

令和 2 年 6 月 7 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05345

研究課題名（和文）パリティ2重項模型を用いた高密度核物質の探求

研究課題名（英文）Research on high density matter using parity doublet models

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

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：核子とそのパリティパートナーをパリティ2重項構造に基づいて含む有効模型を構成し、質量と崩壊幅に関する実験結果と比較することにより、有効模型のパラメータに制限をつけた。そして、この有効模型を用いて得られた状態方程式に対する中性子星の観測による制限を用いて、カイラル不変質量が核子質量全体の半分以上を占めていることを示した。また、ヘビークォークを含むハドロンをカイラル対称性とヘビークォーク対称性に基づいて記述する有効模型を構成した。既存のハドロンに対しては、核物質中での質量変化を示した。また未発見の粒子に対しては、その質量や崩壊幅に対する予言を与えた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

陽子・中性子等のハドロンの質量起源の解明は、ハドロン物理学における重要課題である。ハドロン質量生成機構の候補には、カイラル対称性の自発的破れによる質量とカイラル不変質量があるが、そのどちらかが主成分となるのか、また、これら以外の機構が存在するのかわかっていない。本研究の成果により、原子核実験や中性子星の観測から得られる核物質の状態方程式への制限から、このカイラル不変質量への制限が得られる可能性があることが示された。また、ヘビークォークを含むハドロンの分類や解析において、カイラル対称性やヘビークォーク対称性での多重項構造が協力であることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：I constructed an effective model including the nucleon and its parity partner based on the parity doublet structure, and obtained constraints to the model parameters from experimental data for the masses and decay widths of them. Then, I showed that the chiral invariant mass is more than half of the mass of nucleon by using the constraint to the equation of state obtained in the effective model from the observation of neutron stars. Furthermore, I constructed effective models of hadrons including heavy quarks based on the chiral symmetry and the heavy-quark symmetry. I gave predictions on the modification of masses for existing hadrons in medium, and masses and decay widths for undiscovered hadrons.

研究分野：理論ハドロン物理学

キーワード：パリティ2重項模型 核物質 中性子星 スカラー中間子 D中間子 チャームバリオン ペンタクォーク
ク ダイクォーク

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

我々の質量の大部分を担う核子(陽子・中性子)の質量の95%以上は、クォークを含む基本理論「量子色力学」(QCD)により生成されている。この質量の生成機構では、カイラル対称性の自発的破れが重要な役割を担っていると考えられている。高密度状態ではカイラル対称性の部分的回復が期待されているため、高密度核物質の研究は我々の質量の起源解明へとつながる。高密度状態を実験で再現すべく、韓国ではRISP実験が計画されている。RISP実験では、通常の原子核密度の2倍程度の超高密度状態を生成するとともに、陽子・中性子の数が異なる非対称核物質も生成することが計画されており、高密度非対称核物質の理論的研究も重要となっている。高密度非対称核物質の探求はまた、中性子星の構造解明に対して重要である。特に、2010年と13年に、これまでに発見されていた中性子星に比較して非常に重く、太陽質量の2倍もの質量を持つ中性子星が発見された。この発見により、内部の状態方程式を記述すべく構築された多くのモデルが排除され、新たなモデルを構築することが急務となっていた。

格子QCDを用いた解析[4]で、通常の正パリティ核子の質量の温度変化は小さく、カイラル対称性が回復する温度では、質量の重い負パリティ核子の質量が軽くなり、パリティの異なる2種類の核子の質量がほぼ縮退することが示されている。また、我々の論文[5]等でのスキルムクリスタルモデルを用いた解析により、高密度領域で局所的にはカイラル対称性が破れているが大域的には破れていない新しい相(ハーフ・スキルミオン相, HS相)が存在し、通常相では密度と共に減少する核子質量がHS相では真空の半分程度の値で一定となることが示された。これらの結果は、カイラル対称性の破れによらないカイラル不変質量が無視できない割合で存在する可能性を示唆している。そこで、通常の核子と負パリティの $N^*(1535)$ をカイラルパートナーと見なしてカイラル不変質量を導入されるパリティ2重項構造[6][7]に基づくモデルを用いて、高密度核物質の相構造やハドロンの性質変化を解析することが重要となることが期待される。実際、我々の論文[1]では、パリティ2重項構造を持つハドロ有効モデルを用いた解析が行われ、カイラル不変質量が核子質量の半分以上存在する場合には、標準原子核密度での核物質の性質が再現されること、及び、RISP実験・中性子星に重要となる非対称核物質中では、気液相転移の消失などの相構造の変化が起こることが示された。

論文[7]等でのパリティ2重項モデルを用いた解析では、 $N^*(1535)$ の崩壊幅等から核子のカイラル不変質量が半分より小さいことが示されている。一方、我々の論文[2]での3フレーバーでのパリティ2重項構造に基づくモデルを用いた解析によると、核子のカイラル不変質量が核子質量の半分以上存在し、また、核子のカイラルパートナーは $N^*(1535)$ と $N^*(1650)$ の混合状態である可能性がある。そこで、パリティ2重項構造に基づくモデルを真空状態から標準原子核密度領域での現象を再現するように整備し、そのモデルを用いて高密度核物質の性質を解明する研究は、RISP実験・中性子星にとって重要となることが期待される。

- [1] Y. Motohiro, Y. Kim, M. Harada, *Physical Review C* 92, 025201:1-8 (2015).
- [2] D.Suenaga, B.-R.He, Y.-L.Ma, M.Harada, *Phys. Rev. C* 89, 068201 (2014); *Phys. Rev. D* 91, 036001 (2015).
- [3] D. Suenaga, M. Harada, arXiv:1509.08578 [hep-ph]
- [4] L.Y. Glozman, et al., *Phys. Rev. D* 86, 014507 (2012); G.Aarts, et al., *Phys. Rev. D* 92, 014503 (2015). 等
- [5] Y.-L.Ma, M.Harada, et al., *Phys. Rev. D* 88, 014016 (2013), *Phys. Rev. D* 90, 034015 (2014).
- [6] C.E. Detar and T. Kunihiro, *Phys. Rev. D* 39, 2805 (1989).
- [7] D. Jido, M. Oka, and A. Hosaka, *Prog. Theor. Phys.* 106, 873 (2001).

2. 研究の目的

本研究では、パリティ2重項構造に基づくハドロ有効モデルを構築し、高密度の対称核物質と非対称核物質の相構造と状態方程式、及び、高密度核物質中でのハドロ質量・分散関係等の性質を解明することを研究目的とする。また、高密度核物質中でのチャームクォーク・ボトムクォークを含むハドロンの質量や分散関係などを明らかにする。

3. 研究の方法

論文[1]の有効模型を整備し、高密度対称核物質・非対称核物質の相構造を調べる。また、論文[2][3]を拡張し、チャーム・ボトムクォークを含むハドロンをパリティ 2 重項構造に基づいて含む模型を用いて、重いハドロンのスペクトル構造を調べる。さらに、カイラル対称性等の対称性に基づく有効模型の整備を進める。

4. 研究成果

(1) 2 フレーバーパリティ 2 重項模型を用いた解析:

(1-1) 上記の文献[1]の模型にデルタ粒子も含めた模型を構成し、高密度状態でのデルタ物質の存在可能性を示した。そして、デルタバリオンの出現は、核物質中のカイラル対称性の部分的回復を加速するが、カイラル対称相への相転移密度を上昇させることを示した。 [Phys.Rev. C97 (2018), 065202] (1-2) 文献[1]の模型を用いた解析により、高密度核物質中にこれまでにない新しい型の非一様カイラル凝縮相が存在する可能性を見いだした。 [Phys.Rev. D97 (2018), 094032] (1-3) 文献[1]の模型を拡張し、基底状態の核子に加え、3 個の励起状態を含む有効模型を構成した。そして、質量と崩壊幅に関する実験結果と比較することにより、カイラル不変質量に制限をつけた。 [Phys.Rev. D99 (2019), 034012] (1-4) さらに、重力波観測による中性子星物質の状態方程式への制限と比較することにより、カイラル不変質量が核子質量全体の半分以上を占めていることを示した。 [Phys. Rev. C 100, no. 2, 025205 (2019)]

(2) 3 フレーバーパリティ 2 重項構造を持つ模型の構成に向けたスカラー・擬スカラー中間子に対する有効模型の構築: アップ・ダウン・ストレンジクォークを含むスカラー中間子と擬スカラー中間子に対する有効模型を SU(3)カイラル対称性に基づいて構成した。そして、U(1)軸性対称性に対するアノマリー効果を含めることにより、スカラー中間子の逆質量階層性問題が解決されることを示した。(研究期間終了直後に[Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 053D02 (2020)]に掲載された)

(3) 核物質中でのチャームクォークを含むハドロンの性質変化の解析:

(3-1) D 中間子とスカラー D 中間子をカイラルパートナーとして含む有効模型を用い、平均場近似での質量の密度依存性を解析した。パートナー間の質量差等のカイラル対称性回復に伴う変化を明らかにした。 [Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2017, 113D01 (2017)] (3-2) スカラー D 中間子スペクトル関数を解析し、カイラル対称性の回復に伴うスペクトル関数の変化を明らかにした。 [Phys. Rev. C 96, no. 1, 015204 (2017)]

(4) ヘビークォークを含むバリオンに対するカイラル 2 重項構造に基づく有効模型を用いた解析:

(4-1) ヘビークォークを 1 つ含むバリオンの有効模型を、ヘビークォーク対称性とカイラル対称性に基づくパリティ 2 重項構造を用いて構成した。そして、現在の実験結果をよく再現することを示した。さらに、実験では未測定 of 崩壊幅を予言した。 [Phys.Rev. D97 (2018), 114024] (4-2) この模型を 3 フレーバーに拡張した解析を実施した。そして、実験で観測されている粒子の情報から模型のパラメータを決定し、未発見の粒子の質量・崩壊幅に対する予言を行った。 [Phys. Rev. D 99, no. 9, 094016 (2019)]

(5) カイラル 2 重項構造に基づくダイクォーク模型の構成:

ヘビークォークを 1 個含むバリオンのカイラル 2 重項構造の解析への応用を目的とし、軽いクォーク 2 個から構成されるダイクォークに対する有効模型を、カイラルパートナー構造に基づいて構成した。そして、負パリティ状態では、ストレンジクォークを含むダイクォークが、アップ・ダウンクォークのみから構成されるダイクォークよりも軽くなる可能性を指摘した。 [Phys. Rev. D 101, no.5, 054038 (2020)]

(6) ペンタクォークに対する解析:

(6-1)2015 年に LHCb から報告されたペンタクォークを、ヘビークォークを含むバリオンと反ヘビークォークを含むメソンの束縛状態として記述する模型を用いて解析した。そして、結合チャネル効果を含めることが重要であることを示した。[Physical Review D 93, 114003:1-8 (2016)]

(6-2)また、同様な束縛状態としてチャームクォークを 2 個含むバリオンが存在することを示した。[Physical Review D, 96, 094012 (2017)]

(6-3)ヘビークォークを含むバリオンと反ヘビークォークを含むメソンの束縛状態として記述されるペンタクォークのパリティ 2 重項構造を明らかにすることを目的とし、その前段階として、ヘビークォーク対称性に基づいて分類した。そして、実験で観測されているペンタクォークの、ヘビークォーク対称性の下でのパートナーの存在を予言した。[Phys.Rev. D98 (2018), 014021]

(6-4) また、その解析を拡張し、ヘビーマesonとヘビーバリオンの P 波束縛状態として構成されるペンタクォークの分類を行った。[PTEP 2019, no. 12, 123D01 (2019)]

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yamazaki Takahiro, Harada Masayasu	4. 巻 99
2. 論文標題 Chiral partner structure of light nucleons in an extended parity doublet model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 034012:1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.99.034012	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 Shimizu Yuki, Yamaguchi Yasuhiro, Harada Masayasu	4. 巻 98
2. 論文標題 Heavy quark spin multiplet structure of $P^{(*)} Q^{(*)}$ molecular states	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 014021:1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.98.014021	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 Kawakami Yohei, Harada Masayasu	4. 巻 97
2. 論文標題 Analysis of $c(2595)$, $c(2625)$, $b(5912)$, $b(5920)$ based on a chiral partner structure	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 114024:1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.114024	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 Takeda Yusuke, Abuki Hiroaki, Harada Masayasu	4. 巻 97
2. 論文標題 Novel dual chiral density wave in nuclear matter based on a parity doublet structure	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 094032:1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.094032	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 Takeda Yusuke, Kim Youngman, Harada Masayasu	4. 巻 97
2. 論文標題 Catalysis of partial chiral symmetry restoration by matter	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 065202:1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.97.065202	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 該当する

1. 著者名 Ma Yong-Liang, Harada Masayasu	4. 巻 45
2. 論文標題 Chiral partner structure of doubly heavy baryons with heavy quark spin-flavor symmetry	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics	6. 最初と最後の頁 075006 ~ 075006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6471/aac86e	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 該当する

1. 著者名 Mamiya Kawaguchi, Shinya Matsuzaki, Masayasu Harada, Ruiwen Ouyang	4. 巻 95
2. 論文標題 Charged pions tagged with polarized photons probing strong CP violation in a chiral-imbalance medium	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 065204-065209
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.95.065204	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 Yuki Shimizu, Masayasu Harada	4. 巻 96
2. 論文標題 Hidden Charm Pentaquark Pc(4380) and Doubly Charmed Baryon Xi_cc(4380) as Hadronic Molecule States	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 94012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.094012	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 Daiki Suenaga, Shigehiro Yasui, and Masayasu Harada	4. 巻 96
2. 論文標題 Spectral functions for D-bar and D0*-bar mesons in nuclear matter with partial restoration of chiral symmetry	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 15204
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.96.015204	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 Harada Masayasu, Ma Yong-Liang, Suenaga Daiki, Takeda Yusuke	4. 巻 2017
2. 論文標題 Relation between the mass modification of heavy-light mesons and the chiral symmetry structure in dense matter	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 113D01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptx140	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 該当する

1. 著者名 Y. Shimizu, D. Suenaga, M. Harada	4. 巻 93
2. 論文標題 Coupled channel analysis of molecule picture of Pc (4380)	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 114003:1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.1103/PhysRevD.93.114003	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 -

〔学会発表〕 計20件 (うち招待講演 11件 / うち国際学会 15件)

1. 発表者名 Masayasu Harada
2. 発表標題 Study of dense nuclear matter based on the parity doublet structure of nucleons
3. 学会等名 Workshop on "Development of simulation by GPU for the study of quark-hadron matter at high temperatures and densities" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masayasu Harada and Takahiro Yamazaki
2. 発表標題 Charmed mesons in nuclear matter based chiral effective models
3. 学会等名 8th International Conference on Quarks and Nuclear Physics (QNP2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masayasu Harada
2. 発表標題 Charmed hadrons in Dense matter based on chiral models
3. 学会等名 Hadron structure and interaction in dense matter (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masayasu Harada
2. 発表標題 Light nucleons in an extended parity doublet model
3. 学会等名 Workshop on Dense Matter from Chiral Effective Theories 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masayasu Harada
2. 発表標題 Study of phase structure of nuclear matter based on a parity doublet model
3. 学会等名 8th International Symposium on Nuclear Symmetry Energy (NuSYM18) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 原田正康
2. 発表標題 Charmed mesons in medium based on chiral effective models
3. 学会等名 第11回「ストレンジネス核物理を考える会」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 原田正康
2. 発表標題 Delta matter in a parity doublet model
3. 学会等名 京都ミーティング2017夏(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masayasu Harada
2. 発表標題 Delta matter in a parity doublet model
3. 学会等名 Workshop on Dense Matter from Chiral Effective Theory (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 原田正康
2. 発表標題 核物質におけるカイラル対称性の部分的回復とハドロンの質量変化
3. 学会等名 ハドロンの原子核物理の理論研究最前線 2017 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masayasu Harada
2. 発表標題 Doubly heavy baryons based on chiral effective Lagrangians
3. 学会等名 Reimei Workshop "Hadronic Resonances and Dense Nuclear Matter" and "J-PARC-HI Collaboration Meeting" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masayasu Harada
2. 発表標題 Analysis of $\Lambda_c(2595)$, $\Lambda_c(2625)$, $\Lambda_b(5912)$, $\Lambda_b(5920)$ based on a chiral partner structure
3. 学会等名 ヘビークォークハドロンとエキゾチックハドロンの構造 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 原田正康
2. 発表標題 Analysis of $\Lambda_c(2595)$, $\Lambda_c(2625)$, $\Lambda_b(5912)$, $\Lambda_b(5920)$ based on a chiral partner structure
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masayasu Harada
2. 発表標題 Effect of partial chiral symmetry restoration in nuclear matter to charmed meson masses based on a chiral partner structure
3. 学会等名 Quarks and Compact Stars 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masayasu Harada
2. 発表標題 Charmed meson masses in medium based on effective chiral models
3. 学会等名 KEK theory center workshop on Hadron and Nuclear Physics in 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masayasu Harada
2. 発表標題 Mass modification of Delta baryon in nuclear matter based on a parity doublet model
3. 学会等名 APCTP 2016 Workshop on Frontiers of Physics: Dense Matter from Chiral Effective Theories (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Masayasu Harada
2. 発表標題 Medium modification of charmed meson masses based on an effective chiral model
3. 学会等名 2016 JAEA/ASRC Reimei Workshop: New exotic hadron matter at J-PARC (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Masayasu Harada
2. 発表標題 Mass modification of hadrons associated with partial chiral symmetry restoration
3. 学会等名 The 34th Reimei Workshop "Physics of Heavy-Ion Collisions at J-PARC" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Masayasu Harada
2. 発表標題 Medium modification of charmed meson masses through one-boson exchange
3. 学会等名 Mesons in Nucleus 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Masayasu Haraeda
2. 発表標題 Effects of the chiral invariant mass of nucleon in nuclear matter
3. 学会等名 J-PARC Workshop 2016: From Exotic hadrons to QGP (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 原田正康、Yong-Liang Ma, 末永大輝、武田悠佑
2. 発表標題 Effect of omega meson on the heavy-light mesons with chiral partner structure in dense medium
3. 学会等名 日本物理学会第72回年次大会
4. 発表年 2017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
---------	---------------------------	-----------------------	----