

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 27 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400278

研究課題名(和文)カイラル有効理論に基づく微視的多体理論の構築と3体力効果

研究課題名(英文) Construction of microscopic reaction theory based on chiral g-matrix and effects of three-nucleon force

研究代表者

八尋 正信 (Yahiro, Masanobu)

九州大学・理学研究院・教授

研究者番号：40300537

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：核子弾性散乱と $3,4\text{He}$ 弾性散乱を調整パラメータなしに記述する反応モデルを考案した。Brueckner Hartree-Fock理論を用いて、カイラル有効理論に基づく核力(2体力+3体力)から、核内有効核力を導出し、この反応モデルを用いて、3核子力効果が核子弾性散乱より $3,4\text{He}$ 弾性散乱に顕著であることを示した。最近実験されたMg同位体の反応断面積を理論解析し、 ^{37}Mg が変形ハロー核であることを示した。ハロー核のハロー性を定量化する量 H を考案した。2倍の太陽質量をもつ中性子星中でクォーク相が実現するためのクォーク間相互作用の強さの上限値を決定した。

研究成果の概要(英文)：We constructed a reliable microscopic reaction model for describing nucleon and $3,4\text{He}$ elastic scattering simultaneously. The model is “double folding (DF) model with target-density approximation”. The chiral G matrix was constructed from chiral two-nucleon and three-nucleon forces by using Brueckner Hartree-Fock theory. The DF model with the chiral G matrix as an effective nucleon-nucleon force well describes nucleon and $3,4\text{He}$ elastic scattering. The effects of chiral three-nucleon force are large for $3,4\text{He}$ elastic scattering but small for nucleon scattering. Radii of Mg isotopes were determined from measured reaction cross section by using the DF model. ^{37}Mg was found to be a deformed halo nucleus. We proposed a measurable parameter quantifying the halo nature of one-neutron halo nuclei. We determined the upper limit of the strength of the vector-type four-quark interaction for the quark phase to emerge in the inner core of two solar-mass neutron stars.

研究分野：原子核理論

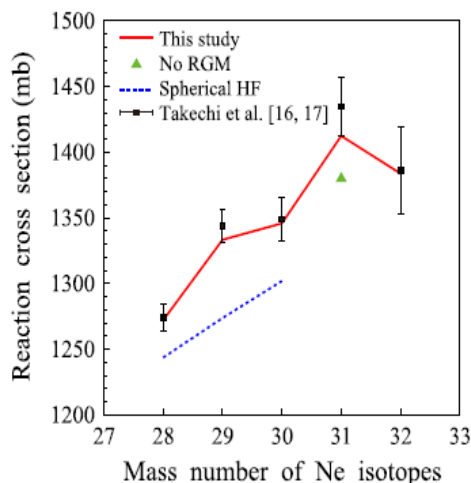
キーワード：三核子力 カイラル有効場理論 微視的反応理論 ハロー核 中性子星

1. 研究開始当初の背景

原子核反応は、物質の特性を決定する重要な手法である。最近、核力研究に飛躍的發展がなされた。一つは、カイラル有効理論 (chiral Effective Field Theory: Ch-EFT) によって、2 体核力、3 体核力が系統的に決定されたことである[1]。この理論は cut-off より低いエネルギーで少数系の物理量を完璧に再現するため、多体系においても実用性の高い理論と言える。もう一つは、格子 QCD によって核力が導出されたことである[2]。しかし、後者はまだ定性的議論の段階にある。このような Ch-EFT の発展にも関わらず、未だ、Ch-EFT に基づく微視的反應理論は構築されていなかった。

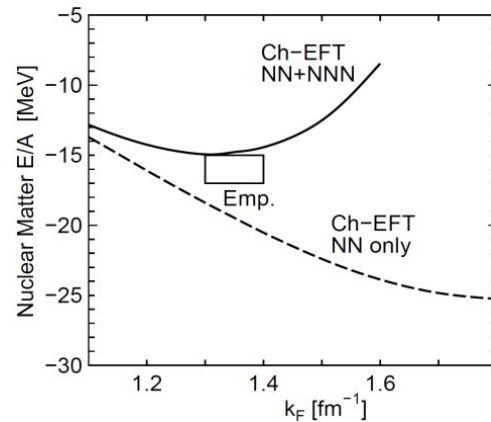
九大核理論グループは、世界中の核反応研究者と協力して、入射粒子分解反応を正確に取り扱う理論として離散化チャネル結合法 (continuum discretized coupled-channels method: CDCC 法) を提唱し、発展させてきた[3]。最近、この CDCC 法は包括的反應 (放出核の一部のみを測定する反應) に拡張されて、グラウバー模型を上回る精度をもつ微視的反應理論となった[3]。この CDCC 法では、Brueckner Hartree-Fock (BHF) 理論を用いて 2 体核力から核内有効核力を導出し、チャネル結合法を用いて入射核と標的核の間の相対運動を求め、この時、入射核や標的核の基底状態や励起状態は、平均場理論として定評のある全反対称分子軌道法 (antisymmetrized molecular dynamics: AMD) や deformed Hartree-Fock 法 (DHF) を用いて微視的に求められる。本理論は反應と構造を統一的に記述する微視的理論となっている。

本理論の代表的成果に、Ne 同位体散乱の反應断面積の解析がある[4]。下図で、理論値 (実線) は Ne の変形度が考慮された AMD 計算の結果で、調整パラメータ無しに実験値を再現している。一方、破線は変形度ゼロの理論計算の結果で、^{31,32}Ne は束縛状態を作らない。このことから、変形によってドリッパラインが ³⁰Ne から ³²Ne へと移動することが分かる。この解析から、³¹Ne は非常に大きな反応



断面積 (半径) をもつ、変形ハロー核 (変形した芯核の外で中性子がハロー構造を持つ核) と結論された。

上記理論解析では、核構造計算と核反応計算とで異なる核内有効核力が使われている。また、3 核子力の寄与が不明であるという問題があった。そこで、BHF 理論を用いて、Ch-EFT による核力 (2 核子力+3 核子力) から核内有効核力 (密度依存 2 核子力) を、散乱系と束縛系に対して同等に求めることを着手した。下図のように、対称核物質における核子の束縛エネルギーの密度依存性に対する empirical value を、2 核子力のみ計算 (破線) は再現せず、標準核密度 ($k_F = 1.35 \text{ fm}^{-1}$) で最小値を持たない。この有名な問題は、3 核子力を入れた計算 (実線) によって見事に解決されている[5]。このように、3 核子力効果は核物質で重用であり、核内有効核力の有効性が示された。



参考文献:

[1] E. Epelbaum et al., Nucl. Phys. A747, 362(2005).
 [2] Ishii, Aoki and Hatsuda, Phys. Rev. Lett. 99, 022001 (2007).
 [3] Yahiro, Ogata, Matsumoto and Minomo, PTEP 2012, 01A206 (2012).
 [4] K. Minomo et al., Phys. Rev. Lett. 108 (2012), 052503.
 [5] M. Kohno, Phys. Rev. C86, 061301 (2012).

2. 研究の目的

- (1) Brueckner Hartree-Fock 理論を用いて、カイラル有効理論に基づく核力 (2 核子力 + 3 核子力) から、核内有効核力 (密度依存 2 核子力) を導出する。次に、この数値的に求められた有効核力の on-shell, half-off-shell を、3 つのガウス関数で表記し、「実用的有効核力」を作成する。この実用的有効核力を九大グループによって開発されてきた多体理論に適用し、核物質、核構造、核反応を統一的に記述する微視的多体理論を構築する。そして、核構造、核反応、中性星内における 3 核子力の役割を解明する。
- (2) ハロー核やその候補核の反應に本理論

を適用し、実験解析を通して実証的に、ドリップライン近傍でハロー核の特性を解明し、大変形ハロー核の条件を明確にする。
 (3) 上記理論を用いて中性子物質の状態方程式を導出し、2 倍の太陽質量をもつ中性子星観測や中性子星冷却観測と矛盾しないかを検証し、2 倍の標準核密度以下の状態方程式を確定する。

3. 研究の方法

以下の研究成果で述べるように、理論や模型の構築とそれによる数値計算を組み合わせ、研究を遂行した。

4. 研究成果

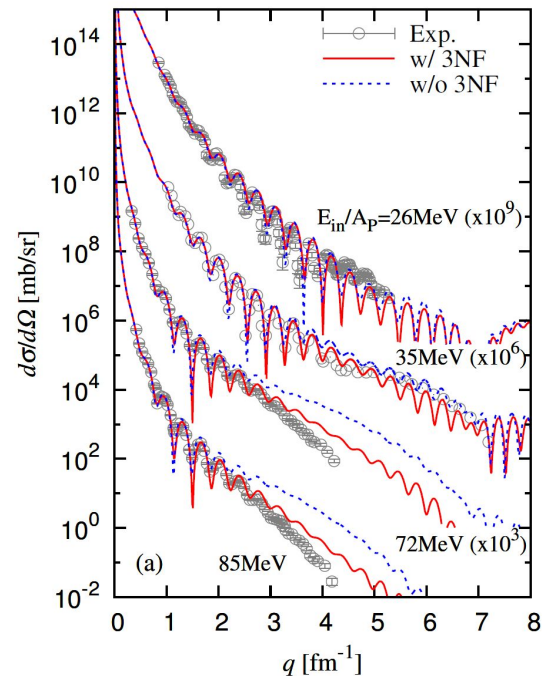
(1) 課題(1)に関して

核反応におけるカイラル3核子力の効果は、弾性散乱で最も曖昧さなしに分析できる。このため、核子弾性散乱、 $^3,^4\text{He}$ 弾性散乱に着目した。これらの弾性散乱に対する、これまでの微視的反応模型「double folding model + 実用的有効核力」には、調整パラメータが含まれていることが分かった。このため、調整パラメータが含まない微視的反応「double folding model + 実用的有効核力」の構築を目指し、これに成功した。ここで、double folding model は CDCC 法で弾性チャンネルだけを考慮した模型である。また、実用的有効核力は核子弾性散乱を調整パラメータ無しに再現するメルボルン有効核力を用いた。 $^3,^4\text{He}$ 弾性散乱に対する、これまでの「double folding model + 実用的有効核力」では、実用的有効核力の密度として、入射核と標的核の密度の和が取られていた。有効核力の密度依存性は、非弾性励起からくるもので、自然な仮定と考えられていた。しかしながら、CDCC 法で入射核の非弾性励起を調べると、非常に小さく、実用的有効核力の密度として、標的核の密度をとるべきであるという結論を得た。実際、この方法「double folding model + target density approximation」は、実験値を良く再現することを示した。

カイラル3核子力の効果が、核子弾性散乱や $^3,^4\text{He}$ 弾性散乱にどのように現れるかを定性的に見積もるために、メルボルン有効核力がカイラル2核子力から得られる有効核力と酷似していることを勘案して、メルボルン有効核力にカイラル3核子力の効果を近似的に取り入れた。この「修正されたメルボルン有効核力」と「double folding model + target density approximation」を用いて、3核子力の効果が、核子弾性散乱より $^3,^4\text{He}$ 弾性散乱に顕著であることを見つけた。

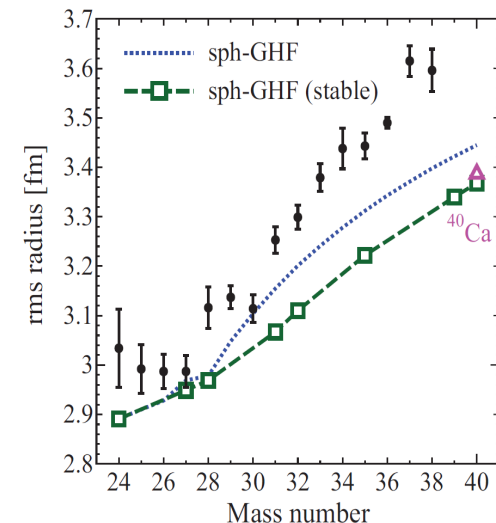
上記2課題と並行して、「カイラル2核子力+カイラル3核子力」から、核物質中の有効核力(密度依存2核子力)を散乱系において導出した。また、この数値的に求められた有効核力の on-shell, half-off-shell を、3つのガウス関数で表記し、「実用的カイラル有効核力」を作成した。「実用的カイラル有

効核力」と「double folding model + target density approximation」を用いて、3核子力効果が核子弾性散乱より $^3,^4\text{He}$ 弾性散乱に顕著であることを定量的にも、確認した。また、この3核子力のお蔭で、上記微視的計算が $^3,^4\text{He}$ 弾性散乱の実験値を良く再現することを確認した。核子弾性散乱では、入射エネルギー E が100MeVを超えると、3核子力効果が見えてきて、実験値からずれる傾向にある。これは、3核子力生み出す「スピン・角運動力」が強すぎるためである。4核子力等の高次効果の検討が興味深い。 $^4\text{He}+^{208}\text{Pb}$ の結果を下図に示しておく。ここで、横軸 q は移行運動量である。



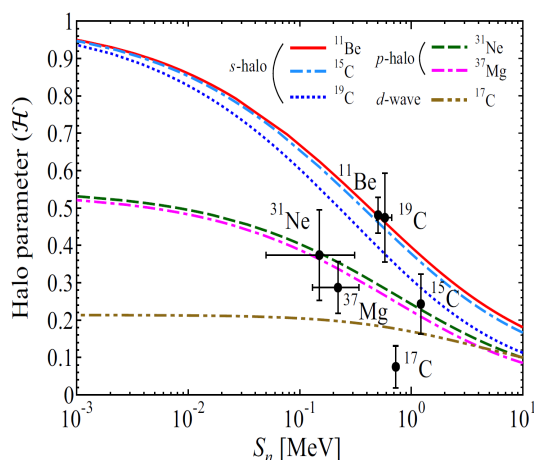
(2) 課題(2)に関して

メルボルン有効核力がカイラル2核子力から得られる有効核力と酷似していること、この反応断面積に対するカイラル3核子力の効果が小さいこと、に留意して、最近実験された Mg 同位体の反応断面積から、「double folding model + メルボルン有効核力を用い



て、Mg 同位体の半径を系統的に決定した。上図において、エラーバー付きの黒点が、実験から導出された Mg 同位体の半径である。点線は球形を仮定した平均場計算の結果で、実験と点線の差は核変形による。この図から、特に、 ^{37}Mg が変形ハロー核であることが分かる。

ハロー核のハロー性を定量化する量 H を考案した。この量は、ハロー核、芯核、核子の散乱の反応断面積で定義されており、実験量のみで算出できる。下図で、横軸はハロー核中の中性子の分離エネルギー S_n である。 H が 1 に近いほどハロー性が高く、 ^{11}Be が最もハロー性が高いことを表している。中性子が S 波状態にいる S 波ハロー核のみが、 $S_n=0$ の極限で $H=1$ に達することを理論的に示した。各理論線を参照のこと。また、この極限で S 波ハロー核がスケール普遍性を示すことを証明した。



(3) 課題(3)に関して

Ch-EFT では、cut-off は メソンより低い、500MeV 程度にとられる。このため、Ch-EFT の状態方程式は標準核密度 ρ_0 の 2 倍程度まで信頼できる。そこで、Brueckner Hartree-Fock 理論を用いて、「カイラル 2 核子力 + カイラル 3 核子力」から、核内有効核力を導出し、状態方程式を $2\rho_0$ まで導出した。そして、この状態方程式が現象論的に決められた相対論的平均場理論の状態方程式と酷似していることを確認した。さらに研究を一步進め、相対論的平均場理論によるハドロン相とクォーク模型によるクォーク相の 2 相模型を考え、2 倍の太陽質量をもつ中性子星中でクォーク相が実現する条件を考察した。クォーク相の状態方程式の硬さは、ベクター型クォーク間相互作用の強さ G_V に敏感である。このことを利用して、2 倍の太陽質量をもつ中性子星中でクォーク相が実現するための G_V の上限値を決定した。

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 11 件)

[1] Junpei Sugano, Hiroaki Kouno, and Masanobu Yahiro,

Determination of hadron-quark phase transition line from lattice QCD and two-solar-mass neutron star observations, Phys.Rev. D, 94, (2016) 014024.

[2] Takehiro Hirakida, Junichi Takahashi, Hiroaki Kouno and Masanbu Yahiro,

Interplay between sign problem and Z3 symmetry in three-dimensional Potts models, Phys.Rev. D, 94, (2016) 014011.

[3] K. Harada, S. Sasabe, and M. Yahiro,

Numerical study of renormalization group flows of nuclear effective field theory, Physical Review C 94, (2016) 24004.

[4] M. Ishii, K. Yonemura, J. Takahashi, H. Kouno, and M. Yahiro,

Determination of U(1) A restoration from pion and a 0 -meson screening masses: Toward the chiral regime: Physical Review D 93, (2016) 016002.

[5] M. Toyokawa, M. Yahiro, T. Matsumoto,

K. Minomo, K. Ogata, and M. Kohno, Microscopic calculations based on chiral two- and three-nucleon forces for proton- and 4He scattering: Physical Review C 92 (2015) 024518.

[6] M. Toyokawa, T. Matsumoto, K. Minomo, and M. Yahiro,

Microscopic approach to 3He scattering: Physical Review C 91 (2015) 064610.

[7] S. Watanabe, T. Matsumoto, K. Ogata, and M. Yahiro,

Four-body dynamics in 6Li elastic scattering: Physical Review C 92 (2015) 044611.

[8] M. Toyokawa, K. Minomo, M. Kohno, and M. Yahiro,

Roles of chiral three-nucleon forces in nucleon-nucleus scattering: Journal of Physics G 42 (2015) 025104.

[9] K. Minomo, M. Toyokawa, M. Kohno, and M. Yahiro,

Effects of a chiral three-nucleon force on nucleus-nucleus scattering: Physical Review C 90 (2014) 051601(R).

[10] K. Minomo, T. Matsumoto, K. Egashira, K. Ogata and M. Yahiro,

Eikonal reaction theory for two-neutron removal reactions: Physical Review C 90 (2014) 027601.

[11] K. Egashira, K. Minomo, M. Toyokawa, T. Matsumoto, and M. Yahiro, Microscopic optical potentials for 4He scattering: Physical Review C 89 (2014) 064611.

〔学会発表〕(計7件)

[1] T. Matsumoto, S. Watanabe, and M. Yahiro, Study of Halo Nature via Reaction and Neutron Removal Cross Sections, The 26th International Nuclear Physics Conference (INPC 2016), 2016.9.11-16, Australia Adelaide.

[2] T. Matsumoto, S. Watanabe, and M. Yahiro, Study of one- and two-neutron removal reactions with core + n + n model, Direct reactions with exotic beams 2016, 2016.7.11-7.15, Canada Halifax.

[3] M. Ishii, J. Takahashi, H. Kouno, and M. Yahiro, Determination of $U A(1)$ restoration from meson screening masses by using the entanglement PNJL model: Toward chiral regime: The 33rd International symposium on lattice field theory 2015.7.18, Kobe, Japan.

[4] M. Toyokawa, M. Yahiro, T. Matsumoto, K. Minomo, K. Ogata, and M. Kohno, Microscopic approach to nucleon-nucleus and nucleus-nucleus scattering in the frame-work of Chiral effective field theory and Brueckner-Hartree-Fock theory: 14th international conference on nuclear reaction mechanisms, 2015.6.16, Varenna, Italy.

[5] M. Toyokawa, K. Minomo, M. Kohno, M. Yahiro, Effect of chiral three nucleon forces on elastic scattering: Forth Joint Meeting of the Nuclear Physics Division of the American Physical Society and the Physical Society of

Japan, 2014.10.8, Hilton Waikoloa Village, Hawaii island..

[6] M. Ishii, T. Sasaki, K. Kashiwa, H. Kouno, and M. Yahiro, Temperature dependence of meson screening masses; a comparison of effective model with lattice QCD: The 32nd International symposium on lattice field theory, 2014.6.23, New York, USA.

[7] J. Takahashi, J. Sugano, M. Ishii, H. Kouno, and M. Yahiro, Quark number densities at imaginary chemical potential and its extrapolation to large real chemical potential by the effective model: The 32nd International symposium on lattice field theory, 2014.6.23, New York, USA.

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

八尋正信 (Yahiro Masanobu)
九州大学・大学院理学研究院・教授
研究者番号：40300537

(2) 研究分担者

なし