

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 28 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24740184

研究課題名(和文) 高密度ハドロン物質の新しい相の研究

研究課題名(英文) New phase in high density hadronic matter

研究代表者

日高 義将 (Hidaka, Yoshimasa)

独立行政法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・専任研究員

研究者番号：00425604

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：対称性とその自発的破れは現代物理学の重要な概念のひとつである。一般に、連続対称性が自発的に破れるとそれとともに波数がゼロの極限で振動数がゼロになる南部-Goldstoneモードが現れること(南部-Goldstoneの定理)が知られている。パイ中間子や強磁性体中のスピンなどがそれに当たる。Lorentz不変な真空中での南部-Goldstoneの定理を拡張し、50年来よくわかっていなかったLorentz不変でない状態における自発的対称性の破れと南部-Goldstoneモードの関係を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Symmetry and its spontaneous breaking is one of the important concepts in modern physics. In general, it is known that when a continuous symmetry is spontaneously broken, there appears the gapless excitation modes called the Nambu-Goldstone mode (Nambu-Goldstone of the theorem). The pions and spin waves in the ferromagnets are examples of NG modes. The original theorem was formulated in the relativistic systems. We generalize the Nambu-Goldstone theorem in the Lorentz invariant systems to that in the nonrelativistic systems, and we clarify the relationship of spontaneous symmetry breaking and Nambu-Goldstone mode that was not well understood for a long time.

研究分野：ハドロン物理学

キーワード：自発的対称性の破れ

1. 研究開始当初の背景

強い相互作用をするハドロンの有限温度有限密度系における相構造を明らかにする事はハドロンの物理の大きな課題のひとつである。ゼロ温度ゼロ密度の真空では、基本的な自由度であるクォークやグルーオンは閉じ込められ、複合状態として陽子や中性子等を形成している。またカイラル対称性と呼ばれる軽いクォークが持つ(近似的な)対称性も自発的に破れ、その結果、陽子や中性子は大きな質量を持っている。これらが有限温度、有限密度中でどのように変化するか明らかにする事は宇宙極初期の状態や、超高密度天体である中性子星の内部の状態を理解する上で重要である。

この有限温度、有限密度中でハドロンの性質がどう変化するかを明らかにする研究は1970年代から盛んに行われてきた。初期の研究では、ハドロンの閉じ込め非閉じ込め相転移を考慮した単純な相図が提唱された(図1上)。その後、カイラル対称性の回復やクォーク対が凝縮を起こすカラー超伝導相の可能性が議論され、より豊富な相構造が存在することが明らかになってきた(図1中)。

高密度側の解析は主に非閉じ込めを仮定したものが主であったが、近年、別の視点から新しい相の可能性が McLerran と Pisarski によって指摘された。これは強い相互作用を記述する基礎理論である量子色力学(QCD)のカラーの自由度(N_c)が大きい(Large- N_c)という理想化された状況での議論によって提唱された: **Quarkyonic** 相と呼ばれる非常に高密度な閉じ込め相である。その後、この相は彼等と私によってカラーとフレーバの自由度が同程度に大きい場合に拡張された。これらの研究から予想される QCD の相図を図1下に示す。他の相図と大きく違う点は低温高密度領域に **Quarkyonic** 相が存在する点であり、その相と QGP 相は閉じ込め非閉じ込め相転移で隔てられている。カラー超伝導相はより高密度側に存在すると考えられる。

その後、クォークの閉じ込めと共に重要な性質であるカイラル対称性の自発的破れが **Quarkyonic** 相で起きるかどうかが議論された。我々の解析によって、真空のように一様にカイラル対称性が破れるのではなく、秩序変数が振動する非一様な破れが現れる可能性がある事が明らかになった。また、非一様なカイラル凝縮の存在の可能性は別のアプローチでも指摘されている。

2. 研究の目的

高密度ハドロンの物質はこれまで考えられてきたものよりもより豊富な相構造を持っている事が明らかになってきた。特に **Quarkyonic** 相ではその閉じ込め力による強結合性から、これまでの弱結合理論に基づいたクォーク物質とは質的に異なる性質を持つ事が期待される。しかしこの高密度強結合系の性質はまだ明らかになっていないのが現状であり、本研究では、その性質を明

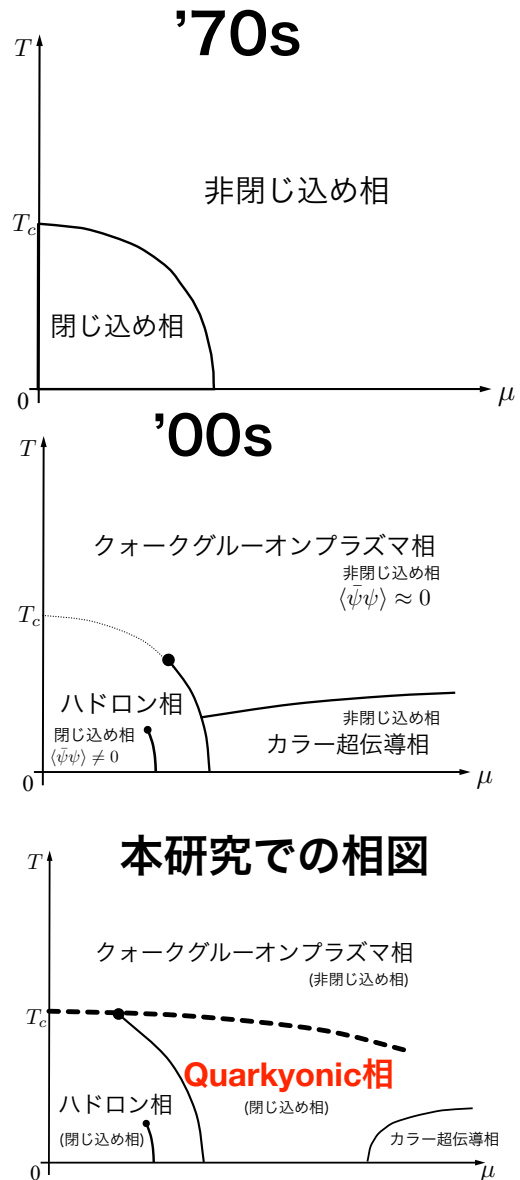


図 1: QCD 相図の年代別変化, 縦軸が温度, 横軸がバリオン化学ポテンシャルである。

らかにするのが目的である。

3. 研究の方法

Quarkyonic 相の広義は高密度閉じ込め相である。これは例えば物性で言えば金属が存在するといっているに過ぎない。様々な金属が存在するように、**Quarkyonic** 相にも多様性がある事が予想される。しかしこの相は強結合系であるため、単純な摂動論は使えない。本研究では、対称性とその破れに基づいた議論を行なう。特にソフトな励起モードの特定は、系の性質を特徴付ける上で必要不可欠である。このソフトな励起モードは特に低温の振る舞いを決定する上で重要となる。

最近の研究では高密度領域でカイラル対称性が非一様に破れる可能性が指摘されている。そのような非一様相ではカイラル対称性、並進対称性、回転対称性の破れに伴った

南部-Goldstone モードが現れる事が予期される。本研究では時空対称性の破れを含む一般論を構築し、その理論を非一様相に適用する。

4. 研究成果

(1) **ローレンツ対称性が明白でない系での南部ゴールドストンの定理の一般論**: 南部ゴールドストンの定理は自発的に連続対称性が破れるとそれに伴いゼロモード(南部ゴールドストーンモード)が現れる事を示している。この定理はローレンツ対称性があるゼロ温度ゼロ密度の真空において定式化された。その場合、対称性の破れの数と南部ゴールドストーンモードの数は一致する。しかし、有限温度有限密度系などのローレンツ対称性が明白でない系の場合には対称性の破れの数と南部ゴールドストーンモードの数や分散の関係は様々な研究があるにもかかわらず最初の定理が出て以来 50 年以上正確にはわかっていなかった。本研究では、この問題を時空対称性が破れていない場合に適用し、対称性の破れの数と南部ゴールドストーンモードの数の対応関係を正確に表す公式を導いた。さらに、有限温度系に拡張し、拡散係数の振る舞いや流体モードとの結合を議論した。

(2) **強磁場中でのハドロン物質の振る舞い**: 回転する中性子星では強い磁場が存在する事が知られている。強い磁場が存在する場合のハドロンの質量変化は高密度 QCD 物質の性質を知る上で重要である。特に強磁場中で凝縮を起し、自発的対称性の破れを起す可能性が様々な QCD の有効模型を用いて指摘されているベクトル中間子に着目して研究を行なった。この研究では、ゼロ密度の QCD においてこの凝縮が起こりえるか解析的及び数値的に調べた。解析的な計算ではクォークの質量が有限の場合にはゼロ温度ゼロ密度、ゼロ磁場の QCD では、対称性は破れないという Vafa-Witten 定理を磁場中の QCD に適用しゼロ密度 QCD ではベクトル中間子は磁場中で起こり得ないことを示した。また格子 QCD を用いて数値的に確かめた。

(3) **時空対称性の破れの有効理論**: 上の研究で、ローレンツ対称性が明白でない系での内部対称性の自発的破れに伴う有効理論を構築したがそれを時空対称性の破れに拡張し、有効理論を構築した。特にゼロモードではないが比較的軽い自由度について議論した (Yoshimasa Hidaka, Toshifumi Noumi, Gary Shiu, arXiv:1412.5601[hep-th])。

(4) **カイラル非一様相における低エネルギー励起と相の安定性**: 高密度ハドロン物質では、(Quarkyonic)カイラル非一様相、カラー超伝導中の Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov 相など様々な非一様相の存在が理論的に予想され

ている。(3)で得られた知見を用いて非一様相における低エネルギー励起について議論した。具体的には、非一様相の端点に当たるリフシツ点の周りでギンツブルグ-ランダウ展開を行ない、非一様相(具体的には real kink crystal 相)に現れる低エネルギー励起(南部ゴールドストーンモードであるフォノンとパイオン)の解析を行った。この相では、液晶のスメクティック A 相の様に、フォノンのゆらぎが秩序パラメータを破壊し、2点関数に準長距離相関が現れることがわかった (Yoshimasa Hidaka, Kazuhiko Kamikado, Takuya Kanazawa, Toshifumi Noumi, arXiv:1505.00848[hep-ph])。

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 15 件)

- ① “Dispersion relations of Nambu-Goldstone modes at finite temperature and density,” Tomoya Hayata, and Yoshimasa Hidaka, Phys. Rev. D 91, 056006 (2015) (査読あり)
DOI:10.1103/PhysRevD.91.056006
- ② “Broken spacetime symmetries and elastic variables,” Tomoya Hayata and Yoshimasa Hidaka, Phys. Lett. B735, 195 (2014) (査読あり)
DOI: 10.1016/j.physletb.2014.06.039
- ③ “Magnetic Catalysis vs Magnetic Inhibition,” Kenji Fukushima and Yoshimasa Hidaka, Phys. Rev. Lett 110, 031601 (2013) (査読あり)
DOI:10.1103/PhysRevLett.110.031601
- ④ “Charged vector mesons in a strong magnetic field,” Yoshimasa Hidaka and Arata Yamamoto, Phys. Rev. D 87, 094502 (2013) (査読あり)
DOI:10.1103/PhysRevD.87.094502
- ⑤ “Counting rule for Nambu-Goldstone modes in nonrelativistic systems” Yoshimasa Hidaka, Phys. Rev. Lett. 110, 091601 (2013) (査読あり)
DOI:10.1103/PhysRevLett.110.091601

[学会発表] (計 17 件)

- ① “相対論的流体の有効ラグランジアンと自発的対称性の破れ,” 日高義将, 早田智也, 本郷優, 南佑樹, 野海俊文, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 21 日 - 3 月 24 日, 早稲田大学, 東京, 日本.
- ② “自発的対称性と南部ゴールドストーンモード,” 日高義将, 理研研究会『これからの弦理論 ~ 橋本研 closing 研究会 ~』, 2015 年 2 月 21 日 - 22 日, 大河内ホール, 理研, 和光, 日本.
- ③ “Relativistic hydrodynamic equations and effective Lagrangian from quantum field theory,” Yoshimasa Hidaka, Tomoya Hayata, Masaru Hongo, Yuki

- Minami, Toshifumi Noumi, 4th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, Oct. 7 - 11, 2014, Waikoloa, Hawaii, USA.
- ④ “Spontaneous symmetry breaking and Nambu-Goldstone modes in QCD matter,” Yoshimasa Hidaka, XIth Quark Confinement and the Hadron Spectrum, Sept. 8 - 12, 2014, Saint Petersburg, Russia.
- ⑤ “自発的対称性の破れと南部-Goldstone モード,” 理研シンポジウム・iTHES 研究会「熱場の量子論とその応用」, 2014年9月3日-5日, 理化学研究所, 埼玉, 日本.
- ⑥ “Dispersion relation of Nambu-Goldstone modes at finite temperature and density,” Yoshimasa Hidaka, The international workshop “Higgs Modes in Condensed Matter and Quantum Gases,” June 23 - 25, 2014 at the Yukawa Institute of Theoretical Physics (YITP), Kyoto University, Japan.
- ⑦ “有限温度における南部ゴールドストンの定理と分散関係,” 日高義将, 日本物理学会第69回年次大会, 2014年3月26-29日, 東海大学 湘南キャンパス, 神奈川.
- ⑧ “自発的対称性の破れと南部-Goldstone モード: 最近の発展と話題,” 日高義将, 統計物理学懇談会, 2014年3月10日-11日, 学習院大学, 東京 (招待講演).
- ⑨ “Generalization of Nambu-Goldstone theorem to nonrelativistic systems,” Yoshimasa Hidaka, Frontiers of Hadronic Physics: Brains Recirculate Two, Mar. 12 2014, Brookhaven National Laboratory, USA.
- ⑩ “Broken spacetime symmetries, elastic variables, and Nambu-Goldstone modes,” Yoshimasa Hidaka, Effective Field Theory for Quantum Many Body Systems, Jan. 15 - 17 2014, Instituto de Física Teórica UAM/CSIC, Madrid, Spain.
- ⑪ “Vector mesons in a strong magnetic field,” Yoshimasa Hidaka, New Frontiers in QCD 2013, November 18 - December 20, 2013, YITP, Kyoto university, Kyoto.
- ⑫ “非一様相における南部ゴールドストンの定理,” 日高義将, 早田智也, 広野雄二 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月 20 - 23 日, 高知大学, 高知.
- ⑬ “時空対称性を含む南部・ゴールドストンの定理の一般化,” 日高義将, 基研研究会「熱場の量子論とその応用」, 2013 年 8 月 26 日 - 8 月 28 日, 京都大学 基礎物理学研究所, 京都, 日本.
- ⑭ “強磁場中でのベクトル中間子,” 日高義将, 山本新, 日本物理学会第68回年次大会, 2013年3月26-29日, 広島大学東広島キャンパス, 広島.
- ⑮ “南部・ゴールドストンの定理の非相対論的な系への一般化,” 日高義将, 日本物理学会第68回年次大会, 2013年3月26-29日, 広島大学東広島キャンパス, 広島.
- ⑯ “Symmetry breaking of QCD in a strong magnetic field,” Yoshimasa Hidaka, Frontiers of Hadronic Physics, Mar. 21 2013, Brookhaven National Laboratory, USA.
- ⑰ “Lorentz 対称性がない場合の南部-Goldstone の定理”, 日高義将, 森肇先生記念研究集会, 2012年11月23日, 九州大学応用力学研究所, 福岡.
- [その他]
ホームページ等
http://www.riken.jp/pr/press/2013/20130220_1/

6. 研究組織

(1) 研究代表者

日高 義将 (HIDAKA, Yoshimasa)

独立行政法人理化学研究所 仁科加速器研究センター 専任研究員

研究者番号: 00425604