

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24540266

研究課題名(和文) ホログラフィックQCD模型を用いた有限密度QCDの探究

研究課題名(英文) Research on the finite density QCD using holographic QCD models

研究代表者

原田 正康 (Harada, Masayasu)

名古屋大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40311716

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：超弦理論のゲージ-重力対応に基づいて低エネルギーハドロン有効模型を構成する手法を構築し、高密度核物質における相構造やハドロン の性質変化を調べました。主な結果は次のようです。カイラル対称性の自発的破れを引き起こすカイラル凝縮が空間異方性を持つハーフスキルミオン(HS)相の存在を確認しました。そして、低密度領域では核子の有効質量は密度の増加に伴って減少し、HS相では密度に依存せず一定になることを明らかにしました。こまた、HS相においては、チャームクォークを含む擬スカラー・ベクトル型D中間子と、スカラー・軸性ベクトル型D中間子の質量が縮退することを示しました。

研究成果の概要(英文)：I constructed a low-energy hadron effective model based on the gauge-gravity duality in superstring theories, and studied phase structure and changes of hadron properties in nuclear matter at high density. Main results are as follows. I confirmed the existence of half-Skyrmion phase where the spontaneous chiral symmetry breaking has an inhomogeneity in space. I showed that the nucleon mass decreases with density in the low-density region, while it is stable against the density in the half-Skyrmion phase. I also showed that the masses of the pseudoscalar and vector D mesons, which include a charm quark, are degenerate with those of the scalar and axial-vector D mesons.

研究分野：理論ハドロン物理学

キーワード：カイラル対称性 ホログラフィック模型 有効模型 核物質 国際研究者交流

1. 研究開始当初の背景

現在核子や中間子などのハドロン間の強い相互作用は、その構成要素であるクォークを含む基本理論である量子色力学 (QCD) を用いて記述されています。QCDにおいて、軽いハドロンを構成する u、d、s クォークセクターに着目した場合、ラグランジアンレベルで近似的に存在するカイラル対称性は、QCDの強い相互作用により自発的に破れています。この自発的破れは、核子などの質量の生成と深く関連していると考えられ、カイラル対称性の自発的破れの機構を明らかにすることは、質量生成機構の解明に重要な手がかりを与えることが期待されます。

QCDを有限温度・有限密度系で扱う場合、高温・高密度領域でハドロン相から相転移が起こり、カイラル対称性が回復することが指摘されています。そしてそれに伴い、ハドロン質量などの性質が変化することが期待されています。

低温度超高密度領域ではカラー超伝導相が存在することが多くの理論的解析により示されていますが、標準核子密度領域から中性子星内部などで期待される高密度領域での相構造やハドロンの性質は、様々な理論的提案がありますが、明確にはなっていません。実験的には、核物質中でのベクトル中間子の性質の変化が KEK-PS/E325 実験[4]等において観測されていますが、この実験結果が、[5]などで予言されたカイラル対称性の回復に伴う質量の減少により説明されるかは、理論面を整備することが必要不可欠です。

QCD等の強結合ゲージ理論を調べる手段として格子理論を用いたシミュレーションがありますが、有限密度領域では符号問題のためにシミュレーション解析ができません。そこで私は、有効模型を用いた解析が有用であると考えています。標準核子密度領域では、ハドロン、特に核子の自由度を含む有効模型を構築し、それを用いてハドロンの質量変化などを調べることで、核物質中でのハドロンの性質変化と、核子の存在の関係がより明確になると考えています。また、有効模型を用いることにより、カイラル対称性の回復とハドロンの性質変化との関係が、より見やすくなると考えています。

低エネルギーでのハドロンを記述する模型の中に、超弦理論の双対性に基いて構成されたホログラフィックQCD模型(文献[6]や[7]等)があります。この模型の有限バリオン密度への適用方法は、文献[8]等の多くの方法が提案されていますが、現象論への適用はあまり進んでいません。

一方、高密度核物質を記述する別の方法としては、文献[9]などで提案されたように、中間子の有効模型に存在するソリトン解として核子を記述し、その核子を格子状に配列する手法(スキルム・クリスタル)があります。近年、この模型にスカラー型中間子(文献[2]等)や「隠れた局所対称性」(HLS)理論の枠組

みでのベクトル中間子(文献[3]等)を加えた解析が行われ、クォーク・反クォーク型凝縮がゼロであるにもかかわらず中間子崩壊定数がゼロではない新しい相“ハーフ・スキルミオン相”の存在が示唆されました。

私はこれまで HLS 理論を用い、理論面を整備(文献[10]の総合報告を参照)すると共に、有限温度・密度における様々な現象の解析[11]等を行ってきました。また、文献[12]では、ホログラフィックQCD模型の一つである酒井-杉本型[7]において、中間子と中間子以外の無限個のカルツァ-クラインモードを消去して HLS 理論と関連づけ、中間子の電磁形状因子など運動量に依存する物理量を計算する手法を提案しました。また、文献[13]では、その手法を応用して陽子の電磁形状因子を計算する手法を提案しました。

- [1] D.K.Hong, M.Rho, H.U.Yee and P.Yi, JHEP 09, 063 (2007).
- [2] H.-J. Lee, B.-Y. Park, M. Rho, V. Vento, Nucl. Phys. A 741, 161 (2004); *ibid.* 726, 69 (2003).
- [3] B.-Y.Park, M.Rho, V.Vento, Nucl. Phys. A 736, 129 (2004); *ibid.* 807, 28 (2008); H.K.Lee, M.Rho, Nucl. Phys. A 829, 76 (2009).
- [4] K. Ozawa et al. [E325 Collaboration], Phys. Rev. Lett. 86, 5019 (2001); M. Naruki et al. [E325 Collaboration], Phys. Rev. Lett. 96, 092301 (2006) など.
- [5] G.E.Brown, M.Rho, Phys. Rev. Lett. 66, 2720(91); T.Hatsuda, S.H.Lee, Phys. Rev. C46, 34(92) 等
- [6] J.Erlich, E.Katz, D.T.Son, M.A.Stephanov, Phys. Rev. Lett. **95**, 261602 (2005).等
- [7] T. Sakai and S. Sugimoto, Prog. Theor. Phys. 113, 843 (2005): 114, 1083 (2005).
- [8] K.-Y.Kim, S.-J.Sin, I.Zahed, JHEP01,002 (2008); M.Rozali, H.-H.Shieh, M.Van Raamsdonk, J.Wu, JHEP **0801**, 053 (2008); O.Bergman, G.Lifschytz, M.Lippert, JHEP **0711**,056 (2007) 等
- [9] I.R. Klebanov, Nucl. Phys. B **262**, 133 (1985); A.S. Goldhaber, N.S. Manton, Phys. Lett. B **198**, 231 (1987); M. Kugler, S. Shtrikman, Phys. Rev. D **40**, 3421 (1989).
- [10] M. Harada and K. Yamawaki, Physics Reports **381**, 1 (2003).
- [11] M. Harada, C. Sasaki, Phys. Lett. B **537**, 280 (2002); Phys. Rev. D 74, 114006 (2006); Phys. Rev. C 80, 054912 (2009); M. Harada, Y. Kim, M. Rho, Phys. Rev. D **66**, 016003 (2002); M. Harada, C. Sasaki, W. Weise, Phys. Rev. D 78, 114003 (2008)等.

- [12] M. Harada, S. Matsuzaki, K. Yamawaki, Phys. Rev. D **74**, 076004 (2006); *ibid.* **82**, 076010 (2010).
 [13] M. Harada and M. Rho, Phys. Rev. D **83**, 114040 (2011)..

2. 研究の目的

本研究は、超弦理論の双対性から示唆されるホログラフィック QCD に基づく模型を用いて高密度での相構造やハドロン の性質の変化を明らかにすることを目的としました。具体的には、次の 2 点を目標としました。(1) ホログラフィック QCD 模型自体に密度効果を取り入れる手法の構成。(2) 上記の手法を用いたカイラル対称性の回復とハドロン質量等の変化の関係を説明。(3) 中間子のみを含むホログラフィック QCD 模型から低エネルギー有効模型を構成し、その模型でのソリトン解としてバリオンを記述する手法の構成。(4) 上記で構成されたバリオンを格子状に配列することにより核物質を記述するスキルム・クリスタル手法を用いた核物質の相構造とハドロン質量等の解析。この際には特に、文献[2,3]等で提案された低温高密度特有の新しい物質相“ハーフスキルミオン相”の存在の確認と、その相でのハドロン の性質の解明に着目しました。

3. 研究の方法

本研究では、ホログラフィック QCD に基づく模型に核子による密度効果を取り入れ、高密度核物質の相構造やハドロン質量の変化等を解析するため、次の方法で研究を進めました。

- (1) ホログラフィック QCD 模型自体に核子による密度効果を取り入れる手法の構成とそれをを用いた解析で、下記の方法を実施しました。
- (a) 核子をあらわに含む文献[1]等のトップダウン型模型において、核子の運動方程式と、バリオン数に対応するゲージ場の運動方程式等を連立させ回帰的に解くことによって有限密度効果を取り入れる手法の有効性を解析しました。
- (b) 文献[6]等で提案されたボトムアップ型ホログラフィック QCD 模型において、文献[8]の手法を応用して密度効果を取り入れて、相構造やハドロン質量変化を解析しました。
- (2) ホログラフィック QCD によってパラメータを決めたメソンに対するハドロン有効模型でソリトン解として核物質を記述する手法の構成とそれをを用いた解析として、次を実施しました。
- (a) 文献[12]で提案した手法を用いて、ホログラフィック QCD 模型から低エネルギーでパイ中間子、ロー中間子、オメガ中間子を含むハドロン模型を構成します。その模型でのソリトン解として核子を記

述する手法の妥当性を解析しました。

- (b) 上記の模型を用い、文献[2][3]等の解析に基づき、ソリトン解を格子状に配列して核物質を記述するスキルムクリスタル模型を用い、高密度核物質の相構造やハドロン質量の変化を解析しました。

4. 研究成果

- (1) 核子場を含むホログラフィック QCD 模型で、核子に対する平均場を導入する手法を提案しました。そして、核子の有効質量が、核物質中で密度の増加に伴って減少することを示しました。結果は、査読付き学術雑誌に掲載されました。(雑誌掲載論文の[19], [14])
- (2) ホログラフィック模型にアイソスピン化学ポテンシャルを取り入れた解析を行い、パイ中間子凝縮の存在がカイラル対称性の破れを増強することを示しました。さらに、核子の効果を取り入れた解析を行い、パイ中間子凝縮相への相転移が、核子がない場合に比べて大きなアイソスピン化学ポテンシャルで起こることを示しました。結果は査読付き学術雑誌に掲載されました。(雑誌掲載論文の[13], [9])
- (3) ホログラフィック QCD 模型から、低エネルギーハドロン有効模型のパラメータを決める手法、及び、核子とその模型のソリトン解として記述する手法を整備しました。結果は査読付き学術雑誌に掲載されました。(雑誌掲載論文の[18], [17], [11], [3])
- (4) 上記で得られるソリトン解にスキルム・クリスタル手法を用いて核物質を記述する模型を発展させました。そして、高密度核物質では、ハーフスキルミオン相と呼ばれる新しい物質相が存在することを確認すると共に、より高密度ではカイラル対称性が回復する可能性を指摘しました。また、低密度領域では核子の有効質量は密度の増加に伴って減少すること、及びハーフスキルミオン相では密度に依存せず一定になることを見いだしました。さらに、ハーフスキルミオン相では、凝縮が空間的な周期性を持って増減を繰り返しており、他の有効模型で得られているカイラル密度波との類似性があることを明らかにしました。結果は査読付き学術雑誌に掲載されました。(雑誌掲載論文の[15], [10], [7])
- (5) 上記(4)の解析と相補的な役割を考え、より一般的なハドロン模型を用いた核物質の記述方法を構成しました。結果は査読付き学術雑誌に掲載されました。(雑誌掲載論文の[5])
- (6) 上記(4)のハーフスキルミオン相のようにカイラル凝縮が空間的な周期性を持って増減を繰り返す相における、チャームクォークを含む D 中間子の質量スペクトルを解析しました。スピン・アイソスピンが異なる中間子間に混合が起こること、及び、擬スカラー・ベクトル型 D 中間子と、スカラー・軸性ベクトル型 D 中間子の質量が縮退することを

示しました。また、この質量変化のクォーク模型を用いた理解を示しました。結果は査読付き学術雑誌に掲載されました。(雑誌掲載論文の[12], [8])

(7) ホログラフィック QCD 模型に基づいた解析と相補的な役割を果たすものとして、より一般的なハドロン有効模型を用いてハドロンの性質を解析しました。結果は査読付き学術雑誌に掲載されました。(雑誌掲載論文の[20], [16], [6], [4], [2], [1])

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 20 件)

- [1] “Mass of heavy-light mesons in a constituent quark picture with partially restored chiral symmetry”, A. Park, P. Gubler, Masayasu Harada, S. H. Lee, C. Nonaka and W. Park, Physical Review D 93, 054035:1-5 (2016). (refereed)
- [2] “Degeneracy of doubly heavy baryons from heavy quark symmetry”, Yong-Liang Ma, Masayasu Harada, Physics Letters B 754, 125-128 (2016). (refereed)
- [3] “Effects of the scalar mesons in a Skyrme model with hidden local symmetry”, Bing-Ran He, Yong-Liang Ma, Masayasu Harada, Physical Review D 92, 076007:1-9 (2015). (refereed).
- [4] “Extended Goldberger-Treiman relation in a three-flavor parity doublet model”, Hiroki Nishihara, Masayasu Harada, Physical Review D 92, 054022 (2015) (refereed).
- [5] “Asymmetric nuclear matter in a doublet model with hidden local symmetry”, Yuichi Motohiro, Youngman Kim, Masayasu Harada, Physical Review C 92, 025201:1-8 (2015) (refereed).
- [6] “Doubly heavy baryons with chiral partner structure”, Yong-Liang Ma, Masayasu Harada, Physics Letters B 748, 463-466 (2015) (refereed).
- [7] “Inhomogeneous quark condensate in compressed Skyrmion matter”, Masayasu Harada, Hyun Kyu Lee, Yong-Liang Ma, Mannque Rho, Physical Review D 91, 096011:1-6 (2015) (refereed).
- [8] “Mass degeneracy of heavy-light mesons with chiral partner structure in the half-Skyrmion phase”, D. Suenaga, B.-R. He, Y.-L. Ma, Masayasu Harada, Physical Review D 91, 036001:1-5 (2015) (refereed).
- [9] “Equation of state in the pion condensation phase in asymmetric nuclear matter using a holographic QCD model”, Hiroki Nishihara and Masayasu Harada, Physical Review D 90, 115027:1-11 (2014) (refereed)
- [10] “Dense baryonic matter in conformally-compensated hidden local symmetry: Vector manifestation and chiral symmetry restoration”, Yong-Liang Ma, Masayasu Harada, Hyun Kyu Lee, Yongseok Oh, Byung-Yoon Park, Mannque Rho, Physical Review D 90 (2014) 034015:1-15 (査読あり)
- [11] “Chiral effective theories from holographic QCD with scalars”, Masayasu Harada, Yong-Liang Ma, Shinya Matsuzaki, Physical Review D 89 (2014) 115012:1-13 (査読あり)
- [12] “D and D* meson mixing in spin-isospin correlated cold nuclear matter”, Daiki Suenaga, Bing-Ran He, Yong-Liang Ma, Masayasu Harada, Physical Review C 89 (2014) 068201:1-4 (査読あり)
- [13] “Enhancement of Chiral Symmetry Breaking from the Pion condensation at finite isospin chemical potential in a holographic QCD model”, Hiroki Nishihara, Masayasu Harada, Physical Review D 89 (2014) 076001:1-8 (査読あり)
- [14] “Parity doubling structure of nucleon at non-zero density in the holographic mean field theory”, Bing-Ran He, Masayasu Harada, Physical Review D 88 (2013) 095007:1-9 (査読有)
- [15] “Dense Baryonic Matter in Hidden Local Symmetry Approach: Half-Skyrmions and Nucleon Mass”, Yong-Liang Ma, Masayasu Harada, Hyun Kyu Lee, Yongseok Oh, Byung-Yoon Park and Mannque Rho, Physical Review D 88, 014016:1-12 (2013) (査読有)
- [16] “Chiral partner structure of heavy baryons from the bound state approach with hidden local symmetry”, Masayasu Harada and Yong-Liang Ma, Physical Review D 87, 056007:1-9 (2013) (査読

- あり)
- [17] “Skyrmions with vector mesons in the hidden local symmetry approach”, Yong-Liang Ma, Ghil-Seok Yang, Yongseok Oh, Masayasu Harada, Physical Review D 87, 034023:1-17 (2013) (査読あり)
- [18] “Hidden Local Symmetry and Infinite Tower of Vector Mesons for Baryons”, Y.-L. Ma, Y. Oh, G.-S. Yang, M. Harada, H. K. Lee, B.-Y. Park, M. Rho, Physical Review D86, 074025:1-9 (2012) (refereed)
- [19] “Holographic Mean-Field Theory for Baryon Many-Body Systems”, Masayasu Harada, Shin Nakamura, Shinpei Takemoto, Physical Review D86 (2012) 021901(R):1-4 (査読あり)
- [20] “Effect of sigma meson on the D1(2430) D decay”, Masayasu Harada, Hironori Hoshino, Yong-Liang Ma, Physical Review D85, 114027:1-13 (2012) (査読あり)

[学会発表] (計 15 件)

- [1] 口頭発表: “Degeneracy of doubly heavy baryons from heavy quark symmetry”, Masayasu Harada, 日本物理学会第 71 回年次大会, (東北学院大学 (泉キャンパス)、仙台、2016 年 3 月 19 日)
- [2] 口頭発表: “Degeneracy of doubly heavy baryons from heavy quark symmetry”, Masayasu Harada, “Progress on J-PARC hadron physics in 2016”, (Ibaraki Quantum Beam Research Center, Tokai, Ibaraki, Japan, March 2-4, 2016)
- [3] ポスター発表: “Degeneracy of doubly heavy baryons from heavy quark symmetry”, Masayasu Harada, at “The 31st Reimei WorkShop on Hadron Physics in Extreme Conditions at J-PARC”, (Advanced Science Research Center (ASRC), JAEA Tokai Campus, January 18-20)
- [4] 口頭発表: “A study of asymmetric nuclear matter in a parity doublet model”, Masayasu Harada, at Workshop on Dense Matter from Chiral Effective Theory, (Jilin University, Changchun, China, June 25 – 30, 2015)
- [5] 招待講演: “Charmed hadrons in nuclear medium”, M. Harada, “KEK theory center workshop on Hadron

- physics with high-momentum hadron beams at J-PARC in 2015”, (KEK, つくば, 2015 年 3 月 16 日)
- [6] 招待講演: “Modification of spectrum of heavy-light mesons in nuclear medium”, Masayasu Harada, Hadrons and Hadron Interaction in QCD, (京都大学基礎物理学研究所, 2015 年 3 月 2 日)
- [7] 招待講演: “Mass modification of heavy-light mesons in spin-isospin correlated matter”, Structure and production of charmed hadrons II, August 17, 2014, J-PARC, 東海村
- [8] 招待講演: “Hadron phenomenology based on holographic QCD models”, Masayasu Harada, The 27th Spring School on Particles and Fields in Taiwan (SS2014) (Chang Gung University at Taoyuan, Taiwan, April 2-5, 2014)
- [9] 招待講演: “New Approaches to In-medium spectral function – Holographic Mean-Field Theory for Baryon Many Body Systems-”, Electromagnetic Probes to Strongly Interacting Matter: Statuses and Future of Low-Mass Lepton-Pair Spectroscopy, May 20-24, 2013, ECT*, Trento, Italy.
- [10] 招待講演: “ヘビーハドロン有効理論”, Masayasu Harada, 「ヘビークォークハドロンと原子核のスペクトルと構造」研究会 (KEK, February 26-28, 2014) [1]
- [11] 招待講演: “Chiral Doubling of Heavy Baryons from the Bound State Approach”, Masayasu Harada, 「チャームバリオンの構造と生成」研究会 (J-PARC, September 10-13, 2013)
- [12] 招待講演: “Holographic Mean-Field Theory for Baryon Many-Body Systems”, Masayasu Harada, 4th Year of APCTP-WCU Focus program “From dense matter to compact stars in QCD and in hQCD” (April 14 - 24, 2013, APCTP, Pohang, Korea)
- [13] 口頭発表: “Holographic Mean-Field Theory for Baryon Many-Body Systems”, Masayasu Harada, Shin Nakamura, Shinpei Takemoto, KMI-GCOE Workshop on “Strong Coupling Gauge Theories in the LHC Perspective (SCGT12)”, December 4-7, 2012, Nagoya University, Nagoya Japan.
- [14] 招待講演: “Holographic Mean-Field Theory for Baryon Many-Body Systems”, Masayasu Harada, WCU Mini-workshop on “holographic landscape of dense matter”, (2012 年 10 月 11 日, Hanyang Univ., 韓国.)

[15] 招待講演：“ Study of exotic hadrons in effective models for chiral doubling of charmed mesons ”, Masayasu Harada, Heavy Quark Hadrons at J-PARC 2012 (June 18-22, 2012, 東工大)

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

原田正康 (Harada Masayasu) 名古屋大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：4 0 3 1 1 7 1 6