。解析手法の開発を効率よく行うためには、QCD の有効模型（現象論模型）[文献]による計算も有効である。そこで、いくつか有効理論のシミュレーションプログラムも作成し、そのシミュレーションも並行して行う。

(6) 得られたシミュレーションのデータのトポロジを、パーシステントホモロジーを用いて、解析し、パーシステント図などを作成する。パーシステントホモロジーは、データ解析のスケールを変えながら、データ空間の中に存在する“穴”の個数や性質、特にその存在期間を解析する方法である[文献]。

4. 研究成果

(1) 大阪大学のサイバーメディアセンターおよび核物理研究センターの大型計算機 SX-ACE 上で、零化学ポテンシャルの領域での格子 QCD の数値シミュレーションを実行し、ゲージ配位を生成した。格子の大きさは、空間方向が 8、時間方向が 4 である。温度 T としては、零化学ポテンシャルでの擬臨界温度を T_c として、 $T/T_c=0.76 \sim 3.01$ のパラメータについて行った。得られた配位数は、それぞれのパラメータに対して 10000 から 40000 程度である。なお、2021 年度より SX-ACE が後継機の SQUID に代わったため、プログラムやコンパイルの方法に若干の修正を行い同様のシミュレーションを継続した。

(2) (1)で生成された配位を使って、ゲージ場のブラケットおよびポリヤコフープの計算を行った。

(3) 大阪大学の大型計算機 SX-ACE および SQUID 上で、有限化学ポテンシャルの領域での格子 QCD の数値シミュレーションを位相クエンチ近似のもとで実行し、ゲージ配位を生成した。格子の大きさは、空間方向が 8、時間方向が 4 である。温度としては、 $T/T_c=0.76 \sim 0.93$ のパラメータについて行った。化学ポテンシャル μ の値の範囲は、 $\mu/T=0.5 \sim 4.0$ である。得られた配位数は、それぞれのパラメータに対して 10000 から 15000 程度である。クエンチ近似であるので、この計算はアイソスピン化学ポテンシャルがある状況での計算と同等な計算である。

(4) (3)で生成された配位を使って、ゲージ場のブラケット、ポリヤコフープおよび粒子数の計算を位相クエンチ近似のもとで行った。

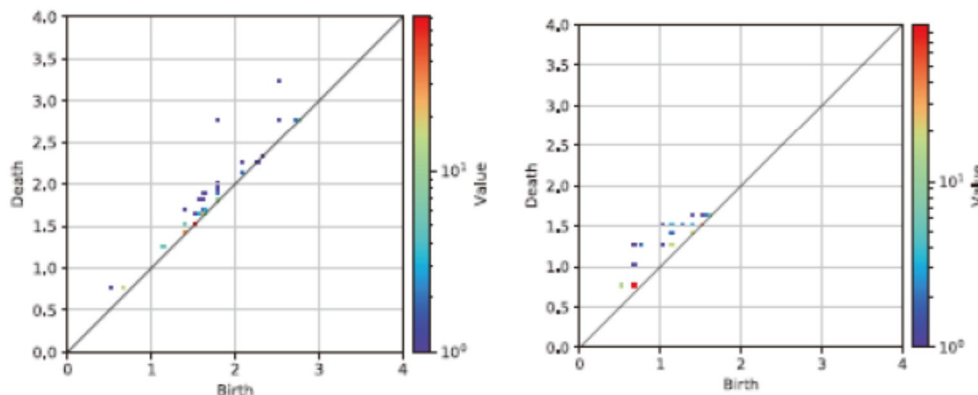
(5) 上記で得られた物理量のうち、ポリヤコフープについて、パーシステントホモロジー解析を行った。そのうちの Z3-QCD に関するものは、大阪大学 RCNP の 2021 年度の年間報告のハイライト論文として発表した。結果として、Z3-QCD では、中間温度でアイソスピン化学ポテンシャルが比較的大きい領域は非閉じ込め相でなく、閉じ込め相である事がわかった。

(6) Potts 模型を用いたシミュレーションを行い、パーシステントホモロジー解析を行った。その結果、データ空間にできる“穴”の寿命の平均値と最大の“穴”の性質が転移の性質を考える上で、重要である事がわかった。この事は今後の解析を進展させる上で重要な知見である。この結果は査読付き学術論文として発表した。

(7) 有効ポリヤコフライン模型などの他の模型についても研究を行い、数値計算やパーシステントホモロジー解析を行った。それらの結果は学術論文や学会発表として発表した。

(8) 以下にパーシステントホモロジー解析で得られたパーシステント図の例を示す。これは通常の QCD の零化学ポテンシャルの例である。横軸は穴の発生スケール、縦軸は穴の消滅スケールである。低温の閉じ込め相（ハドロン相）と高温の非閉じ込め相（クォーク相）では穴の分布が明らかに異なる。

PH解析 ($\mu=0$ 左：低温、右：高温)



<引用文献>

青木慎也、格子上の場の理論, 第 12 章、シュプリンガー・フェアクラーク東京株式会社, 2005 年.

秋葉康之, クォーク・グルーオン・プラズマの物理, 物理学最前線 3, 共立出版, 2014 年

平岡裕章, タンバク質構造とトポロジー パーシステントホモロジー群入門, 共立出版, 2013 年

Takehiro Hirakida, Kouji Kashiwa, Junpei Sugano, Junichi Takahashi, Hiroaki Kouno and Masanobu Yahiro, Persistent homology analysis of deconfinement transition in effective Polyakov-line model

International Journal of Modern Physics A, 35 巻, 2020, 2050049(24pages)

Hiroaki Kouno, Kouji Kashiwa, Junichi Takahashi, Tatsuhiro Misumi and Masanobu Yahiro,

Understanding QCD at high density from a Z3-symmetric QCD-like theory, Physical Review D, 93 巻, 2016, 056009(10pages).

S. Choe, 中村純、野中千穂、室谷心, Lattice QCD Tool Kit in Fortran90, 素粒子論研究, 108 巻, 2003, 1-43.

Takehiro Hirakida, Hiroaki Kouno, Junichi Takahashi and Masanobu Yahiro, Interplay between sign problem and Z3 symmetry in three-dimensional Potts models, Physical Review D, 94 巻, 2016, 014011(13pages)

Takehiro Hirakida, Junpei Sugano, Hiroaki Kouno, Junichi Takahashi and Masanobu Yahiro,

Sign problem in a Z3-symmetric effective Polyakov-line model, Physical Review D, 96 巻, 2017, 074031(17pages)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Kashiwa Kouji, Kouno Hiroaki	4. 巻 103
2. 論文標題 Anatomy of the dense QCD matter from canonical sectors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 114020-1 ~ 10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.114020	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 Kouno Hiroaki, Kashiwa Kouji, Hirakida Takehiro	4. 巻 104
2. 論文標題 Nonanalyticity, sign problem, and Polyakov line in a Z3-symmetric heavy quark model at low temperature: Phenomenological model analyses	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 014012-1 ~ 16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.104.014012	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 Kashiwa Kouji, Kouno Hiroaki	4. 巻 105
2. 論文標題 Multiplicity, probabilities, and canonical sectors for cold QCD matter	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 054017-1 ~ 11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.105.054017	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 Hiroaki Kouno	4. 巻 50
2. 論文標題 Number density in Z3-symmetric lattice QCD at finite chemical potential under the phase quenched approximation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 佐賀大学理工学部集報	6. 最初と最後の頁 1 ~ 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kashiwa Kouji, Kouno Hiroaki	4. 巻 103
2. 論文標題 Information theoretical view of QCD effective model with heavy quarks	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.014014	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 河野宏明, 開田丈寛	4. 巻 49
2. 論文標題 素粒子原子核物理学におけるパーシステントホモロジー解析	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 佐賀大学理工学部集報	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kashiwa Kouji, Hirakida Takehiro, Kouno Hiroaki	4. 巻 14
2. 論文標題 Persistent Homology Analysis for Dense QCD Effective Model with Heavy Quarks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Symmetry	6. 最初と最後の頁 1783~1783
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/sym14091783	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 Hiroaki Kouno, Kashiwa Kouji, Hirakida Takehiro	4. 巻 2021
2. 論文標題 Z3 -QCD and persistent homology	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Annual report 2021 (2021 Highlights), RCNP, Osaka University	6. 最初と最後の頁 1~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 河野宏明, 柏浩司, 開田丈寛
2. 発表標題 量子色力学の有効模型の複素化学ポテンシャル領域における解析
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会 オンライン開催
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柏浩司, 河野宏明
2. 発表標題 カノニカル法に基づいたQCD相構造の研究
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会 オンライン開催
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河野宏明, 柏浩司, 開田丈寛
2. 発表標題 低温極限における有効ポリャコフライン模型
3. 学会等名 第127回日本物理学会九州支部例会 オンライン開催
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柏浩司, 河野宏明
2. 発表標題 カノニカル法を利用した有限密度QCD物質の研究
3. 学会等名 第127回日本物理学会九州支部例会 オンライン開催
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kouji Kashiwa, Hiroaki Kouno, Takehiro Hirakida
2. 発表標題 Persistent homology analysis for QCD effective models
3. 学会等名 LATTICE 21 (The 38th International Symposium on Lattice Field Theory) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河野宏明, 開田丈寛, 柏浩司, 高橋純一, 八尋正信
2. 発表標題 QCDの有効模型とパーシステントホモロジー解析
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 河野宏明, 開田丈寛, 高橋純一, 八尋正信
2. 発表標題 有限アイソスピン密度がある場合のZ3対称な格子QCD計算
3. 学会等名 第126回日本物理学会九州支部例会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 河野宏明
2. 発表標題 Z3対称な量子色力学における格子シミュレーション
3. 学会等名 大阪大学サイバーメディアセンター2020年度公募型利用制度成果報告会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河野宏明, 柏浩司, 開田丈寛
2. 発表標題 量子色力学におけるパーシステントホモロジーの応用
3. 学会等名 第128回日本物理学会九州支部例会 熊本大学
4. 発表年 2022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
研究協力者	柏 浩司 (Kashiwa Kouji)		
研究協力者	開田 丈寛 (Hirakida Takehiro)		

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
---------	---------