

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K03927

研究課題名（和文）カイラル有効模型を用いた中性子星解析とハドロン質量起源の解明

研究課題名（英文）Study of Neutron Stars and Elucidation of origin of hadron masses using chiral effective models

研究代表者

原田 正康（Harada, Masayasu）

名古屋大学・素粒子宇宙起源研究所・教授

研究者番号：40311716

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究計画以前に構築したパリティ2重項模型(PDM)による低密度領域の状態方程式とNJL型クォーク模型による高密度領域の状態方程式の内挿手法を用い、PDM-NJLクロスオーバー模型を構成しました。そして、中性子星観測から得られる内部の状態方程式への制限等を用いて、カイラル不変質量に制限をつける手法を確立しました。また、PDM-NJLクロスオーバー模型における内挿領域で、クォーク凝縮等の密度依存性を求める手法を構築しました。さらに、ストレンジクォークを含む中間子や $a_0(980)$ 中間子による補正を調べ、それらの効果は、カイラル不変質量への制限を大きくは修正しないことを明らかにしました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

低密度領域ではハドロン自由度、高密度領域ではクォーク自由度で記述され、両方の領域でカイラル対称性を尊重する統一模型を構築しました。そして、マクロな量である中性子星の質量・半径関係式から、ミクロな量である核子の質量におけるカイラル不変質量に制限をつける手法を確立しました。これにより、我々の質量の起源への手がかりが得られることが期待できます。

研究成果の概要（英文）：We constructed a PDM-NJL crossover model by using an interpolation method between the equation of state (EOS) in the low-density region based on the parity doublet model (PDM) constructed before this research project and the EOS in the high-density region based on the NJL-type quark model. We then established a method to restrict the chiral invariant mass using restrictions on the internal EOS obtained from neutron star observations. We also constructed a method to obtain the density dependence of quark condensation, etc. in the interpolation region in the PDM-NJL crossover model. Furthermore, we investigated corrections due to mesons including strange quarks and the $a_0(980)$ meson, and found that their effects do not significantly modify the constraints on the chiral invariant mass.

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 カイラル対称性 核物質 中性子星 状態方程式 ヘビーハドロン

1. 研究開始当初の背景

原子核を構成する陽子・中性子(核子と総称)等のハドロンは、強い相互作用の基礎理論、量子色力学(QCD)で記述されるクォーク・グルーオンで構成されています。核子質量の 95%以上は QCD の力学で生成されており、その**質量生成機構の解明は、ハドロン物理学における重要課題**です。

ハドロン質量起源の候補の一つは、右巻きと左巻きのクォークを独立に変換させる**カイラル対称性の自発的破れ**を引き起こすクォーク凝縮です。もう一つの候補は、主にグルーオン凝縮により生成される**カイラル不変質量**です。そのどちらかが主成分となるのか、また、これらが核子質量に占める割合、さらに、これら以外の起源の有無は分かっていません。

質量起源解明への手がかりを得るためには、カイラル対称性に基づいた有効模型(**カイラル有効模型**)を用いることが有用です。そして、**高密度状態では、カイラル対称性の部分的回復に伴ってカイラル対称性の自発的破れによる質量が減少するのに対し、カイラル不変質量は真空状態とほぼ同じであるため、カイラル有効模型を用いた高密度物質の解析から、質量の起源に対する手がかりが得られることが期待**されます。

本研究では、核子質量にカイラル不変質量とカイラル対称性の自発的破れによる質量を含む、文献[A]で提案された**パリティ 2 重項模型**を用います。文献[B,C]の真空での解析では、カイラル不変質量が核子の半分程度以下という結果が得られる一方、文献[D]の核物質の解析では、標準原子核密度領域での核物質の圧縮しにくさを表す非圧縮率を再現するためには、**カイラル不変質量が核子の質量と同程度であることが必要**という結果が得られました。最近の**我々の解析 [H]**では、模型の修正により、**カイラル不変質量が核子質量の 50%以上あれば非圧縮率が再現**されることが示されました。しかし、この模型を用いた、真空と核物質中の両方の領域での物理量からカイラル不変質量への制限は得られていませんでした。

2010 年の超重量中性子星の発見、2017 年の**重力波による中性子星合体の観測**等から、高密度物質の状態方程式に大きな制限が得られました。そして、最近の我々の研究[I]や文献[E]等において、状態方程式への制限から**カイラル不変質量への制限**が得られました。しかし、文献[E]では、標準原子核密度での非圧縮率が実験値よりも大きい模型が使われています。また、**文献[I]の解析では、中性子星合体から得られる通常質量(太陽質量の 1.4 倍程度)の中性子星の半径への制限を満たすためには、カイラル不変質量が核子質量の 60%以上を占める必要があることを示しましたが、模型の適用限界があり太陽質量の 2 倍程度の超重量中性子星内部で実現される超高密度状態が記述できていません**でした。

文献[F,G]等では、標準原子核密度の 5~6 倍以上の超高密度でクォーク物質が実現されているとして、**カイラル対称性を尊重する南部-ヨナラシーニョ (NJL) 型模型**を用いて状態方程式が得られています。しかし、この解析の低密度領域では**カイラル対称性の自発的破れの効果を顕わに含む模型が用いられていません**でした。カイラル不変質量への制限を得るためには、**低密度領域と高密度領域の両方でカイラル対称性を尊重する統一模型を用いた解析が重要**ですが、本研究以前には統一模型を用いた解析はなされていませんでした。

[A] C.E.Detar and T.Kunihiro, "Linear \square Model With Parity Doubling", Phys. Rev. D39, 2805 (1989).

[B] D.Jido, M.Oka and A.Hosaka, "Chiral symmetry of baryons", Prog. Theor. Phys. 106, 873 (2001).

[C] S. Gallas, F. Giacosa, D. Rischke, "Vacuum phenomenology of the chiral partner

- of the nucleon in a linear sigma model with vector meson”, Phys. Rev. D82, 014004 (2010).
- [D] D. Zschesche, L. Tolos, J. Schaffner-Bielich and R. D. Pisarski, “Cold, dense nuclear matter in a SU(2) parity doublet model”, Phys. Rev. C 75, 055202 (2007).
- [E] M. Marczenko, D. Blaschke, K. Redlich and C. Sasaki, “Chiral symmetry restoration by parity doubling and the structure of neutron stars”, Phys. Rev. D 98, no. 10, 103021 (2018).
- [F] K. Masuda, T. Hatsuda and T. Takatsuka, “Hadron-Quark Crossover and Massive Hybrid Stars with Strangeness”, Astrophys. J. 764, 12 (2013).
- [G] G. Baym, T. Hatsuda, T. Kojo, P. D. Powell, Y. Song and T. Takatsuka, “From hadrons to quarks in neutron stars: a review”, Rept. Prog. Phys. 81, no. 5, 056902 (2018).
- [H] Y. Motohiro, Y. Kim, M. Harada, “Asymmetric nuclear matter in a parity doublet model with hidden local symmetry”, Physical Review C92, 025201:1-8 (2015).
- [I] T. Yamazaki and M. Harada, “Constraint to chiral invariant masses of nucleons from GW170817 in an extended parity doublet model”, Phys. Rev. C 100, no. 2, 025205 (2019).

2. 研究の目的

本研究では、申請者の研究実績に基づいて、**(a)[模型の構成]** 真空状態と通常原子核密度領域、及び、中性子星内部で実現される超高密度状態を記述するカイラル有効模型を構成し、**(b)[実験・観測との比較]**その模型を用いて、原子核実験や中性子星観測等からカイラル不変質量に対する制限を得る手法を確立します。そして、**質量生成機構解明への手がかりを得ることを主目的とします。**

3. 研究の方法

本研究の低密度領域では文献[H]で構成したパリティ 2 重項構造に基づくハドロン有効模型、及び、その拡張模型を用い、高密度領域では NJL 型模型を用います。中間密度領域では、文献[G]等で用いられている手法で低密度領域と高密度領域で得られた状態方程式を内挿して状態方程式を求めます。そして、文献[I]で構築した手法を拡張し、様々な中性子星の観測結果と比較してカイラル不変質量に制限を得ます。

ハドロン有効模型に、ストレンジクォークと反ストレンジクォークから構成されるスカラー中間子や、アイソスピン 1 を持つ $a_0(980)$ 中間子を加え、その効果による補正を調べます。また、ストレンジクォークを含むバリオンを含めたパリティ 2 重項模型の構築を進めます。さらに、ヘビークォークを含むハドロンの有効模型を用いた構築を進めます。

4. 研究成果

- (1) パリティ 2 重項模型と NJL 型模型の内挿模型(PDM-NJL クロスオーバー模型)の確立:以前に構築したパリティ 2 重項模型による低密度領域の状態方程式と NJL 型模型による高密度領域の状態方程式の内挿手法を構成しました。そして、中性子星観測から得られる内部の状態方程式への制限等を用いて、カイラル不変質量に制限をつけました。 [Phys. Rev. C 103, 045205 (2021)]
- (2) クォーク凝縮の密度依存性の解析: 上記(1)で構築した PDM-NJL クロスオーバー模型における内挿領域で、カレントクォーク質量の変化に対する熱力学的ポテンシャルの応答としてクォーク凝縮を決定する手法を構築しました。そして、ハドロン物質領域からクォーク物質領域にわたってクォーク凝縮が滑らかに変化することを示しました。 [Phys. Rev. C104,

065201 (2021)]

- (3) ストレンジクォークを含むメソンの効果の解析: 上記(1)の PDM-NJL クロスオーバー模型を、ストレージ・反ストレージクォークから成る中間子を含むように拡張し、ストレージクォーク凝縮の密度依存性の解析を実施しました。そして、この中間子の効果により中性子星内部の状態方程式が柔らかくなり、カイラル不変質量への制限に修正が加わることを示しました。 [Phys. Rev. C 106, no.6, 065205 (2022)]
- (4) PDM-NJL クロスオーバー模型のまとめ: 上記(1), (2), (3) の解析をレビュー論文としてまとめました。 [Symmetry 2023, 15(3), 745.]
- (5) a_0 中間子の効果の解析: 上記(1)の模型を、 $I=1$ の a_0 中間子を含むように拡張し、 a_0 中間子効果による中性子星物質の状態方程式の変化、及び、カイラル不変質量への制限の変化を解析しました。そして、 a_0 中間子効果により状態方程式が硬くなり、その結果としてカイラル不変質量制限の上限・下限が 50MeV 程度増加することを示しました。 [Phys. Rev. C108, 055206, (2023)]
- (6) ハイペロンを含むパリティ 2 重項模型の構築: これまでの解析に用いてきたパリティ 2 重項模型に、ストレージクォークを構成要素に持つハイペロンを加えた新しい模型を構築しました。まず 2 種類のカイラル表現のバリオンを含む模型を構築し、高次項を含めることにより、実験値がほぼ再現されることを示しました。 [Phys. Rev. D108, 076017(2023)] 次に、もう一種類のカイラル表現のバリオンを含むことにより実験値が全て再現されることを示しました。 [arXiv:2403.18214 査読付雑誌に投稿中]
- (7) ヘビークォークを含むバリオンの崩壊幅の解析: 軽いクォークに対するカイラル対称性に基づいて構成されたダイクォークと、チャームクォークまたはボトムクォークが束縛したヘビーバリオンの崩壊幅を解析し、イータ中間子放出崩壊が量子異常の効果によって抑制されることを示しました。 [Phys. Rev. D 102, 114004 (2020)]
- (8) ヘビーバリオンのカイラル有効模型による解析: ヘビークォークを含むハドロンのうち、正パリティの基底状態と励起状態の両方を含むカイラル有効模型を構築し、実験で未発見の励起状態の質量・崩壊幅に予言を与えました。 [Phys. Rev. C108, 055206 (2023)]
- (9) テトラクォークのクォーク模型による解析: ボトムクォーク 2 個を含むテトラクォークをクォーク模型に基づいて解析し、基底状態に加えて励起状態の存在可能性を示しました。 [Phys. Lett. B824, 136800 (2022)]
- (10) カイラルクォーク模型を用いたハドロンスペクトルの解析: カイラル対称性の自発的破れの効果を取り入れた新しい型のクォーク模型を提案しました。そして、そのクォーク模型を用いて基底状態のバリオンとメソンの質量を計算し、実験値がよく再現されることを示しました。結果を 2 編の論文にまとめ、査読付き学術雑誌に掲載しました。 [PRD108, 054025 (2023); EPJC83, 1159 (2023)]

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件／うち国際共著 6件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Minamikawa Takuya, Gao Bikai, Kojo Toru, Harada Masayasu	4. 巻 15
2. 論文標題 Chiral Restoration of Nucleons in Neutron Star Matter: Studies Based on a Parity Doublet Model	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Symmetry	6. 最初と最後の頁 745:1-30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/sym15030745	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 -
1. 著者名 Saionji Takahiro, Jido Daisuke, Harada Masayasu	4. 巻 2023
2. 論文標題 Inverse mass ordering of light scalar mesons in the Nambu-Jona-Lasinio model	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 033D01:1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptad028	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 -
1. 著者名 Gao Bikai, Minamikawa Takuya, Kojo Toru, Harada Masayasu	4. 巻 106
2. 論文標題 Impacts of the $U(1)_A$ anomaly on nuclear and neutron star equation of state based on a parity doublet model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 965205:1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.106.065205	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 Minamikawa Takuya, Kojo Toru, Harada Masayasu	4. 巻 104
2. 論文標題 Chiral condensates for neutron stars in hadron-quark crossover: From a parity doublet nucleon model to a Nambu-Jona-Lasinio quark model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 065201:1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.104.065201	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 Meng Qi, Harada Masayasu, Hiyama Emiko, Hosaka Atsushi, Oka Makoto	4. 巻 824
2. 論文標題 Doubly heavy tetraquark resonant states	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136800:1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136800	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 Kono Shinnosuke, Jido Daisuke, Kuroda Yoshiki, Harada Masayasu	4. 巻 2021
2. 論文標題 The role of the $U_A(1)$ breaking term in dynamical chiral symmetry breaking of chiral effective theories	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 093D02:1-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptab084	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 -

1. 著者名 Minamikawa Takuya, Kojo Toru, Harada Masayasu	4. 巻 103
2. 論文標題 Quark-hadron crossover equations of state for neutron stars: Constraining the chiral invariant mass in a parity doublet model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 045205:1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.103.045205	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 Kawakami Yohei, Harada Masayasu, Oka Makoto, Suzuki Kei	4. 巻 102
2. 論文標題 Suppression of decay widths in singly heavy baryons induced by the $U_A(1)$ anomaly	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 114004:1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.114004	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 Mun Myeong-Hwan, Shin Ik Jae, Paeng Won-Gi, Harada Masayasu, Kim Youngman	4. 巻 59
2. 論文標題 Nuclear structure in parity doublet model	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The European Physical Journal A	6. 最初と最後の頁 149:1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epja/s10050-023-01064-x	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 He Bing-Ran, Harada Masayasu, Zou Bing-Song	4. 巻 108
2. 論文標題 Quark model with hidden local symmetry and its application to Tcc	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 054025:1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.108.054025	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 Takada Hiroto, Suenaga Daiki, Harada Masayasu, Hosaka Atsushi, Oka Makoto	4. 巻 108
2. 論文標題 Axial anomaly effect on three-quark and five-quark singly heavy baryons	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 054033:1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.108.054033	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 Minamikawa Takuya, Gao Bikai, Kojo Toru, Harada Masayasu	4. 巻 108
2. 論文標題 Parity doublet model for baryon octets: Diquark classifications and mass hierarchy based on the quark-line diagram	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 076017:1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.108.076017	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 Kong Yuk Kei, Minamikawa Takuya, Harada Masayasu	4. 巻 108
2. 論文標題 Neutron star matter based on a parity doublet model including the $a_0(980)$ meson	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 055206:1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.108.055206	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 He Bing-Ran, Harada Masayasu, Zou Bing-Song	4. 巻 83
2. 論文標題 Ground states of all mesons and baryons in a quark model with hidden local symmetry	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The European Physical Journal C	6. 最初と最後の頁 1159:1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-023-12338-5	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

[学会発表] 計8件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Masayasu Harada
2. 発表標題 Pentaquark picture for excited singly heavy baryons based on the chiral tetra-diquark model
3. 学会等名 Third International Workshop on the Extension Project for the J-PARC Hadron Experimental Facility (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masayasu Harada
2. 発表標題 Ω - Π^0 transition transition form factor in an effective hadronic model based on the hidden local symmetry
3. 学会等名 RCNP workshop on Hadron Physics at the LEPS2 photon beamline (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masayasu Harada
2. 発表標題 Study of dense nuclear matter using parity doublet models
3. 学会等名 Reimei Workshop "Hadrons in dense matter at J-PARC" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masayasu Harada
2. 発表標題 A study of neutron star matter based on a parity doublet model with $a_0(980)$ meson effect
3. 学会等名 4th workshop on "Quarks and Compact Stars (QCS2023)" (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masayasu Harada
2. 発表標題 A chiral quark model with Hidden Local Symmetr
3. 学会等名 Nagoya Workshop on Exotic Hadrons (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masayasu Harada
2. 発表標題 A chiral quark model with Hidden Local Symmetry
3. 学会等名 Fourth International Workshop on the Extension Project for the J-PARC Hadron Experimental Facility (HEF-ex 2024) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 原田正康
2. 発表標題 対称性に基づく有効模型を用いたチャームハドロンの解析
3. 学会等名 研究会「Through the Hadron, and What We Found There」(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 原田正康、Bing-Ran He, Bing-son Zou
2. 発表標題 A chiral quark model with Hidden Local Symmetry
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

国際研究集会 Nagoya Workshop on Exotic Hadrons	開催年 2023年～2023年
---	--------------------

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
中国	華中師範大学			
中国	北京大学	南京師範大学		
韓国	Institute for Basic Science			