

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540318

研究課題名(和文) K中間子凝縮-ハイペロン共存に基づく新しい高密度核物質相の探究

研究課題名(英文) Research for novel high-density nuclear matter based on kaon condensation -hyperon coexistence

研究代表者

武藤 巧 (Muto, Takumi)

千葉工業大学・情報科学部・教授

研究者番号：60212247

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円、(間接経費) 720,000円

研究成果の概要(和文)：中性子星内部や高エネルギー重イオン衝突実験での存在・生成が期待される、ストレンジネス量子数を含む特異な高密度物質相の存在可能性を検討する。有限の大きさを持つ原子核中で複数のK-中間子とハイペロンが共存しながら束縛された状態、および中性子星内部の高密度物質中におけるK中間子凝縮とハイペロンとの共存相を対象とする。

物質を構成するバリオン間に働く力を与える相対論的平均場理論に、K中間子-バリオン間、およびK中間子間に働く力を与えるカイラル対称性を具現する相互作用モデルを結合させた理論的枠組みを用いて、これらの物質相の構造、系の特徴や両者の物質相の間の関係について統一的に明らかにする。

研究成果の概要(英文)：We study possible existence of novel phases in high-density matter with multi-strangeness quantum numbers. Such phases may be realized in neutron-stars and may be formed through high-energy heavy-ion collisions. As multi-strangeness system, we consider both deeply bound multi-antikaonic states with hyperon-mixing in finite nuclei and kaon-condensed phase in hyperon-mixed matter in neutron stars.

On the basis of the relativistic mean-field theory for baryon-baryon interactions, coupled with the nonlinear effective chiral model which describes kaon-baryon and kaon-kaon interactions, we investigate structures and characteristic properties of these two phases, and clarify relations between them in a unified way.

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：高密度核物質 オン相互作用 K中間子凝縮 状態方程式 ハイペロン カイラル対称性 K凝縮ハイパー核 マルチストレンジネス系 K中間子-バリオン相互作用

1. 研究開始当初の背景

高温/高密度状況下における量子色力学(QCD)のダイナミクスと相構造を理解する上で、ハドロン相とクォーク相の両相に於いて、カイラル対称性とストレンジネスの自由度が重要な役割を果たすと考えられる。このようなストレンジネス自由度を含むダイナミクスを通して物質の多様な存在様式を追求する際、中性子星内部の高密度ハドロン物質が主要な対象の1つとして挙げられる。その中でも、ストレンジネス自由度のマクロな発現形態としてK中間子凝縮(K凝縮)が注目され、その存在の可否が理論面・観測面から精力的に追究されてきた。K凝縮は、カイラル対称性の自発的破れに伴い現れる南部-Goldstone ボソンであるK中間子が、S波KN相互作用の引力効果で基底状態にボーズ・アインシュタイン凝縮を起こしたハドロン物質相である。K凝縮の存在は、状態方程式(Equation of State, EOS)の軟化による中性子星の内部構造への影響、ニュートリノ放出による中性子星の冷却の促進など、中性子星現象との関連で重要である。

また、ストレンジネスをもつバリオンのハイペロン(Λ , Σ , Ξ , ...)が、K凝縮相の存在密度と同様の密度領域で通常の核子(N)とレプトンのみからなる中性子星物質中に混在している可能性が理論的に示唆されてきた(以下ではハイペロン物質という)。最近、我々はハイペロン物質中で、K凝縮が新しい発現機構によって起こり得ることを指摘した。それによると、ハイペロンの混合によるEOSの軟化に加えてK凝縮による軟化が加わるため、ハイペロン物質中のK凝縮相のEOSは軟化が顕著になり、系のエネルギーがバリオンの数密度 n_B とともに減少する密度領域が現れることを示した。更に高密度領域ではバリオン間の斥力によりEOSの堅さが回復し、その結果、系のエネルギーが n_B に関して極小になる状態(密度異性体)が存在し得ることを示した。このとき、系の状態は本質的に重力に依らずに強い相互作用で束縛された「K凝縮自己束縛状態」という特異な状態として、原子核から中性子星の規模までの任意のスケールで存在し得る。この結果は、現在未解明のダークマターの候補の一つとしての可能性など、宇宙を構成する物質の存在形態に関わる重要な示唆を与え、宇宙の構造・進化と切り離せない問題を提起する。

一方、近年K凝縮の研究を契機として、核媒質中のK中間子の質的な変化に関心が広がり、国内外で関連する研究が活発に行われてきた。特に実験面からはJ-PARC, GSI-FAIR等の施設によるK中間子が原子核に深く束縛された状態の探索など、K中間子をプローブとするストレンジネス核物理・高密度核物質の物理の探求が計画されている。我々は相対論的平均場理論に基づき、複数個のK中間子が原子核に束縛された状

態(多重K中間子束縛原子核, Multi-antiKaonic Nuclei, MKN)の性質とその実現可能性を理論的に検討してきた。こうした有限原子核から中性子星内部の無限系ハドロン物質に至るまでの、K中間子による自己束縛系に特徴付けられるストレンジネス核物質の性質を、統一的に理解する必要があった。

2. 研究の目的

本研究では、ストレンジネス量子数の自由度を持つハドロン物質として、従来独立に取りあげられてきたK中間子凝縮とハイペロン物質の共存の可能性を、原子核のような有限系から中性子星内部の高密度ハドロン物質のような無限系まで、相対論的平均場理論に基づいて統一的に検討し、K凝縮自己束縛状態のような特異なハドロン物質状態の可能性や、高密度ハドロン物質のEOSの特徴を明らかにする。これまでに存在が示唆されてきたK凝縮、ハイペロン物質、及びストレンジクォーク物質等の様々な高密度物質相の性質や諸相間の関係を明らかにすることによって、ストレンジネス自由度を含む高密度物質の諸相を統一的に理解することを目的とする。

具体的には、これまでの簡単なモデルによる取り扱いを進展させ、高密度状態に重要な相対論的諸効果を取り入れることによって、以下の課題を詳細に検討する。

(1)K凝縮とバリオン(核子とハイペロン)の核内分布の非一様性を考慮に入れ、K凝縮、ハイペロン、核子からなる「K凝縮自己束縛状態」を原子核衝突実験状況下で検討し(以下ではK凝縮ハイパー核と呼ぶ)、その存在可能性や生成過程、構造、及び崩壊過程について調べる。(2)(1)と同じ相互作用モデルに基づき、中性子星内部でのハイペロン物質とK凝縮の共存相[Y+K相]の発現機構と系の特徴を明らかにする。特に、高密度領域でのK凝縮-バリオン間引力及び多体斥力の発現機構と「K凝縮自己束縛状態」の存在可能性、物質としての安定性との関連について検討する。(3)ハドロン物質中のK凝縮とクォーク物質中のK凝縮との微視的構造の違いや相図上の相互関係を明らかにする。

3. 研究の方法

K中間子(K)-バリオン相互作用、K-K相互作用に関しては、ハドロンダイナミクスに重要なカイラル対称性から規定される非線形有効カイラルLagrangianを用い、バリオン間相互作用に関しては相対論的平均場理論を用いる。ハドロン相を記述する理論的枠組として、両者を結合させた相互作用モデルを構成し、K中間子-バリオン系を記述する。

(1)有限系におけるK凝縮ハイパー核

MKNの記述に用いてきた相対論的平均場理論と非線形カイラルLagrangianを結合し

た理論的枠組を、ハイペロン(Σ , Λ , Ξ)を含む場合に拡張し、バリオン-バリオン間相互作用及び K-バリオン間相互作用を、 $U_{K\Lambda}$, $U_{K\Sigma}$, $U_{K\Xi}$ 中間子交換に加え、ストレンジネスを担う Λ , Σ , Ξ 中間子交換によって記述する。 $|S|$ 個の K 中間子を標的原子核 (質量数 A, 原子番号 Z) に入れ、ストレンジネス数 $|S|$, 電荷 $Z-|S|$, 及びバリオン数 A 保存条件の下で球対称性を仮定し、ストレンジネスを保存する非中間子過程に関する化学平衡条件, $\mu_K + \mu_{\Lambda} = \mu_p$, $\mu_K + \mu_{\Sigma} = \mu_n$, を考慮しながら系の熱力学的ポテンシャル \mathcal{E} の極値を得る。マルチストレンジネス核のエネルギーの $|S|$ 依存性から、系の安定性を議論する。

(2) 中性子星内部でのハイペロン物質と K 凝縮の共存相の発現機構と系の特徴

(1)と同じ相互作用モデルに基づき、系の一様性を仮定して熱力学ポテンシャル \mathcal{E} を構成し、荷電中性条件と K, バリオン, 及び電子間の弱い相互作用過程に関する化学平衡条件を課しながら \mathcal{E} の極値を求めることによって、(Y+K)相の基底状態を得る。

4. 研究成果

(1)有限系での K 凝縮ハイパー核の可能性

標的核が $A=15, Z=8$ で、対称核物質中での K 中間子の光学ポテンシャルの深さ $U_K < -180$ MeV の場合について、バリオンの個数密度分布の結果を図 1 に示す。原子核の基底状態では $K + N \rightarrow \Lambda$ を通じて、K 中間子が担っていたストレンジネスがすべて核子に吸収され、ハイペロンに遷移する。マルチストレンジネス核の構造の定性的な違いは、 U_K が、 $U_K = -180$ MeV の値を境に分類される。 $|U_K| < 180$ MeV のとき、基底状態は多重ハイパー核となり、K は混在しない。 $|S|$ の値が小さい時 ($|S|=2$), ハイペロンとしては Λ のみが混在する。 $|S|$ が大きくなると、 Σ と共に Ξ が混在し、 $|S|$ が 6, 10 と大きな値では Ξ が主な $|S|$ の担い手となる。一方、 $U_K = -180$ MeV のように K-N 間の引力が非常に強い場合は、 K と Λ, Σ, Ξ が混在・共存する状態が得られる。(図には示していない)。このとき、系の束縛エネルギーは非常に大きくなり、系の不安定性に導く可能性がある。

これまでの結果のまとめとして、 $U_K < -180$ MeV の場合について、マルチストレンジネス核の標的核からのエネルギー差を 1 ストレンジネスあたりで求め、 $|S|$ の関数として表したものを図 2 に示す。基底状態はすべての $|S|$ に対してマルチハイパー核となり、K 中間子は束縛しない。 $|S| > 3$ のときこの状態は、strong process, $(1116)+N$ を通じて崩壊する。以前の研究で得られたように、K 中間子が束縛された MKN は、すべての $|S|$ が K 中間子によって担われ、Y は混在しない状態であり、マルチハイパー核よりも高いエネルギー状態として存在し得る。このとき、 MKN は基底状態ではないが、 $U_K = -80$ MeV, -120 MeV の場

合に対して 1 ストレンジネスあたり、それぞれ数十 MeV, 100 MeV 程度の束縛エネルギーが得られる。

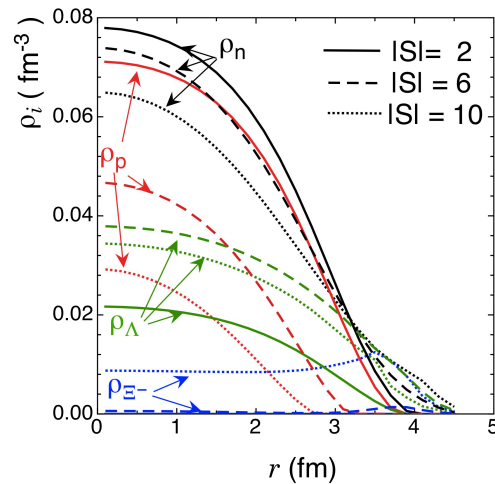


図 1 標的核 $^{15}_8\text{O}$, $|S|=2, 6, 10$ の場合に

対するストレンジネス核内での各バリオン個数密度分布 $\rho_i(r)$ 。 $U_K < -180$ MeV の場合を示す。

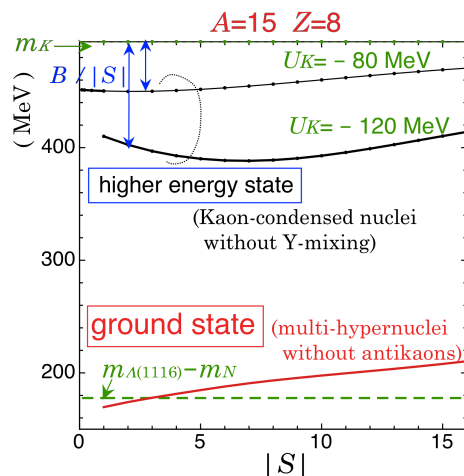


図 2 マルチストレンジネス核の標的核からのエネルギー差を 1 ストレンジネスあたりで求め、 $|S|$ の関数として表したものを。

(2) 中性子星内部における (Y+K) 相の発現機構と系の特徴

以下に、(Y+K)相の発現密度と EOS の結果

をまとめる。

(Y+K)相の発現密度は、KN 相互作用の引力の大きさを表す U_K の値に依存する。 $U_K > -80$ MeV のとき(KN 間の引力が非常に弱い場合)、着目している密度領域ではK凝縮は現れない。逆に $U_K < -180$ MeV のように非常に大きい引力の場合は、ハイペロンが出現するよりも低い密度からK凝縮が現れる。標準的な大きさと考えられてきた U_K は、-120 MeV 程度に相当し、そのときK凝縮はハイペロン物質中から $4 \rho_0$ (ρ_0 は標準原子核密度)程度バリオン密度で発現する。

EOS の特徴

$U_K = -120$ MeV の場合に、(Y+K)相における1粒子あたりのエネルギー ε / ρ_B の ρ_B 依存性(実線)を図3に示す。比較のため、破線はK凝縮を伴わないハイペロン物質についての結果、点線はK凝縮とハイペロン混在を伴わない中性子星物質についての結果を表す。

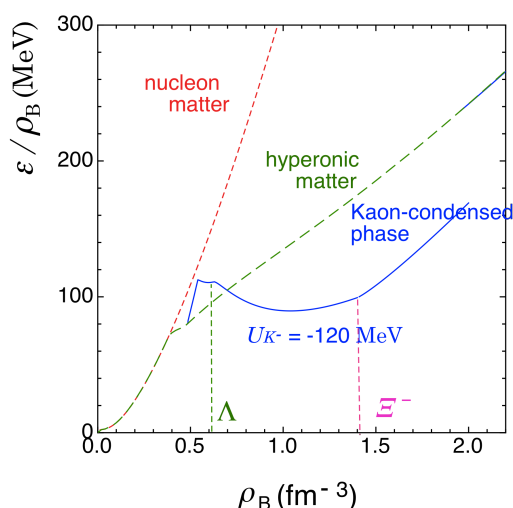


図3 (Y+K)相における1バリオンあたりのエネルギーのバリオン密度 ρ_B 依存性(実線)、 $U_K = -120$ MeV の場合を示す。

ハイペロンの出現後、 $\rho_B = 0.68 \text{ fm}^{-3}$ でK凝縮が基底状態として発現する。(Y+K)相中では、Y混在とK凝縮の両方によるエネルギー利得の効果で、系のEOSの軟化が顕著になる。また以前、バリオンに対する非相対論の枠組で示されたように、 $\rho_B = 1.0 \text{ fm}^{-3}$ で密度異性体としての準安定状態ができ、その結果、重力に依らない自己束縛した状態の存在が示唆される。しかしこのEOSでは、特に高密度領域での硬さが足りず、観測にかかっているような重い中性子星を得ることができない。高密度領域でEOSを堅くするような効果が必要である。

今後の課題として、高密度物質中に(Y+K)相のようなストレンジネス自由度が発現するという理論上の必然と観測事実との整合性を明らかにすることが焦眉の課題として

挙げられる。

具体的には、(1405)、およびカイラル摂動的な取り扱いでK中間子運動量についての高次効果であるrange effectを取り入れ、EOSの U_K 依存性を抑制する可能性を考えることや、高密度での斥力効果を得るため、バリオン間の多体力の現象論的導入などが挙げられる。後者についてはユニバーサル3体力による斥力効果を(Y+K)相へ導入することが考えられる。また、バリオン-バリオン(B-B)間相互作用について、多体問題の理論的枠組をこれまでの相対論的平均場理論(Hartree近似)からHartree-Fock法に拡張し、バリオンに由来する反対称化(Fock)効果がEOSを堅くする可能性を検討する。更に、K中間子交換型B-B相互作用において、K凝縮相の存在下でK中間子ダイナミクスがどのように変化し、B-B間斥力にどのような影響をもたらすかを検討する。

ハドロン物質中およびクォーク物質中でのK凝縮相の相平衡・連続性の観点からは、クォーク物質相でのK凝縮への移行を取り入れたEOSの性質を検討することが重要な課題として挙げられる。その結果を踏まえ、ハドロン相とクォーク相をつなぐクロスオーバー領域のEOSの役割を(Y+K)相で検討することが考えられる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計10件)

T. Tatsumi, T. Muto, "Quark beta decay in the inhomogeneous chiral phase and cooling of compact stars", Physical Review D 89, 103005-1-13 (2014). DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.89.103005>, 査読有

T. Muto, T. Maruyama, T. Tatsumi, "Interplay of antikaons with hyperons in nuclei and in neutron stars", EPJ Web of Conferences, 2014 to be published. 査読無

T. Muto, T. Maruyama, T. Tatsumi, "Coexistence of Antikaons and Hyperons in Nuclei and in Neutron Stars", JPS Conference Proceedings Vol. 1, 013081 (2014). 10.7566/JPSCP.1.013081. 査読有

武藤 巧, "K中間子凝縮-ハイペロン共存に基づく新しい高密度核物質相の研究", 千葉工業大学プロジェクト研究年報 2013年, pp. 147-148, 2013. 査読無

武藤 巧, "高密度ハドロン物質中でのK中間子凝縮-ハイペロン共存と中性子星観測との整合性", 原子核研究 Vol. 57, pp. 100-103 (2013). 査読無

T. Muto, T. Maruyama, T. Tatsumi, "Coexistence of Bound Antikaons and Hyperons in Finite Nuclei",

原子核研究 Vol. 57, pp.230-236(2013).
査読無 (招待講演)

T. Tatsumi, T. Muto,
“ Quark beta decay in an inhomogeneous
chiral phase and cooling of hybrid stars”,
Proceedings of Science, NICXII(2012),
pp 237 - 243.

http://pos.sissa.it/archive/conferences/146/237/NIC%20XII_237.pdf 査読無

武藤 巧, “ K 中間子凝縮-ハイペロン共存
に基づく新しい高密度核物質相の研究 ”,
千葉工業大学プロジェクト研究年報 2012 年,
pp.155-156, 2012. 査読無

T. Muto, T. Maruyama, T. Tatsumi,
“ Multi-antikaonic nuclei and in-medium
kaon properties in dense matter”,
Journal of Physics: Conference Series 312,
022018-1-6, (2011).

DOI:10.1088/1742-6596/312/2/022018

査読有

T. Muto, T. Maruyama, T. Tatsumi,
“ Effect of (1405) on structure of
multi-antikaonic nuclei”,
AIP Conference Proceedings Vol.1374,
pp.197-200, (2011).

DOI:10.1063/1.3647124 査読無(招待講演)

[学会発表](計 12件)

武藤 巧, 丸山 敏毅, 巽 敏隆, “ 高密度
物質中での K 中間子凝縮-ハイペロン共存相
に対するバリオン間斥力効果 ”,
物理学会第 69 回年次大会(東海大学湘南キャン
パス 神奈川県, 3月27-30日, 2014)

武藤 巧, “ Coexistence of kaons and
hyperons in Neutron Stars in a
relativistic mean-field theory ”,
新学術領域研究「中性子星核物質」第 2 回ウ
ィンタースクール & 研究会, (理化学研究所
和光本所 RIBF 棟, 埼玉県, 12月25日~12月

T. Muto, “ EOS of high-density matter
with kaons and hyperons ”, HPCI 滞在型研究
会 : Nuclear equation of state with
strangeness (理化学研究所和光本所, 埼玉
県, 11月11-15日, 2013).

武藤 巧, 丸山 敏毅, 巽 敏隆, “ K 中間
子凝縮-ハイペロン共存相と中性子星観測と
の整合性 ”, 物理学会秋季大会(高知大学朝
倉キャンパス, 高知県, 9月20-23日, 2013).

武藤 巧, 丸山 敏毅, 巽 敏隆, “ 原子
核中での K 中間子とハイペロンの共存可能
性 ”, 日本物理学会第 68 回年次大会(広島大
学東広島キャンパス, 広島県, March 26-29,
2013).

T. Muto, “ Coexistence of antikaons and
hyperons in finite nuclei ”, Workshop on
Future Prospects of Hadron Physics at
J-PARC and Large Scale Computational
Physics in 2013 ”, 2013年2月11日~2月
13日, Ibaraki Quantum Beam Research Center,
茨城県)

T. Muto, “ Interplay between antikaons
and hyperons in finite nuclei ”,
YITP Molecule Seminar, “ Nuclear Equation
of State and Hypernuclear Physics ”
(Jan.11, 2013, YITP, 京都府)

武藤 巧, 丸山 敏毅, 巽 敏隆,
“ 多重 K 中間子束縛原子核の可能性とハイペ
ロン混在 ”, 日本物理学会第 67 回年次大会
(関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス, 兵庫
県, March 24-27, 2012)

T. Muto, T. Maruyama, T. Tatsumi,
“ Possibility of multi-antikaonic nuclei
with hyperon-mixing ”,
Workshop on `Future Prospects of Hadron
Physics at J-PARC and Large Scale
Computational Physics`

(2012年2月9日~2月11日, Ibaraki Quantum
Beam Research Center, Tokai, 茨城県)

武藤 巧, 丸山 敏毅, 巽 敏隆,
“ K 中間子束縛原子核におけるハイペロン混
在の効果 II ”, 日本物理学会 2011 年秋季大
会(弘前大学文京町キャンパス, 青森県,
Sept.18, 2011)

武藤 巧, “ 高密度星とストレンジネス核
物理 ”, 千葉大学大学院理学研究科「計算機
物理学特別講義 I」(2011年6月16, 17日,
千葉県)(招待講演)

T. Muto, “ Antikaonic nuclear bound
states with hyperons ”, YIPQS & WCU joint
international molecule-type workshop on
dense strange nuclei and compressed
baryonic matter, (April 21, 2011, YITP, 京
都府)

[図書](計 1件)

T. Muto,
“ Neutron Stars : The Aspect of High
Density Matter, Equations of State and
Observables”(Eds. H.Uechi, S.T.Uechi,
B.Serot), Chapter 7 “ Signals of Dynamical
Phenomena (meson condensations) and EOS of
Neutron Stars”, pp.171 - 198, 2012
Nova Publishers.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

武藤 巧 (MUTO, Takumi)

千葉工業大学・情報科学部・

教育センター・教授

研究者番号 : 60212247