

平成 28 年 10 月 25 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400266

研究課題名(和文) 3体力の定量的記述を基礎とする核子多体系の微視的理解

研究課題名(英文) Microscopic understanding of nucleon many-body systems on the basis of three-nucleon forces of chiral effective field theory

研究代表者

河野 通郎 (Kohno, Michio)

大阪大学・核物理研究センター・協同研究員

研究者番号：40234710

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000 円

研究成果の概要(和文)： 私達の世界の物質の核心を担う原子核を、核子(陽子と中性子)間の核力により形成される量子多体系として理解することを目指す半世紀以上の研究において、基本的性質である飽和性の定量的説明は未解決である。3体核力の必要性が認識されているが、3体核力が系統的に導入されるカイラル有効場理論による核力記述が近年進展し、現象論を極力排した研究が可能になった。

本研究では、3体核力の一つの核子の自由度を積分して2体化する処方を用い、無限に広がる仮相的な系で2核子相関を解くG行列計算を行った結果、飽和性の記述が改善され、同時に原子核の殻構造の発現に基本的なスピン軌道力の強さが不足である問題も解消することを示した。

研究成果の概要(英文)： Microscopic quantum many-body calculations using realistic two-nucleon interactions have not been able to quantitatively reproduce basic properties of atomic nuclei, such as saturation. Although three-nucleon forces have been supposed to be taken into account, previous studies have had to rely on phenomenological adjustment. Chiral effective field theory, which enables the systematic introduction of three-nucleon forces consistent with its two-nucleon forces, has changed the situation. In this study, I first introduce effective two-body interactions by folding one-nucleon degrees of freedom of the three-nucleon force in nuclear matter, and then investigate their effects in lowest-order Brueckner theory. The description of nuclear saturation properties is shown to be much improved, and in addition the strength of spin-orbit interaction, which is essential for explaining the nuclear shell structure, is enhanced to account for the empirical strength.

研究分野：原子核理論

キーワード： 3体核力 核物質 カイラル有効場理論 原子核の飽和性 密度依存有効2体力 スピン軌道力 テンソル力 微視的光学模型ポテンシャル

## 1. 研究開始当初の背景

2 核子間相互作用(核力)に基づいて原子核の諸性質を微視的観点から理解する研究は、近年世界的に大きな進展が見られている。核力そのものについては、カイラル有効場理論に基づいた核力記述がこれまでの核子間ポテンシャル模型に置き換わりつつある。3 体力を系統的かつ定量的に導入する道筋もはっきりとしてきた。他方、格子 QCD による核子間相互作用の研究も進んでいる。原子核のような自由度の大きな量子多体系の問題では、適切な模型空間を導入して系の諸性質を理解する方法が基本的に重要である。核子多体系では、核力の高運動量(短距離)成分の特異性を処理しなければならず問題は複雑である。模型空間内での有効相互作用をユニタリ変換によって厳密に導く理論が整備され、たとえば、低運動量空間内の有効相互作用を導く処方が従来の不定性のある処方に置き換わり定着してきた。そのような有効相互作用を用いて、少し大きい核まで第1原理的大規模精密計算がなされるようになり、逆にこれまでの2体核力の不十分さ、したがって3体核力の重要さがはっきりと議論できるようになった。もっと重い原子核の記述で用いられる現象論的な平均場模型との接点も定量的な議論が可能な段階に達している。

本研究では、このような理論的研究の進展を踏まえたうえで、まだ十分には解明されていない核子多体系における3体核力の寄与を定量的に研究する。よく知られているように、3体核力の研究は1950年代の藤田・宮沢の論文を代表とするいくつかの先駆的研究に始まる。重要な過程として考慮されるのは、中間子がアイソバーを励起する過程を含む3核子間の相互作用である。そして、藤田・宮沢の描像に基づく3体核力をパラメータ化し、その寄与を評価する研究がいろいろとなされてきた。しかし、これまでの研究には2体核力との整合性の問題があり、また最終的には現象論的な項を付け加えて調節することが避けられなかった。実際、原子核の基本的性質である飽和性を理解するという問題については、2核子散乱を記述する精密な核力を用いた理論的計算では定量的な説明できず、3体核力の効果を理由にして現象論的調節を加えた上での定性的説明で終わっていた。その状況が、3体核力の低エネルギーパラメータの多くが2体核力の段階のパラメータで決まるという意味で整合性をもつ3体力を系統的に定義できるカイラル有効場理論の発展により変化し、これまでの不定性をかなりの程度取り除いた研究が可能になった。カイラル有効場理論がQCDと等価であるという観点からすれば、原子核の基本的性質をQCDから出発して理解する道筋が得られたということもできる。

核子多体系における3体核力の役割を考

える課題は、中性子星物質における3体力の寄与の問題として研究を開始したものである。近年、太陽質量の2倍の中性子星が観測され、その存在を説明するためには通常核力のみならず斥力では不十分である。斥力をもたらし機構として、具体的にはカイラル有効場理論の3体力を用いた計算を進める中で、原子核物理全体にかかわる基本的な重要性をもつ課題であることを認識し、あらためて飽和性の機構の問題を中心に核子多体系の記述の基盤となる課題として全面的に取り組む課題を設定した。

## 2. 研究の目的

カイラル有効場理論の2体核力と3体核力を原子核の記述に適用する研究は、先端的研究として世界的に研究が進行している。一つは非常に軽い原子核で厳密計算を行うもので、これによって有効理論に存在するパラメータを最終的に決定している。重い原子核やその極限としての無限に広がった系である核物質でのこれまでの計算はしかし、文献で見るとかぎりすべてのものがBorn近似を用いた議論であり、核子間の相関が取り入れられていない計算である。核物質で一つの核子の自由度を積分して有効2体力化する処方も用いられているが、いくつかの近似が導入されている。より厳密に2体力化を行う処方に基づき、カイラル有効場理論の2体力に加えた上で核子間の相関を取り入れるG行列計算を核物質で行う研究はなされていず、本研究でその計算を具体的に実行し、3体核力の寄与と役割を明らかにする。

原子核の示す基本的に重要な全体的性質である飽和性がほぼ説明でき、中性子星物質の状態方程式についても望ましい結果が得られれば、従来の教科書にある飽和性をもたらし機構の理解が修正されることになるほどの意味を持つ。また、有効相互作用に対する3体核力の寄与のスピンおよびアイソスピン依存性、さらに各部分波に対する効果が定量的に明らかになれば、原子核物理学への波及効果は非常に大きい。原子核構造の問題だけでなく、核子散乱や反応の記述に用いられる相互作用にも影響を与える。通常安定核領域から離れた中性子過剰や陽子過剰不安定核の研究が、核子間相互作用で規定される量子多体系の存在様式を探る研究として実験的にも理論的にも精力的に行われている。本研究課題で取り上げる3体核力の特徴的な性質が、そのような境界領域の核子多体系にどのように反映するかを調べ、実験的に検証する可能性に示唆を与えることも考えられる。

あるスケール以下の自由度をくり込む有効理論では、3体相互作用が必然的に現れる。様々な分野で、従来は定性的な議論で終わっていた問題が、近年定量的な研究がなされるようになってきた。核子多体系においても2体核力では不十分な記述を、第1原理的な計

算で明らかにしようとする研究が行われている。その中で3体核力の問題は中心的な位置を占める。量子系における3体力の役割の理解は、普遍的な物理的意味を持つ。核子多体系における3体核力の役割を明らかにすることは意義が大きい。

### 3. 研究の方法

原子核の全体的性質を微視的に理解するためには、個々の原子核ではなく、表面の影響の無い無限に広がった仮想的な系として核物質を想定して、その性質を研究することが有効である。核物質中の2核子相関を記述する反応行列方程式を解くことによる核物質の多体理論計算には長い歴史があるが、原子核の示す基本的な性質である飽和性が再現できていない。通常用いられる理論である最低次G行列計算手法が信頼できることは高次相関の寄与を評価することにより確かめられていて、問題は2体核力のみでは不十分であり3核子以上の相互作用を考慮しなければならないことにあると考えてよい。

3体核力を考慮する場合、多体系の中で3体核力をそのまま扱うことは非常に難しい問題である。しばしば用いられる方法として、まず一つの核子の自由度を核媒質の中で積分して密度に依存する有効2体力に置き換えたうえで、これまでのG行列理論を適用する方法がある。3体核力は2体核力ほどには強くなく、高運動量成分の特異性も小さいため、その方法による評価に十分意味があるものと考えられる。

実際の計算に際しては、カイラル有効場理論の3体核力から得られる密度依存有効2体核力について、中心力成分、テンソル成分、スピン軌道成分の部分波展開を行って、カイラル有効場理論の純粋の2体核力に加え計算を進める。世界的には、いくつかのグループがこの手法で計算を進行しつつある。ただし、文献でみる限り、これまでの試みでは運動量空間の行列要素の対角成分のみを考え、非対角成分については外挿するという近似が導入されているし、その寄与についてはBorn近似による評価のみであり、G行列計算を行う試みは存在しない。本研究ではそのような近似を用いず、さらに核子相関を取り入れる計算を行う。

核物質の運動量空間G行列方程式を、核子の一粒子エネルギーについて自己無撞着に数値計算するプログラムは、過去の研究で作成したものを用いることができる。課題は、これまで定性的あるいは現象論的調節を導入して説明していた原子核の飽和性の記述が、カイラル有効場理論の3体核力を適用することで定量的に説明可能かどうかを具体的に示すことである。3体力の効果を定量的に理解することは、原子核の構造と反応のあらゆる現象に関わる問題である。陽子数と中性子数の異なる核物質で計算を行い、3体力の寄与の密度依存性やスピンおよびアイソ

スピン依存性の特徴、そしてどの部分波に重要な寄与があるか等を明らかにすることができる。その情報は、核構造研究と核反応研究に用いられる有効相互作用を改善する方向を示すのに役立つはずであり、波及効果は大きいと思われる。核子-核あるいは核-核散乱過程の記述への適用に関しては、九州大学の研究グループと協力して光学模型ポテンシャルを微視的に導出して3体核力の役割を明らかにする具体的な課題を設定する予定である。

カイラル有効場理論では、設定している中間子のスケールより高いエネルギーの物理は低エネルギー結合定数の中にくりこまれているが、より微視的な見方をすれば、3体力の主要部分は藤田・宮沢が考えた核媒質中でのアイソバー励起を媒介とするものである。アイソバーをストレンジネスに拡張したデカプレットバリオンを考えれば、ハイペロンと核子の相互作用の場合にも同じ程度の強さをもつ3体力が生じることが予想される。太陽質量の2倍程度の中性子星が観測され、高密度中性子星物質においてハイペロン自由度が出現するかどうか大きな問題になっているが、アイソバーと $\Lambda$ の対称性に着目して、核子の場合の知見と並行して $\Lambda$ の関与する3体力の強さを求め、高密度中性子星物質での斥力的寄与の大きさを評価することも考える。

平成25年2月に、私が世話人の一人になって京都大学基礎物理学研究所研究会「微視的有效相互作用の理論と核構造・反応研究」を開催する。研究開始当初の背景の最初で述べた原子核理論研究の進展に即して、この分野の研究者が更なる展開を目指すための議論を行う場を設定するためのものである。数年後したがって平成26年度以降に、同趣旨の研究会を再び開催することを予定しているが、3核子相互作用の寄与を微視的に考察する問題は研究会でとり上げる主要な課題の一つである。参加者との議論を通じ、研究課題とその研究方法を改善することができれば幸いである。

### 4. 研究成果

核物質の中で3体核力を有効2体力化し、部分波展開を行った結果の解析的表式をまず導出した。この結果は、過去の文献にはなく、論文[1]のAppendixに採録した。その有効2体力を通常の2体核力に加えてG行列計算を行う際には、有効2体力が3体核力起源であることを反映する統計因子を考慮しなければならず、G行列方程式の定式化は自明ではない。これは、過去の論文では見過ごされていた問題である。その統計因子の必要性の説明を加えた上で、その問題を取り扱う一つの処方案を提案し、核物質計算の結果と原子核の飽和性の記述が3体力効果によって大きく改善されることを論文[1]で報告した。また、過去の核物質計算の内容と物

理的な問題点をレビュー的にまとめた後に、3体核力の寄与の物理的内容を論文 [5] で議論した。ただし、最終年度の後半、これまで用いていた表式のテンソル成分部分に不十分なところがあり、また数値計算プログラムにバグがあることが判明した。それらを修正した結果、論文で発表した数値は訂正しなければならないが、3体核力の寄与の効果についての定性的議論の部分は変わらないことが確かめられている。

カイラル有効場理論が与える3体核力の数多くの項のうち、かなりの部分は2体核力に現れる結合定数で決まる項である。3体核力が現れる最低次の次数では、2体核力の段階では決まらない結合定数は2つだけである。ただし、その結合定数を含む項の形もカイラル対称性で規定されている。この点で、現象論的な項を導入していた従来の3体核力記述より不定性の少ない理論的枠組みになっている。この3体核力を用いた核物質計算で明らかになった点は以下のようにまとめられる。

#### (1) 核物質・中性子物質計算

存在する原子核のエネルギーと核子密度分布をもとに、無限に広がった系の核物質に外挿した飽和点（エネルギーが最少となる密度とそのエネルギーの値）は、密度  $\rho_0=0.17 \text{ fm}^{-3}$  そしてエネルギー  $E=-15 \sim -16 \text{ MeV}$  である。他方、2体核力を用いた量子多体理論による微視的計算が予測する飽和点は、用いるポテンシャル模型により異なるが、ポテンシャルの性質を反映して実験が示唆する位置から系統的にはずれている。カイラル有効場理論の2体核力のみを用いる計算結果は、これまでの結果とほとんど同じ傾向を示す。有効2体力化を行って取り入れる3体核力の効果は、密度が上がるにつれてより大きな斥力をもたらす。アイソスピンが1のスピン1重項の引力は、かなりの部分が中間状態に励起する過程によりもたらされる。この励起過程は核媒質中で制限を受け、引力は弱くなるはずであること昔から議論されてきた。を陽に扱わない理論形式では、この効果は3体力として記述されることになるが、カイラル有効場理論の枠組みでその寄与を定量的に評価したことになる。2体核力の段階では決まらない2つのパラメーターが残っていて、その値を適切に選べば、実験データに近い飽和点が得られる。この結果を出発点として、飽和点を再現する有効相互作用を得ることができ、核構造研究や核反応研究に用いる微視的密度依存有効相互作用をパラメータ化することが可能となった。

中性子星の構造を理論的に調べるには、中性子のみで構成される核物質の状態方程式すなわち中性子物質の密度とエネルギーの関係を求めることが出発点である。近年、太陽の2倍の質量をもつ中性子星が観測され、この分野の研究が活性化している。この質量

の大きい中性子星を説明するには、密度が上がるにつれて急速に斥力的になる状態方程式が望ましい。カイラル有効場理論の3体核力効果を取り入れた中性子物質計算は、3体核力の寄与が現象論的に必要とされる斥力をほぼ定量的に与えることを明らかにした。この場合、3体核力の段階で現れる未定のパラメーターを含む項は寄与せず、核子散乱データで定まる相互作用パラメータのみで予測される結果である。

#### (2) スピン軌道力

3体核力が、特徴的なスピン・アイソスピン依存性をもっている結果の一つとして、スピン軌道力の強さがおよそ30%ほど大きくなることが明らかになった。原子核は、短距離部に強い斥力をもつ核力で相互作用しているにもかかわらず、一核子の独立粒子描像あるいは平均場描像が成り立ち、殻構造を示すが、その一粒子準位を再現するには強いスピン軌道力が必要である。これが原子核の平均場の大きな特徴である。しかし、核力に基づく微視的計算ではその比較的大きい値が説明されてこなかった。今回の核物質計算により、カイラル有効場理論の3体核力がもたらすスピン軌道力とその不足を補うことが明らかになった。

この結果は、平均場模型で原子核を記述する研究に示唆を与え、他の研究者によって密度依存性をもつ新しいスピン軌道力のパラメーター化を促し、従来のものでは説明できなかった有限核の半径のアイソトープ変化の問題が解決されることを示す研究につながった。

#### (3) 光学模型ポテンシャル

核子-核散乱や核-核散乱を記述する光学模型ポテンシャルを微視的に導出する課題は原子核理論研究の基本的課題の一つである。QCDの対称性とその破れの機構に基礎を置くカイラル有効場理論の核力を用い、3体核力の寄与を取り入れて飽和性を再現する枠組みで光学模型ポテンシャルを求め、核子-核および核-核散乱に適用する研究を、九州大学核理論グループと行った。核物質計算で求めたG行列を、散乱計算に使いやすいようにガウス型関数でパラメータ化し、散乱断面積を具体的に計算して実験データと比較する。3体核力は、光学模型ポテンシャルの実部に斥力的寄与を与え、一方テンソル成分が大きくなることを通じて虚部の強さを大きくする効果をもたらす。核子の弾性散乱では、散乱は核表面からの寄与が大きく、密度がそれほど高くないため3体核力の効果はあまり大きくないが、現象論的な調節を加えることなく200 MeVの入射エネルギーまで実験データをよく再現する結果が得られた。また、核-核反応ではより密度の高い領域の寄与が関わり、3体核力の寄与が望ましい結果を与えることを示した。この結果は、過去の

文献で報告されている、従来の2体核力のみを用いた微視的光学模型ポテンシャルが成功していることの基礎付けを与えるとともに、他方では3体核力の寄与が実験データの再現を改善する結果をもたらすことを具体的に明らかにした成果である。これらの結果は、論文 [2] [3] [4] [6] で報告した。

#### (4) 核構造研究への波及効果

3体核力の寄与は、スピン軌道力の他にテンソル力成分にも重要な効果をもたらす。テンソル力はパイオン交換が与える特徴的な成分であるが、平均場近似のもとでは通常は見えない成分であり、非常に重要な役割を果たしているはずであるが、よくわかっていない成分である。3体核力を有効2体力化した成分のテンソル成分を見ると、その強さが15%ほど大きくなっていて、その効果を実験データとの対応で検証できるなら興味深い。殻模型計算をおこなっているグループの計算では、そのような寄与が望ましい方向の効果をもたらすようである。今後の研究の展開が興味深い。

#### 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6件)

[1] M. Kohno, "Nuclear and neutron matter G matrix calculations with a chiral effective field theory potential including effects of three-nucleon interactions", *Physical Review C* 88, 064005:1-14 (2013).

[2] K. Minomo, M. Toyokawa, M. Kohno, and M. Yahiro, "Effects of a chiral three-nucleon force on nucleus-nucleus scattering", *Physical Review C* 90, 051601(R):1-5 (2014).

[3] M. Toyokawa, K. Minomo, M. Kohno, and M. Yahiro, "Roles of chiral three-nucleon forces in nucleon-nucleus scattering", *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics* 42, 025104:1-15 (2015).

[4] M. Toyokawa<sup>1</sup>, M. Yahiro, T. Matsumoto, K. Minomo, K. Ogata, and M. Kohno, "Microscopic calculations based on chiral two- and three-nucleon forces for proton- and <sup>4</sup>He-nucleus scattering", *Physical Review C* 92, 024618:1-6 (2015).

[5] M. Kohno, "Nuclear saturation in lowest-order Brueckner theory with two- and three-nucleon forces in view of chiral

effective field theory", *Progress of Theoretical and Experimental Physics* 123, D02:1-16 (2015).

[6] K. Minomo, M. Kohno, and K. Ogata, "Microscopic coupled-channels calculations of nucleus-nucleus scattering including chiral three-nucleon force effects", *Physical Review C* 93, 014607:1-6 (2016).

〔学会発表〕(計14件)

[1] 河野通郎, 豊川将一, 蓑茂工将, 八尋正信: "カイラル有効場理論の3体力効果と散乱問題", 日本物理学会, 2013年9月21日, 高知大学

[2] 河野通郎: "飽和曲線のカットオフスケール不変性をもたらす3体力とテンソル力の役割", 日本物理学会, 2014年3月28日, 東海大学湘南キャンパス

[3] M. Kohno: "BHF and UMOA calculations with 2N and 3N forces in chiral effective field theory", KITPC workshop "Present Status of the Nuclear Interaction Theory", 2014年9月16日, Kavli Institute for Theoretical Physics China, Beijing, China

[4] M. Toyokawa, K. Minomo, M. Kohno, and M. Yahiro: "Effects of chiral three-nucleon forces on elastic scattering", 4th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, 2014年10月8日, Waikoloa, Hawaii, USA

[5] K. Minomo, M. Toyokawa, M. Kohno, M. Yahiro, and Ogata: "Probing the chiral three-nucleon force effects on many-body nuclear reactions", 4th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, 2014年10月9日, Waikoloa, Hawaii, USA

[6] 豊川将一, 八尋正信, 松本琢磨, 蓑茂工将, 緒方一介, 河野通郎: "カイラル有効場理論とBrueckner-Hartree-Fock理論を用いた核反応の解析", 日本物理学会, 2015年3月23日, 早稲田大学

[7] 蓑茂工将, 緒方一介, 吉田数貴, 河野通郎: "ノックアウト反応で観測するカイラル有効理論3核子力の効果", 日本物理学会, 2015年3月23日, 早稲田大学

[8] 河野通郎, 岡本良治: "カイラル有効理論3体力効果を入れた160のユニタリ模型演算法(UMOA)計算", 日本物理学会, 2015

年 3 月 23 日，早稲田大学

[9] 吉田聡太，角田直文，阿部喬，大塚孝次治，鈴木俊夫，河野通郎：“カイラル有効場の理論から得られる有効相互作用の基本的性質”，日本物理学会，2015 年 9 月 21 日，大阪市立大学

[10] 吉田聡太，角田直文，阿部喬，大塚孝次治，鈴木俊夫，河野通郎：“カイラル有効場の理論から得られる有効相互作用の基本的性質”，日本物理学会，2015 年 9 月 21 日，大阪市立大学

[11] 豊川将一，八尋正信，松本琢磨，蓑茂工将，緒方一介，河野通郎：“カイラル有効理論に基づく核力による微視的反応解析と 3 体力効果”，日本物理学会，2015 年 9 月 27 日，大阪市立大学

[12] 吉田聡太，角田直文，阿部喬，大塚孝次治，河野通郎，鈴木俊夫：“殻模型相互作用における有効 2 体化 3 体力の効果”，日本物理学会，2016 年 3 月 19 日，東北学院大学泉キャンパス

[13] 蓑茂工将，河野通郎，吉田数貴，豊川将一，緒方一介：“陽子ノックアウト反応の微視的記述と 3 体力効果”，日本物理学会，2016 年 3 月 21 日，東北学院大学泉キャンパス

[14] 豊川将一，八尋正信，松本琢磨，蓑茂工将，緒方一介，河野通郎：“ $^3\text{He}$ ， $^4\text{H}$ -原子核弾性散乱の微視的記述”，日本物理学会，2016 年 3 月 21 日，東北学院大学泉キャンパス

〔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 (KOHNO Michio)  
大阪大学・核物理研究センター・協同研究員  
研究者番号：40234710

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし