

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月17日現在

機関番号：27102

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22540288

研究課題名（和文）予測性の高いバリオン間相互作用に基づく中性子星物質のバリオン組成の研究

研究課題名（英文）Properties of neutron star matter based on modern baryon-baryon interactions

研究代表者

河野 通郎（コウノ ミチオ）

研究者番号：40234710

研究成果の概要（和文）：中性子星物質として実現される高密度バリオン多体系の存在様式を、バリオン間相互作用に基づいて研究した。高密度核物質の予測には原子核の基本的性質である飽和性の定量的理解が不可欠であるが、3体力まで系統的に導入されるカイラル有効理論の相互作用を用いて、飽和性が3体力の寄与により微視的に説明できることを明らかにした。ハイペロンの役割については、中性子星内では $\Sigma$ や $\Xi$ 粒子は現れず、 $\Lambda$ 粒子に対しては近年観測された大質量中性子星を説明するために必要な3体力が微視的に予測されることを示した。

研究成果の概要（英文）：Structures of high density baryonic matter realized as a neutron star are studied on the basis of microscopic baryon-baryon interactions. It is shown that the fundamental saturation property of nuclear matter is understood quantitatively by the interaction of the chiral effective field theory with three-nucleon forces. Sigma and xi hyperons are unlikely to appear in neutron star matter because of their repulsive potentials. Possible three-body force effects for lambda hyperon are investigated, which are needed to understand the massive neutron star recently observed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
平成22年度	900,000	270,000	1,170,000
平成23年度	500,000	150,000	650,000
平成24年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	1,900,000	570,000	2,470,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・宇宙線・宇宙物理

キーワード：原子核(理論)

## 1. 研究開始当初の背景

中性子星物質の存在様式の研究は、原子核物理学が明らかにしてきた核子多体系の理解を総合的に適用して進める課題である。核子のフェルミエネルギーが上がるにつれ、ストレンジネス自由度が析出することは以前から予測されているが、どの密度でどのハイペロンが重要になるかについての定量的理

解は、バリオン間相互作用の強さとスピン・アイソスピン依存性に関わる問題である。そのためには、原子核の物理とストレンジネス生成実験で検証される信頼性の高いバリオン間相互作用を基礎にして、ハイペロンを含むバリオン多体系の可能な構造について解明し、観測される中性子星のデータに基づいた検証を行わなければならない。

近年、原子核物理学の理論的・実験的研究の進展により、これまで仮定に頼っていたいくつかの性質についての知見が確かなものになりつつある。ひとつは、結合クラスター法やモンテカルロ変分法のような第一原理的計算手法が発展することで多体相関の寄与を取り入れる定量的計算が可能になり、核子間相互作用に基づく核子多体系の理解が進んだことである。原子核の基本的性質である飽和性を現実的核力から出発して理解する課題は原子核物理学の基本的課題として半世紀以上研究されてきた課題であるが、高運動量成分を繰り込む処方新しい理論の発展により相互作用の短距離部の記述にあった不定性についての疑念が解消され、飽和性を定量的に説明するために必要な3体力を定量的に決定できる段階に達している。また、カイラル有効理論による系統的な記述の進展により3体力を2体力と首尾一貫して導出することが可能になってきた。

もう一つの進展は、ハイペロンと核子の相互作用についての研究が進んだことである。 $\Lambda$ ハイペロンを除けば、 $\Sigma$ ハイペロンおよび $\Xi$ ハイペロンと核子の相互作用、そしてハイペロン間の相互作用についての実験データがほとんどなく、理論的な相互作用の記述は非常に不定性が大きいものであった。この状況は、私が研究課題としてきたハイパー核研究の進展によって変わりつつある。過去10年ぐらいの間に精度が不十分ながらも行われてきた $\Sigma$ ハイペロンと $\Xi$ ハイペロンの生成スペクトル測定実験の解析により、 $\Sigma$ ハイペロンが核物質中では斥力ポテンシャルを持つはずであること、 $\Xi$ ハイペロンもおそらくそうであることが明らかになったことである。理論的には、非相対論的クォークモデルによるオクテットバリオン間ポテンシャルの統一的記述が京都・新潟グループによって展開され、最近ではカイラル有効理論の枠組みをストレンジネスセクターに拡張してポテンシャルパラメーターを設定することも行われている。私が行ってきた核物質内でのハイペロンエネルギー計算により、それらのポテンシャルは上記の $\Sigma$ および $\Xi$ の性質を再現することのできるものであることが明らかになっていて、従来のものに比べてはるかに高い予測性をもつバリオン間相互作用の記述が得られている。

もちろん現状では実験データが少ないが、現在高エネルギー加速器研究機構で建設中のJ-PARCプロジェクトにより、ここ数年の間に精度が向上したハイペロン生成スペクトルが測定されることが期待される。それによって、 $\Sigma$ 、 $\Xi$ ハイペロン-核子間相互作用の性質の実験的情報は豊富になるものと期待される。詳細なスピン・アイソスピン依存性は予言性を持つポテンシャル理論に依

拠して中性子星物質のバリオン組成の問題を微視的観点から研究することは、ハイパー核物理の展開の一つの方向として興味深い課題である。

## 2. 研究の目的

近年、原子核物理学の研究は多体問題の第1原理的精密計算が行われ、核子間相互作用の理解が深化し3体力の寄与の定量的評価が可能になった段階になっている。また、高密度核物質ではストレンジネスの自由度を考慮することが重要になるが、ハイペロン-核子相互作用についてもいくつかの新しい発見がなされている。これらの現状を踏まえて、3体力と3体相関の寄与を同時に扱った上でそれらの定量的理解を進め、他方不定性の大きいストレンジネスセクターのバリオン間相互作用を理論的研究と実験データに基づいて実証的に明らかにするという研究を行うことにより、これまで非常に不定性の大きい予測がなされていた中性子星核物質におけるバリオン組成の問題を研究する。

核子間相互作用理論の面でも、カイラル有効理論という新しい方法によるパラメーター化の研究が進み、3体力を不定性が小さい枠組みで定量的に議論することが可能になり、軽い原子核で厳密計算をおこなって検証を行う研究が進んでいる。ハイペロンが含まれる温度の低い中性子星物質の状態方程式を議論するためには、前提として通常の核子多体系が示す飽和性を核子間相互作用から出発して微視的に再現するという問題の定量的な理解を確立しておく必要がある。ここでは3体力の寄与が決定的に重要であることが広く認められているが、微視的な理解が十分であるとは言えないのが現状である。そこで、量子多体相関を系統的に取り扱う方法としてすぐれた枠組みである結合クラスター法を用いた計算を、 ${}^4\text{He}$ を対象として実行し、3体相関と併せて3体力の寄与を考察する研究を行う。その後新たなハイペロン生成実験情報が得られる状況に応じてその解析を行い、バリオン間相互作用の検証・更新を行い、従来のものに比べ信頼度が上がりしたがって予測性の高いと考えられるバリオン間相互作用を基礎として中性子星物質の問題を考える。

## 3. 研究の方法

予測性の高いバリオン間相互作用を用いてマルチハイペロン核物質中でのバリオンチャンネル結合反応行列方程式を解くことにより、中性子星物質の状態方程式を求め、初年度は前段階として、状態方程式を定量的に考える際に重要な3体力についての理解を得るため、 ${}^4\text{He}$ において結合クラスター計算を実行し、3体相関との関係を定量的に明

らかにする研究を優先させる。その後、数年以内に得られると期待されるハイペロン生成スペクトルの実験データを半古典的歪曲法を用いて解析し、バリオン間相互作用の理論的記述を検証することを並行して行いながら、中性子星物質のバリオン組成の問題を研究する。

従来、ハイペロン-核子相互作用として用いることのできた相互作用は Nijmegen グループが作成した中間子交換描像によるものがほとんど唯一のものであった。しかし、この10年ほどの間のハイパー核物理研究により、 $\Sigma$ ハイペロンあるいは $\Xi$ ハイペロンと核子の相互作用に関してはそのポテンシャル模型の信頼性が低いことが明らかになっている。このポテンシャル模型に基づいてパラメーターが調節された現象論的模型も多いが、それらの結果は見直す必要がある。近年、他の描像すなわち非相対論的クォーク模型やカイラル有効理論によるオクテットバリオン間のポテンシャルのパラメーター化が試みられ、既存の実験データが示唆する性質に関しては十分信頼できる結果を与えることが明らかになっている。今後数年間のうちには、高エネルギー加速器研究機構の J-PARC 計画で行われるハイペロン生成実験により、これまでよりはるかに精度の高い実験データが得られ、ハイペロン-核子間の相互作用に関する実験的情報が豊富になるものと期待される。このような実験状況を背景にしてより信頼性の高いバリオン間相互作用を基礎に中性子星物質を考えることは非常に重要である。

#### 4. 研究成果

核物質において核子間相互作用がもたらす多体相関そして3体力の役割を明らかにするために、 ${}^4\text{He}$  を対象として結合クラスター計算を行った [発表論文(5)]。結合クラスター法は、量子多体理論として系統的に厳密な展開が可能な方法であり、この10年ほどで世界的にいくつかのグループにより実際計算が行われてきており、ここで行った計算内容には先行研究があるが、ここで用いた結合クラスター法は、鈴木賢二氏と岡本良治氏が1990年代に提出した多体相関平均場を系統的に導入する処方による定式化のものであり、他のグループのものとは違って多くの項を系統的に集める見通しの良い方法であるため、様々な相関の物理的内容を把握するのに有用である。今回、3体力と3体相関を含む関係式を具体的に書き表した。実際に行った数値計算では3体力を取り入れる段階には至らなかったが、この方程式は少し大きな原子核への適用に際してその簡潔さが利点となるし、3体力の寄与と多体相関の関わり合いを調べ

る有効な枠組みである。

3体力の寄与を定量的に評価する研究として、そのまま3体力として扱うことは計算が非常に複雑なため、一つの自由度を積分して2体力化した上で3体力の寄与を考察する手法を採用する計算を行った。具体的には、2体力と3体力が系統的にパラメーター化されるカイラル有効理論を用い、まず核物質中で2体化したうえで部分波展開を行い、2体力に加えてブリュックナー理論の標準的多体計算を実行した。対称核物質での予備計算で、核物質の飽和性の再現にとって3体力が定量的に望ましい結果を与えることが分かり、引き続き中性子星物質の考察に進んだ。この計算の副産物として、原子核の殻構造を記述するのに基本的に重要なスピン軌道力の強さが、2体力だけでは実験を再現するのに不足するという未解決問題が、3体力の寄与を入れれば解決する可能性があることを定量的に明らかにすることができた。飽和性と強いスピン軌道場を持つ一体場は原子核の基盤となる特徴的性質であり、定量的な微視的理解が進展したことは非常に大きな意味を持つ成果である。

中性子物質の状態方程式、すなわちエネルギーの密度依存性については、2体化3体力を取り入れた計算により、中性子星の解析で標準的に用いられているものに一致するエネルギー曲線が得られることが明らかになった。現象論的な調節を含む従来の状態方程式が、パラメーター調節を行うことなく微視的計算で再現されることは興味深く、3体力の定量的寄与についての理解が進んだ。

中性子星物質におけるハイペロンの役割については、近年開発されてきた信頼性の高い2種類のバリオン間相互作用を用いてバリオンチャンネル結合反応行列方程式を数値的に解くことによりバリオン間有効相互作用を求め、中性子星物質内でのハイペロンエネルギー計算を行った。この2つの相互作用、すなわちクォーク模型に基づくパラメーター化とカイラル有効理論に基づくものは、基礎となる描像が大きく異なるにもかかわらず、発表論文(1)で示したように非常によく似た性質を持っている。その意味で、従来のバリオン間相互作用にくらべ信頼性が高いと考えられるそれらの相互作用を用いて、中性子物質内計算した結果は発表論文(7)で報告した。 $\Sigma$ 粒子は中性子物質中では非常に強い斥力的効果を受け、 $\Xi$ 粒子もある程度の斥力ポテンシャルを得る。高密度の中性子星物質内ではそれらのハイペロンは析出しなことが十分予測される。 $\Lambda$ 粒子は、現実には $\Lambda$ 粒子が原子核に束縛されるハイパー核が存在することの延長として、高密度中

性粒子星物質内では $\Lambda$ ハイペロンが現れるほうがエネルギー的に有利である。

本研究の申請段階では知られていなかった、太陽の2倍程度の質量を持つ中性子星の存在が近年の観測により明らかになり、従来考えられていた中性子星のバリオン組成は大幅に見直さなければならない状況になった。バリオン間相互作用に基礎を置いた微視的計算による理解の重要性が増したと考えることができる。この研究課題の中で、核子多体系の基本的性質を理解する上で核子間の3体力が非常に重要な役割を果たすことを定量的に明らかにしたが、対応する3体力を $\Lambda$ ハイペロンについても取り入れることが重要であると予想される。そこで、核子系の場合の3体力がアイソバー $\Delta$ を励起する過程を経由するものに由来するという描像に基づき、SU3対称性の観点から対応するオクテットバリオン励起過程を $\Lambda$ 粒子の場合にも考え、その寄与を評価した。すなわち、 $\Sigma^*$ ハイペロンが励起される過程の寄与を2次の摂動で評価して、核子の場合と同程度の斥力的寄与が生じることを確かめた。大質量中性子星については、 $\Lambda$ 粒子の相互作用に現象論的な斥力を導入してその存在を説明する研究が多く行われているが、その斥力の根拠を微視的観点から明らかにすることができたことになる。

#### 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7件)

(1) M. Kohno, "Comparative study of hyperon-nucleon interactions of quark model and chiral effective field theory by low-momentum equivalent interactions and G matrices", Physical Review C81, 014003:1-7 (2010).

(2) M. Kohno, Y. Fujiwara, and Y. Suzuki, "Quark-model predictions for the  $\Xi N$  interaction and the implications to  $\Xi$  hypernuclei", Nuclear Physics A835, 358-361 (2010).

(3) K. Minomo, K. Ogata, M. Kohno, Y. R. Shimizu, and M. Yahiro, "The Brieva-Rook localization of the microscopic nucleon-nucleus potential", J. of Physics G37, 085011 (2010).

(4) K. Ogata, T. Matsumoto, S. Hashimoto, K. Minomo, T. Egami, Y. Iseri, M. Kohno, and others, "Status of breakup reaction

theory" J. of Phys.: Conf. Series 312, 082008 (2011).

(5) M. Kohno and R. Okamoto, "4He energies and radii by the coupled-cluster method with many-body average potential", Physical Review C86, 014317:1-11 (2012).

(6) M. Kohno, "Strength of reduced two-body spin-orbit interaction from a chiral three-nucleon force", Physical Review C86, 061301:1-4 (2012).

(7) M. Kohno, " $\Lambda$ ,  $\Sigma$ , and  $\Xi$  hyperons in neutron matter", Nuclear Physics A, in press (2013).

[学会発表] (計8件)

(1) 河野通郎, 岡本良治: "平均2体ポテンシャルを取り入れた ${}^4\text{He}$ のCCM計算", 日本物理学会, 2010年9月11日, 九州工業大学.

(2) 河野通郎, "中性子物質内ハイペロンポテンシャル", 日本物理学会 2011年3月26日, 新潟大学.

(3) 河野通郎, 岡本良治: " $V_{low k}$ を用いた ${}^4\text{He}$ の結合クラスター計算で見る多体相関の効果", 日本物理学会, 2011年9月16日, 弘前大学.

(4) 河野通郎: "2体化3体力を取り入れたLOBT核物質計算", 日本物理学会, 2012年3月24日, 関西学院大学.

(5) 河野通郎: "2体化3体力はスピン・軌道場の不足を補う", 日本物理学会, 2012年9月13日, 京都産業大学.

(6) M. Kohno: " $\Lambda$ ,  $\Sigma$ , and  $\Xi$  hyperons in neutron matter", 11th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics, 2012年10月4日, Univ. Barcelona.

(7) 河野通郎: " $\Lambda N$ 相互作用における $\Sigma N$ および $\Sigma^* N$ チャンネル結合の寄与", 日本物理学会, 2013年3月27日, 広島大学.

(8) 河野通郎: "核反応と有効相互作用", 日本物理学会, 2013年3月29日, 広島大学.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況（計0件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等  
なし

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

河野 通郎（コウノ ミチオ）  
研究者番号：40234710

##### (2) 研究分担者

なし

##### (3) 連携研究者

なし