

平成 21 年 4 月 9 日現在

研究種目：基盤研究(C)
研究期間：2006～2008
課題番号：18540280
研究課題名（和文） 5次元重力理論によるハドロン物理の新記述
研究課題名（英文） New description of Hadron physics based on five-dimensional Gravitational Theory
研究代表者
八尋正信 (YAHIRO MASANOBU)
九州大学・大学院理学研究院・教授
研究者番号：40300537

研究成果の概要：

ゲージ理論/重力理論対応という新概念を基に、ハドロンの諸観測量を再現する5次元重力モデルを提案した。また、そのモデルを有限温度系に拡張した。ここで、ゲージ理論/重力理論対応とはゲージ理論と等価な重力理論が存在するという仮説であり、現在、注目を浴びている。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,500,000	0	1,500,000
2007年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	570,000	3,970,000

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：核物理、ハドロン物理、ゲージ理論/重力理論対応

1. 研究開始当初の背景

量子色力学 (QCD) の研究はハドロン物理だけでなく、素粒子物理、宇宙・天体物理、物性物理とも関係した重要な課題である。現在進められている実験 RHIC、GSI、J-PARC、LHC において、QCD 相構造の実験的検証も可能になりつつある。先行実験である RHIC では完全流体的クォーク・グルーオン相の実現を示唆する結果が得られている。このように、

QCD およびその相構造の解明は実験・理論両面から注目されている。

理論的側面からは、ゲージ理論/重力理論対応という新概念が提案され、この概念を用いて、QCD の非摂動性を理解できる可能性が出てきた。

2. 研究の目的

- (1) ゲージ理論/重力理論対応という新概念を基に、ハドロンの諸観測量を再現する高次元重力理論を現象論的につくる。
- (2) ハドロン物理自身の理解を深める。
- (3) ここで解明された内容を関連する分野へ応用する。

3. 研究の方法

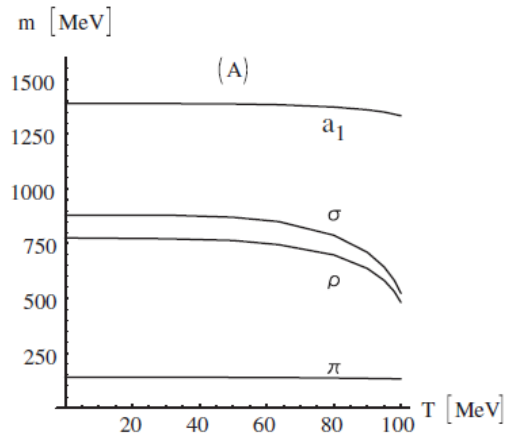
QCDは本質的に非摂動的であり、このことがQCDの理論的解明の大きな障壁となっている。この困難を解決するアイデアとして、本研究ではゲージ理論/重力理論対応に注目する。この対応は、ゲージ理論と等価な重力理論が存在するという仮説であり、実際、 $N=4$ の超対称性ゲージ理論と $AdS_5 \cdot S^5$ (5次元のAnti-de-Sitterと5次元球) 時空をもつ10次元重力理論が等価であることが指摘された。本研究では、QCDと等価な重力理論をハドロンの観測量から現象論的に構築してゆくbottom-up方式をとる。

4. 研究成果

まず、2006年度および2007年度の成果を以下に示す。

- (1) BrodskyグループやKatzグループは軽いハドロンの性質を10%程度の誤差で再現する5次元重力モデルを現象論的に提案した。しかし、このモデルはrunning coupling constant (相互作用の強さが着目して現象のエネルギースケールに依存する) というQCDの基本的性質を保持していない。この点を改良したモデルを提案した。現在、このモデルは注目をされている。
- (2) 有限温度系に対する5次元重力モデルの構築を行った。有限温度QCDに対応する5次元時空として、AdS-Schwarzschild時空を用いるのが自然である。この時空を仮定して、5次元重力モデルを提案した。有限温度系における種々のメソンの質量を数値し、その結果が格子QCD計算やカイラル摂動論の結果の定性的性質を再現することを示した。下図は、各種中間子の質量の温度(T)依存性を示したもので、格子QCD計算の結果を定性的によく説明している。これによって、上記の5次元重力モデルが有効なモデルであることを示した。また、 π 中間子速度

を求めRHICの実験値と比較し、矛盾のない値になっていることを示した。

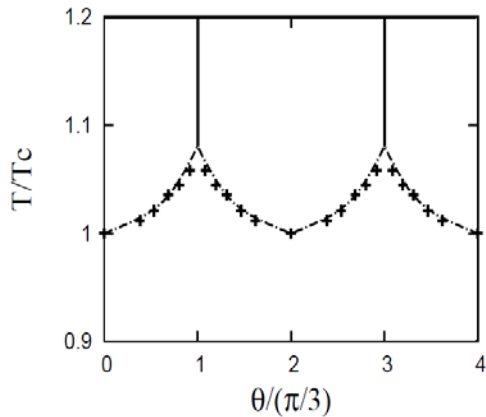


- (3) バリオン数有限密度 (有限化学ポテンシャル: μ) におけるQCDの性質は解明されていない。そのため、5次元重力モデルを構築することも非常に困難である。このため、R-chargeの有限密度系に注目し、それと同等な性質をもつ5次元重力モデルを構成し、バリオン数有限密度系と類似した相構造を有することを示した。

上記の研究から、有限化学ポテンシャル (バリオン数有限密度) ・有限温度における5次元重力モデルを構築するには、有限化学ポテンシャル系におけるQCD自体の性質を解明することが必須であるという結論に至った。そのため、最終年度 (2008年度) は、この点の解明に注力した。以下にその成果をまとめる。

- (4) 符号問題があるため、第一原理計算である格子QCDは有限化学ポテンシャル系には適用できない。このため、QCDの有効理論として知られているNambu-Jona-Lasinio (NJL) モデルに着目し、8点相互作用を付加し、この8点相互作用がカイラル相転移に及ぼす影響を調べた。
- (5) Polykov-loop NJLモデル (PNJL) を用いて、有限化学ポテンシャル系におけるカイラル相転移と閉じ込め相転移との関係を調べた。また、これらのモデル解析で用いられている平均場近似の妥当性の検討を行った。
- (6) 純虚数化学ポテンシャル ($\mu = i\theta T$) 領域では、格子QCDは符号問題を持たない。したがって、格子QCD計算が可能である。下図は相転移線の温度 (T) および密度 (θ) 依存性を示している。PNJL (実線) が格子QCD

計算の結果 (×印) を再現することを示していることが分かる。このことは、PNJLの妥当性を示している。



(7) 上記の純虚数 μ 法は、実数 μ 領域を分析する方法として、これまでに提案されてきた。しかし、純虚数 μ 領域から実 μ 領域への外挿が最大の問題点となっていた。実際、純虚数 μ 領域での相転移線を μ の多項式を仮定して実 μ 領域へ外挿することが試みられてきたが、この方法は $\mu/T > 1$ では正しく予測できないことを、PNJLを用いて示した。PNJLは上記のような外挿の問題はない。

(8) 純虚数 μ 領域では、 $\theta = 2\pi/3$ の周期性がある。Roberge-Weiss (RW) 周期性と言われている。このRW周期性は「拡張された Z_3 対称性」と見なすことができ、PNJLが「拡張された Z_3 対称性」を有することを示した。「 Z_3 変換」とは、カラー空間における $2\pi/3$ の回転である。クォークが存在するQCDでは、「 Z_3 変換」によって θ が $2\pi/3$ 回転してしまう。「拡張された Z_3 変換」とは、「 Z_3 変換」と「 θ の $-2\pi/3$ 回転」の組み合わせであり、QCDとPNJLはこの変換に関して不変である。

(9) 最後に、上記の有効理論の考え方が核物理にどの程度適用できるかを検討し、今後開拓できる研究課題の可能性を模索した。

上記の研究成果は、ハドロン物理に関する研究会と核物理に関する国際会議を主催することによって、素粒子・ハドロン・核物理の各分野に広く公表された。また、ホームページでも公表している。本研究の成果は研究会等で話題になっており、今後の大きな進展が期待できる。

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 9 件)

以下、すべて査読有。

- ① Y. Sakai, K. Kashiwa, H. Kouno, M. Matsuzaki and M. Yahiro, Phys. Rev. **D78** (2008), 076007, Vector-type four-quark interaction and its impact on QCD phase structure.
- ② Y. Sakai, K. Kashiwa, H. Kouno and M. Yahiro, Phys. Rev. **D78** (2008), 036001, Phase diagram in the imaginary chemical potential region and extended $Z(3)$ symmetry.
- ③ K. Kashiwa, H. Kouno, M. Matsuzaki and M. Yahiro, Phys. Lett. **B662** (2008), 26-32: Critical endpoint in the Polyakov-loop extended NJL model.
- ④ Y. Sakai, K. Kashiwa, H. Kouno and M. Yahiro, Phys. Rev. **D77** (2008), 051901, Polyakov loop extended NJL model with imaginary chemical potential.
- ⑤ K. Kashiwa, M. Matsuzaki, H. Kouno and M. Yahiro, Phys. Lett. **B657** (2007), 143-147: Effects of a multi-quark interaction on color superconducting phase transition in an extended NJL model.
- ⑥ K. Kashiwa, H. Kouno, T. Sakaguchi, M. Matsuzaki and M. Yahiro, Phys. Lett. **B647** (2007), 446-451: Chiral phase transition in an extended NJL model with higher-order multi-quark interactions.
- ⑦ K. Ghoroku, A. Nakamura and M. Yahiro, Phys. Lett. **B638** (2006), 382-387: Holographic model at finite temperature with R-charge density.
- ⑧ K. Ghoroku and M. Yahiro, Phys. Rev. **D73** (2006), 125010: Holographic model for mesons at finite temperature.
- ⑨ K. Ghoroku, N. Maru, M. Tachibana and M.

Yahiro, Phys. Lett. **B633** (2006), 602-606: Holographic model for hadrons in deformed AdS5 background.

[学会発表] (計7件)

国内学会発表は多数のため省略し、国際会議、国際ワークショップについて記載する。

- ① M. Hamada, H. Kouno, A. Nakamura, T. Saito, and M. Yahiro, The XXVI International Symposium on Lattice Field Theory, the College of William and Mary, Williamsburg, Virginia, USA, 2008 July 14-19, Quark Propagators in the confinement and deconfinement phases.
- ② K. Kashiwa, H. Kouno, M. Matsuzaki, Y. Sakai and M. Yahiro, Nagoya Mini-Workshop "Chiral Symmetry in hot and/or dense matter", 25 June, 2007, Nagoya University, Effects of higher-order multi-quark interactions in the two-flavor Nambu- Jona-Lasinio model.
- ③ K. Kashiwa, H. Kouno, M. Matsuzaki, M. Yahiro, International Nuclear Physics Conference (INPC2007), Tokyo International Forum, Tokyo, June 3-8, 2007, Effects of higher-order multi-quark interactions in NJL model on the chiral and color-superconducting phase transition.
- ④ M. Hamada, H. Kouno, A. Nakamura, T. Saito and M. Yahiro, International Nuclear Physics Conference (INPC2007), Tokyo International Forum, Tokyo, June 3-8, 2007: The behavior of the quark propagator near the T_c .

⑤ K. Kashiwa, H. Kouno, M. Matsuzaki, T. Sakaguchi, and M. Yahiro, Yukawa International Seminar (YKIS) 2006, Yukawa Institute for Theoretical Physics, 27-28 November 2006: Phase transitions in an extended NJL model with higher-order multi-quark interactions.

⑥ M. Hamada, H. Kouno, A. Nakamura, T. Saito, M. Yahiro, XXIVth International Symposium on Lattice Field Theory, Tucson, Arizona, USA, July 23-28, 2006, Quark propagators at finite temperature with the clover action.

⑦ M. Yahiro, Trento workshop on Hadrons and Strings, European Center for Theoretical Studies in Nuclear Physics and Related Areas, July 17-22, 2006: Flavor quark at high temperature from a holographic Model.

[その他]

ホームページ:

<http://www.nt.phys.kyushu-u.ac.jp/>

研究会主催:

研究会「量子色力学の相構造研究の現状と展望」, 2008年12月25-26日, 九州大学理学部.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

八尋正信 (YAHIRO MASANOBU)
九州大学・大学院理学研究院・教授
研究者番号: 40300537