

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20540262

研究課題名(和文)

有限温度・有限密度カイラル相転移とハドロン・クォークの性質の研究

研究課題名(英文)

Research on the chiral phase transition and the properties of Hadrons and Quarks at finite temperature and/or density

研究代表者：

原田 正康 (Harada Masayasu)

名古屋大学・理学研究科・教授

研究者番号：40311716

研究成果の概要(和文)：

有効模型を用いて、有限温度・密度におけるハドロンの性質の変化が、観測可能量に及ぼす影響を中心に研究を進めました。そして、有限密度に特有のベクトル中間子と軸性ベクトル中間子の混合効果が、レプトン対スペクトルにこれまでに知られていなかったブロードニング効果を与えることを見いだすなどしました。また、理論面を整備するため、ホログラフィック QCD (hQCD) 模型と隠れた局所対称性模を関係づける手法を提案しました。

研究成果の概要(英文)：

Using effective models of hadrons, I studied, e.g., how the changes of hadron properties affect to physical observables at finite temperature and/or density. And I found e.g., that the effect of mixing between the vector and axial-vector mesons gives a broadening effect to the di-lepton spectrum. For making a new way of the analysis, I proposed a way to relate holographic QCD (hQCD) models to the model based on the hidden local symmetry.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：量子色力学(QCD)、カイラル対称性、隠れた局所対称性、低エネルギー有効模型、カイラル相転移、レプトン対エネルギー分布、シュウィンガー・ダイソン方程式、ベクトルボゾン、ベクトル-軸性ベクトル中間子混合、4クォーク凝縮、2カラーQCD、ホログラフィックQCD

1. 研究開始当初の背景

現在核子や π 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クォーク・グルーオン・プラズマ相 (QGP 相) への相転移が起こり、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。実際、1995年・1996年に CERN/SPS 実験において測定されたレプトン対エネルギー分布は、 ρ 中間子が真空中と同じ性質を持つとすると説明できません。そして、カイラル対称性の回復のシグナルとしてベクトル型中間子である ρ 中間子が媒質中で軽くなるとする、Brown-Rho スケーリングに基づくドロッピング ρ シナリオ[1]で実験結果が説明されることが示されました[2]。ベクトル型中間子の質量減少は、最近の KEK-PS/E325 実験[3]でのレプトン対エネルギー分布の異常をも説明するものです。

私はこれまで、QCD のカイラル対称性に基づき、 π 中間子等の擬スカラー中間子に加え ρ 中間子等のベクトル中間子も含む有効理論である「隠れた局所対称性」理論(HLS 理論)を用い、理論面を整備すると共に、様々な現象への応用を行ってきました。文献[4]では、HLS 理論の枠組みでカイラル対称性の回復が期待されているラージ・フレーバーQCD を調べ、相転移点近傍ではベクトル中間子の質量が軽くなり、擬スカラー中間子とカイラル対称性のもとでパートナーとなるという、これまでには考えられていなかった新しい型のカイラル相転移(Vector Manifestation: VM)が起こることを指摘しました。文献[5]では、有限温度・有限密度 QCD でのカイラル相転移で VM の記述方法を確立しました。そして、これらの HLS 理論に関する総合報告を Physics Reports[6]に掲載しました。その後も、VMの枠組みでの様々な物理量を調べました。特に文献[7]では、通常はよい近似で成り立つベクトル中間子ドミナンス (VD) が相転移点近傍で大きく破れていることを指摘しました。さらに文献[8]において、擬スカラー・ベクトル中間子以外に軸性ベクトルを加えた有効理論を構築し、その枠組みでの相転移を調べました。

2005年、CERN/SPS 実験の NA60 グループより、新しいレプトン対エネルギー分布データが発表され[9]、ナイーブなドロッピング ρ シナリオでは説明されないことが示されました[10]。この解析においては、我々などが指摘した VD の破れの効果を取り入れられていないため[11]、その効果を取り入れた解析を行い、VDの破れがVDを仮定する通常の解析を実験データに近づける効果を持つことを示しました[12]。

レプトン対エネルギー分布測定は、現在ブルックヘヴン国立研究所で行われている RHIC 実験や、2007年からヨーロッパ共同研究所で稼動する LHC 実験、ドイツ・重イオン研究所(GSI)での新しいプロジェクト(FAIR 実験)の重要課題のひとつです。実験結果と比較しカイラル対称性の破れの機構を解明するためには、QCD との密接な関連に基づく理論的解析方法を整備することが急務となっています。

最近の RHIC 実験結果により、相転移点近傍の QGP 相は強結合領域であることが強く示唆されている。そして、QGP 相においても、グルーオンとの相互作用によりカイラル不変な質量を持ったクォーク[13]から、ハドロン的な束縛状態が作られ、カイラル相転移の構造が変化することが指摘されました[14]。そこで、レプトン対エネルギー分布の理論解析に、以前は取り入れられていない新しい効果を取り入れる必要が生じてきました。

[1] G.E. Brown and M. Rho, Phys. Rev. Lett. 66, 2720 (1991).

[2] G. Agakishiev et al. [CERES Collaboration], Phys. Rev. Lett. 75, 1272 (1995).

G.Q. Li, C.M. Ko and G.E. Brown, Phys. Rev. Lett. 75, 4007 (1995).

[3] K. Ozawa et al. [E325 Collaboration], Phys. Rev. Lett. 86, 5019 (2001);

M. Naruki et al., Phys. Rev. Lett. 96, 092301 (2006).

[4] M. Harada and K. Yamawaki, Phys. Rev. Lett. 86, 757 (2001).

[5] M. Harada and C. Sasaki, Phys. Lett. B 537, 280 (2002).

M. Harada, Y. Kim and M. Rho, Phys. Rev. D 66, 016003 (2002).

[6] M. Harada and K. Yamawaki, Physics Reports 381, 1 (2003)

[7] M. Harada and C. Sasaki, Nucl. Phys. A 736 300 (2004).

[8] M. Harada and C. Sasaki, Phys. Rev. D 73, 036001 (2006).

[9] S. Damjanovic et al. [NA60 Collaboration], J. Phys. G 31, S903 (2005).

[10] S. Damjanovic et al. [NA60 Collaboration], arXiv:nucl-ex/0510044.

[11] G.E. Brown and M. Rho, arXiv:nucl-th/0509001; arXiv:nucl-th/0509002.

[12] M. Harada and C. Sasaki, Phys. Rev. D 74, 114006 (2006).

[13] H. A. Weldon, Phys. Rev. D 26, 1394 (1982); V. V. Klimov, Sov. J. Nucl. Phys. 33, 934 (1981) など

[14] E.V. Shuryak and I. Zahed, Phys. Rev.

C 70, 021901 (2004), Phys. Rev. D 70, 054507 (2004).

G.E.Brown, C.H.Lee, M.Rho and E.Shuryak, J. Phys. G 30, S1275 (2004). など

2. 研究の目的

私は、高温・高密度 QCD におけるカイラル相転移の性質、低温・低密度領域から相転移に至るまでの領域における π ・ ρ 中間子などの軽いハドロンの質量・崩壊定数等の性質の変化、及び、相転移点近傍の QGP 相におけるクォーク・スペクトルや束縛状態の性質を、QCD との密接な関連の元に解明することを近年の研究目的としています。カイラル相転移の実験的シグナルとして注目されているものの一つにレプトン対のエネルギー分布があり、過去の実験のみならず、現在・将来の実験で様々なデータが得られることが期待されています。本研究においては、カイラル相転移の機構を解明するため、過去の実験結果の理論的説明が完全にはなされていないレプトン対エネルギー分布の理論的解析方法を整備・確立することを目的とします。

3. 研究の方法

隠れた局所対称性模型 (HLS 模型) を基礎とし、 π 、 ρ 中間子以外に軸性ベクトル中間子を含めた有効模型を用いて、有限温度・有限密度でのハドロンの性質の変化やそのレプトン対エネルギー分布への影響を調べる。また、模型の改善を目的とし、ホログラフィック QCD 模型と HLS 模型の関係を調べる。

4. 研究成果

(1) シュウィンガー・ダイソン方程式を用いた、湯川模型におけるフェルミオンスペクトルの解析

有限温度・有限密度 QCD 相転移点近傍で現れると期待されている、スカラー型の揺らぎの効果がクォークスペクトルに及ぼす影響を、スカラー型揺らぎとクォークを含む湯川模型の枠組みにシュウィンガー・ダイソン方程式を用いて解析しました。本解析ではスカラー型揺らぎとクォークのスペクトル関数に対する連立方程式を解く新しい手法を用いて、これまでの解析では含まれていなかった高次効果を取り入れました。そして、これまでの解析で指摘されていたクォークスペクトルに現れる 3 ピーク構造は、高次効果を取り入れた場合にも保たれることを示しました。(成果は、Physical Review D に掲載されました。)

(2) レプトン対エネルギー分布へのベクトル-軸性ベクトル中間子混合効果の解析

相転移点近傍のレプトン対エネルギー分布の実験データから、相転移近傍での ρ 中間子などのベクトル中間子の性質の変化を調べるためには、その他のハドロンの効果も取り入れた解析が重要となります。本研究では、有限温度媒質中での軸性ベクトル中間子の効果を、「隠れた局所対称性」に基づく低エネルギー有効模型を用いて取り入れ、カイラル対称性の回復と共に軸性ベクトル中間子が軽くなる場合とベクトル中間子が軽くなる場合での解析を行いました。どちらの場合にも、低温領域で存在するベクトル中間子と軸性ベクトル中間子の混合効果が、カイラル対称性が回復するにつれて小さくなることを示しました。そして、この混合効果減少がカイラル対称性回復のシグナルとなる可能性を指摘しました。(成果は Physical Review D に掲載されました。)

(3) 重イオン衝突実験でのレプトン対エネルギー分布の解析

我々は、以前の模型計算により、相転移温度近傍で ρ 中間子が軽くなると、 ρ 中間子と光子の結合定数が小さくなる可能性を指摘しました。本研究では、その結果として、重イオン衝突実験で測定されるレプトン対エネルギー分布から相転移温度近傍の ρ 中間子の情報を得るためには、主な寄与を与える低温領域の ρ 中間子の効果を正しく見積もる必要があることを指摘しました。(成果は Progress of Theoretical Physics に掲載されました。)

(4) 有限密度媒質中のレプトン対エネルギー分布へのベクトル-軸性ベクトル中間子混合効果の解析

有限密度媒質中に特有のベクトル-軸性ベクトル中間子混合が、レプトン対エネルギー分布にどのような効果を及ぼすかを、低エネルギー有効模型を用いて解析しました。そして、混合効果がスペクトルにブロードニング効果を与えることを見いだしました。(成果は Physical Review C に掲載されました。)

(5) クォーク凝縮の効果の解析

以前より、有限密度においては、従来のクォーク・反クォーク型凝縮 (2クォーク凝縮) に代わって、2クォーク・2反クォーク型の凝縮 (4クォーク凝縮) が起こることによりカイラル対称性が破れる可能性が指摘されていました。我々は、この場合のクォーク数感受率を、線形シグマ模型を用いて調べました。そして、2クォーク凝縮がゼロになる相転移点でクォーク数感受率が大きくなることを見いだしました。(成果は Physical Review D に掲載されました。)

(6) 有限密度 2 カラー QCD におけるベクトルボゾンの質量の研究

現実世界の QCD はカラー SU(3) 対称性に基づくゲージ理論ですが、カラーの数 3 を 2

に置き換えた2カラーQCDの力学的性質の研究が格子QCDや有効模型を用いて行われています。我々は、南部ゴールドストーン粒子に加えてベクトル型ボソンを含み、「隠れた局所対称性」(HLS)に基づく有効理論を構築し、ベクトル型ボソン質量のバリオン数密度依存性を調べました。そして、質量の急激な変化が、バリオン数の自発的破れによる相転移のシグナルとなることを示しました。(結果はPhys. Rev. Dに掲載済み)

(7) ホログラフィックQCD模型と隠れた局所対称性模型の関係の研究

超弦理論におけるAdS/CFT対応に基づき、無限個の中間子を含むQCDの低エネルギー有効模型であるホログラフィックQCD(hQCD)模型と、 π 中間子・ ρ 中間子のみを含むHLS模型を関係づける手法を提案しました。そして、hQCD模型の予言が、 π 中間子の電磁形状因子、 $\omega\pi$ 遷移形状因子などをよく説明することを示しました。(結果はPhys. Rev. Dに掲載済み)

(8) 著者の一人として、媒質中でのレプトン対生成反応に関する総合報告、“In-medium excitations” (Lecture Notes in Physics)を執筆した。

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11件)

[1] “Quasi-fermion spectrum at finite temperature from coupled Schwinger-Dyson equations for a fermion-boson system”, Masayasu Harada and Y. Nemoto, *Physical Review D* 78, 014004:1-9 (2008) (査読あり)

[2] “Vector-axialvector mixing from a chiral effective field theory at finite temperature”, Masayasu Harada, C. Sasaki and W. Weise, *Physical Review D* 78, 114003:1-10 (2008) (査読あり)

[3] “Enhancement of quark number susceptibility with an alternative pattern of chiral symmetry breaking in dense matter”, Masayasu Harada, C. Sasaki and S. Takemoto, *Physical Review D* 81, 016009:1-11 (2010) (査読あり)

[4] “A novel spectral broadening from vector-axial-vector mixing in dense matter”, Masayasu Harada and C. Sasaki, *Physical Review C* 80, 054912:1-6 (2009) (査読あり)

[5] “Hidden Local Field Theory and Dileptons in Relativistic Heavy Ion Collisions”, G. E. Brown, Masayasu Harada, J. W. Holt, M. Rho and C. Sasaki, *Progress of Theoretical Physics* 121, 1209-1236 (2009) (査読あり)

[6] “Holographic QCD Integrated back to Hidden Local Symmetry”, Masayasu Harada, S. Matuzaki and K. Yamawaki, *Physical Review D* 82, 076010:1-27 (2010) (査読あり)

[7] “Masses of vector bosons in two-color dense QCD based on the hidden local symmetry”, Masayasu Harada, C. Nonaka and T. Yamaoka, *Physical Review D* 81, 096003:1-12 (2010) (査読あり)

[8] “Integrating out Holographic QCD back to Hidden Local Symmetry”, Masayasu Harada, S. Matuzaki and K. Yamawaki, In *Strong coupling gauge theories in LHC era* (World Scientific Publication, Singapore, 2010) (査読なし)

[9] “Effect of vector-axial-vector mixing to dilepton spectrum”, Masayasu Harada and C. Sasaki, In *Strong coupling gauge theories in LHC era* (World Scientific Publication, Singapore, 2010) (査読なし)

[10] “Thermodynamics with Unbroken Center Symmetry in Two-Flavor QCD”, S. Takemoto, Masayasu Harada and C. Sasaki, In *Strong coupling gauge theories in LHC era* (World Scientific Publication, Singapore, 2010) (査読なし)

[11] “Masses of Vector Bosons in Two-Color QCD Based on the Hidden Local Symmetry”, T. Yamaoka, Masayasu Harada and C. Nonaka, In *Strong coupling gauge theories in LHC era* (World Scientific Publication, Singapore, 2010) (査読なし)

[学会発表] (計10件)

[1] 招待講演: “Vector Manifestation at Chiral Phase Transition in the Large Nf QCD”, Masayasu Harada, Phase Structure of Large Nf QCD (May 12 - 13, 2008, Nagoya)

[2] 招待講演: “Effects of vector – axial-vector mixing to dilepton spectrum in hot and/or dense matter”, Masayasu Harada, YITP Molecule workshop “Algebraic aspect of chiral symmetry for the study of excited baryons”, (November 4–5, 2009, YITP, Kyoto, Japan)

[3] 招待講演: “Effects of vector – axial-vector mixing to dilepton spectrum in hot and/or dense matter”, Masayasu Harada, International Workshop: “A hot summer week at Yonsei” (July 27–31, 2009, Yonsei Univ., Seoul, Korea)

[4] “Effects of vector – axial-vector mixing to dilepton spectrum in hot and/or dense matter”, Masayasu Harada, 2009 International Workshop on “Strong Coupling Gauge Theories in LHC Era”

[5] “A novel spectral broadening from vector-axial-vector mixing in dense matter”, 原田正康, 基礎物理学研究所研究会 `熱場の量子論とその応用’

[6] “Revisiting bound state approach to heavy baryons”, 原田正康, 科研費特定領域と新学術領域による研究会 「ストレンジネスから新ハドロンへ」

[7] “ベクトル中間子-軸性ベクトル中間子混合を通して探る有限密度・有限温度中のカイラル対称性”, 原田正康, 新学術領域「多彩なフレーバーで探る新しいハドロン存在形態の包括的研究」キックオフ研究会

[8] “D-Meson Mass Splitting obtained in a model based on the hidden local symmetry”, Masayasu Harada, KEK 理論センター研究会 「HEAVY QUARK PHYSICS IN QCD」

[9] 招待講演: “New approaches to in-medium spectral functions”, Masayasu Harada, International Workshop on “Electromagnetic Probes of Strongly Interacting Matter: Status and Future of Low-Mass Lepton-Pair Spectroscopy” (September 13–17, 2010, ECT*, Trento, Italy)

[10] 招待講演: “Effects of vector – axial-vector mixing to dilepton spectrum in hot and/or dense matter”, Masayasu Harada, Heavy Ion Meeting 2010–12 (December 10–11, 2010, Yonsei Univ., Korea)

〔図書〕 (計2件)

- [1] Lecture Notes in Physics Volume 814 “In-medium excitations”, Ralf Rapp et al. (including M. Harada), (Springer, 2011)
- [2] “Strong coupling gauge theories in LHC era. Proceedings, International Workshop, SCGT 09, Nagoya, Japan, December 8–11, 2009”, edited by H. Fukaya, M. Harada, M. Tanabashi and K. Yamawaki.

〔その他〕

ホームページ等

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: 40311716

