

令和元年6月17日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05087

研究課題名(和文) 複素G行列有効核力に基づく微視的核反応研究の新展開

研究課題名(英文) Progress of microscopic nuclear reaction theory based on the G-matrix effective nuclear interactions

研究代表者

櫻木 弘之 (Sakuragi, Hiroyuki)

大阪市立大学・総務課・副学長

研究者番号：90183821

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、先行研究で構築し大きな成功を収めた、三体・四体力効果を含む「複素G行列有効核力」に基づく微視的光学ポテンシャル模型を、非弾性散乱や分解反応過程を含む広範な核反応にも適用できるよう拡張した「微視的核反応理論」の定式化を行うと共に、実用化に向けた計算コード開発を行った。更に、種々の実験データとの比較によりその有効性・実用性の検証を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子多体系である原子核の構造や反応を、原子核の基本構成要素である核子間に作用する基本相互作用(核力)に基づいて微視的に理解し説明することは、原子核物理学の究極の学術的問いであり、目標である。これまで、原子核反応を核力から出発して曖昧さなく記述することは極めて困難とされてきたが、過去10年間にわたる先行研究で、弾性散乱と言われるエネルギーや核種の転換を伴わない単純な反応についてのみ、核力から出発して微視的に理解する手法が確立されてきたが、一般の原子核反応過程については未解明であった。今回の研究では、これを弾性散乱以外の複雑な一般の核反応にも適用できるよう拡張した理論を構築し有効性を検証した。

研究成果の概要(英文)：We have established a new microscopic nuclear reaction theory based on the complex G-matrix NN interaction with the effects of three-body and four-body forces, that is natural extension of the microscopic optical model with the same complex G-matrix successful for the description of wide range of elastic scattering of nucleon-nucleus and nucleus-nucleus systems. We have tested its validity in the description of nuclear reactions including inelastic scattering and breakup processes in the coupled-channel/CDCC framework.

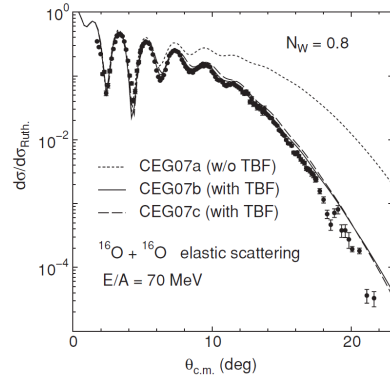
研究分野：原子核理論

キーワード：微視的核反応理論 複素G行列有効核力 三体核力 チャネル結合法 不安定核 高密度核媒質 中性子星

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

従来、原子核反応研究の多くは現象論的光学ポテンシャルを用いた反応解析が主流で、そのために実験結果の解釈に多くの不定性が避けられなかった。光学ポテンシャルの実部については有効核力に基づく微視的モデルが一定の成功を収めていたが、依然として虚部には現象論が用いられ、この事が核反応分析結果の解釈の大きな障害の一つとなっていた。代表者(櫻木)及び連携研究者(古本、山本)は、一連の先行研究を通じて、現実的な複素G行列有効核力に基づき、光学ポテンシャルの実部・虚部ともに微視的に導出する微視的相互作用モデルを構築し、中高エネルギー領域( $E/A=30\sim 400$  MeV)で現存する全ての重イオン弾性散乱データを不定性なく再現することに成功した。特に、中性子星等の高密度核媒質の性質を再現する上で重要な役割を担う三体・四体核力が、原子核散乱においても極めて重要な役割を果たすことを世界で初めて明らかにし(右図) 中性子中の高密度核媒質の性質を、地上での原子核散乱で検証できることを明らかにした。



2. 研究の目的

本研究では、先行研究で開発された、中性子星核物質の状態方程式(EOS) の解析を踏まえて構成された「新しいバリオン間相互作用モデル」に基づく三体・四体核力を含む新たな「複素G行列有効核力」を用いた「微視的核反応理論の構築と展開」である。特に、二体核力に加え、太陽質量の2倍という中性子星の最大質量を支えるために不可欠な「多バリオン間斥力」のモデルとして導入された、「Multi-Pomeron exchange Potential (MPP)」を含む有効相互作用が、地上での重イオン散乱現象に見られる「高密度領域の効果」の説明にも有効であることを検証するとともに、不安定核も含む広範な核構造・核反応研究へ適用できる「新時代の微視的核反応理論」を確立し、本格的展開・実用化に道筋をつけることを目指すものである。

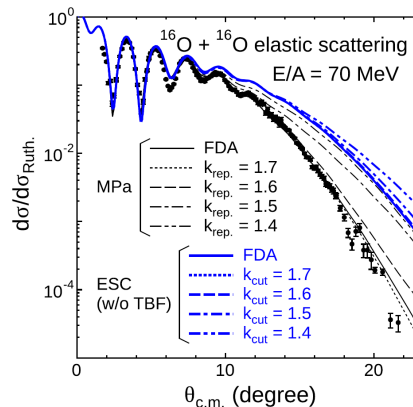
3. 研究の方法

三体・四体核力の効果を含む「複素G行列有効核力」に基づく微視的複素光学ポテンシャルモデルを拡張し、弾性散乱以外の広範な核反応(非弾性散乱、分解反応過程等)への適用するため、複素G行列有効核力を微視的チャンネル結合法の枠組みに拡張した「新時代の微視的核反応理論」を構築する。これらを広範なエネルギー領域において、実験データが存在する弾性散乱・非弾性散乱の微分断面積を系統的に分析し、理論の有効性を検証する。更に、入射粒子分解反応過程へも適用できるよう、複素G行列有効核力を用いた微視的CDCC法(連続チャンネル離散化チャンネル結合法)を構築しコード開発を行う。これを ${}^6\text{Li}$ と原子核との反応系へ適用し、 ${}^6\text{Li}$ 弾性散乱における ${}^6\text{Li} + d$ 分解過程の効果を微視的CDCC法により研究する。

4. 研究成果

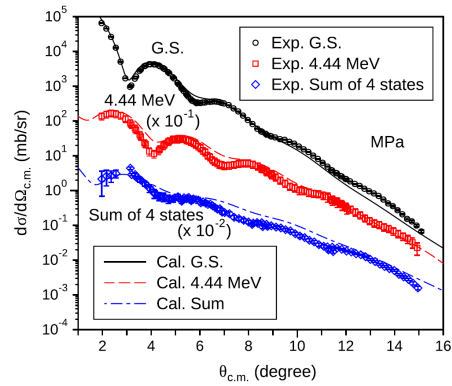
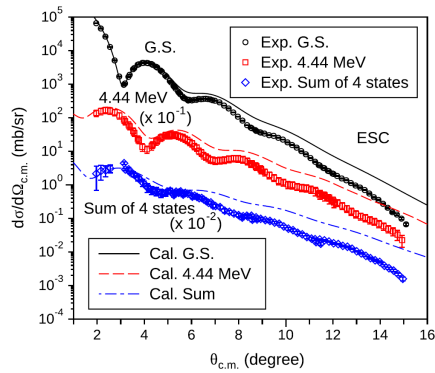
(1) 核・核弾性散乱における高密度領域での媒質効果の系統的検証(論文)

先行研究において、原子核同士の弾性散乱過程で原子核同士が短距離で重なり局所密度が平衡密度を大きく超える領域での核媒質効果(特に斥力的三体力効果)の重要性は明らかになったが、媒質効果が実際に観測量(微分断面積)で発現する局所密度依存性の領域について、 ${}^{12}\text{C}+{}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{16}\text{O}+{}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{16}\text{O}+{}^{28}\text{Si}$ ,  ${}^{16}\text{O}+{}^{140}\text{Ca}$ ,  ${}^{16}\text{O}+{}^{190}\text{Zr}$ ,  ${}^{16}\text{O}+{}^{1208}\text{Pb}$ 系の弾性散乱( $E/A=70\sim 200$  MeV)について系統的に分析した。その結果、Fermi運動量  $k_F=1.6\text{ fm}^{-1}$  に相当する密度以上の高密度領域で三体核力の効果が散乱断面積上で顕在化することが判明し、弾性散乱断面積で検出可能な高密度核媒質の密度領域が特定された。



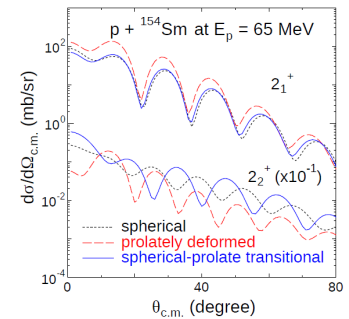
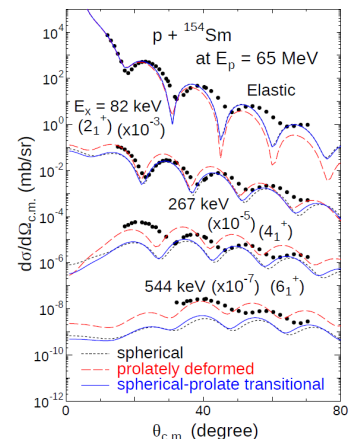
(2)  ${}^{12}\text{C}+{}^{12}\text{C}$  非弾性散乱における三体核力効果と異なる複素G行列モデルの比較(論文)

阪大核物理研究センターにおいて行われた、 $E/A=100$  MeV での  ${}^{12}\text{C}+{}^{12}\text{C}$  系の弾性散乱および低励起状態への非弾性散乱の微分断面積を、核媒質効果(密度依存性)の異なる3種類の複素G行列相互作用(ESC, CEG07, MPa)を用い、微視的チャンネル結合法により分析した。その結果、非弾性散乱においても、弾性散乱同様に三体核力の効果が顕著に観測され、有効核力による三体・四体核力の違いも検証可能であることが明らかになった。これは、複素G行列有効核力に基づく微視的核反応理論が、非弾性散乱へも有効であることと同時に、非弾性散乱も高密度核媒質の状態方程式を検証するプローブとして有効であることを示す結果である。



( 3 ) 大振幅集団運動に対する微視的遷移密度を用いた陽子非弾性散乱の分析

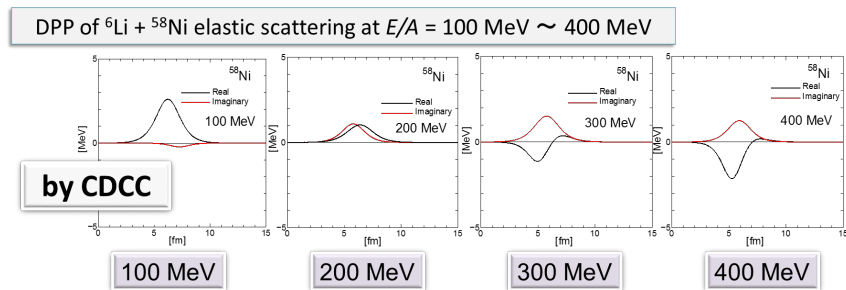
研究協力者(佐藤、菊地、緒方)および連携研究者(古本)との共同で、中重核において、球形、大振幅 prolate 変形、および球形-prolate 形状混合という、3種の異なる核変形に伴う集団励起の遷移密度を微視的に導出する手法の定式化と計算コードの開発を行った。この変形の違いが核反応実験観測量にどのように表れるかを、微視的チャンネル結合法により検証した。具体的には、典型的変形核である  $^{154}\text{Sm}$  原子核について、上記3種の変形による集団励起の遷移密度を導出し、陽子と  $^{154}\text{Sm}$  との弾性散乱・非弾性散乱の微分断面積に変形の違いがどう現われるかを分析した。その結果、second  $2^+$  励起状態について、遷移密度および微分断面積に実験で観測可能な有為の差が表れる事を確認した(下記投稿中の論文[1])。更に、佐藤らが構築した最新の微視的集団運動モデルである「拘束条件付き HFB+局所準粒子 RPA(CHFB+LQRPA)」に基づき、遷移密度を微視的に導出する為の定式化を行った。



[1] K. Sato, T. Furumoto, Y. Kikuchi, K. Ogata, Y. Sakuragi, Large-amplitude quadrupole shape mixing probed by the (p,p) reaction: a model analysis, submitted to Prog. Theor. Exp. Physics, Apr. 2019 (<https://arxiv.org/abs/1904.07398>)

( 4 ) 高エネルギー  $^6\text{Li}$  弾性散乱における分解効果のエネルギー依存性

複素G行列有効核力に基づく微視的チャンネル結合法を、分解反応過程へ拡張した微視的 CDCC 法を定式化し計算コードを開発した。これを  $^6\text{Li} + d$  分解過程を経由する  $^6\text{Li}$ -原子核弾性散乱に適用し、分解過程が誘起する動的分極ポテンシャル(Dynamical Polarization Potential: DPP:  $V+iW$ )とそのエネルギー依存性について分析を行った。核子当りの入射エネルギー ( $E/A$ )が 100 MeV ~ 400 MeV 領域で、複素G行列有効核力自体が急激なエネルギー依存性を持つことを反映し、分解反応を誘起する結合ポテンシャルの実部・虚部も入射エネルギー依存性を有すること、その結果、分解過程に起因する DPP の実部 ( $V$ )・虚部 ( $W$ )も入射エネルギーにより大きく変化することを示した。これは、従来「分解過程の効果は斥力的である」という「常識」は低エネルギー領域に限られ、高エネルギー領域では分解過程の効果は斥力から引力へ転移することが明らかとなった。



(学会発表 および修士論文[1])

[1] 金子祥太郎、修士論文(2015年)、大阪市立大学理学研究科

## 5 . 主な発表論文等

### [雑誌論文](計5件)

W. W. Qu, G. L. Zhang, S. Terashima, T. Furumoto, Y. Ayyad, Z. Q. Chen, C. L. Guo, A. Inoue, X. Y. Le, H. J. Ong, D. Y. Pang, H. Sakaguchi, Y. Sakuragi, B. H. Sun, A. Tamii, I. Tanihata, T. F. Wang, R. Wada, and Y. Yamamoto,  
Repulsive three-body force and channel-coupling effects via  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$  scattering at 100A MeV, Physical Review C, Vol.95, 044616-1-14, 2017, (査読有)  
DOI: 10.1103/physrevc.95.044616

T. Furumoto, Y. Sakuragi, Y. Yamamoto,  
Medium effect in high-density nuclear matter probed by a systematic analysis of nucleus-nucleus elastic scattering,  
Physical Review C, Vol.94, 044620-1-10, 2016, (査読有)  
DOI: 10.1103/physrevc.94.044620

T. Furumoto, Y. Sakuragi, Y. Yamamoto,  
Approach to high-density nuclear matter via nucleus-nucleus elastic scattering  
ACTA PHYSICA POLONICA B, Vol.47, 853-858, 2016, (査読有)  
<http://www.actaphys.uj.edu.pl/vol35/abs/v35p2895>

Y. Sakuragi,  
Saturation of nuclear matter and many-body forces: nuclear matter in neutron star probed by nucleus-nucleus scattering,  
Progress of Theoretical and Experimental Physics, Vol.2016, Issue 6, 06A106, 2016, (査読有) DOI: DOI10.1093/ptep/ptw072

W. W. Qu, G. L. Zhang, S. Terashima, T. Furumoto, Y. Ayyad, Z. Q. Chen, C. L. Guo, A. Inoue, X. Y. Le, H. J. Ong, D. Y. Pang, H. Sakaguchi, Y. Sakuragi, B. H. Sun, A. Tamii, I. Tanihata, T. F. Wang, R. Wada, and Y. Yamamoto,  
Physics Letters B Vol.751, 1-6, 2015, (査読有)  
DOI: 10.1016/j.physletb.2015.10.008

### [学会発表](計6件)

緒方一介、千葉陽平、櫻木弘之、 $^{24}\text{Mg}$  の非弾性散乱断面積と単極子強度分布の対応、  
日本物理学会第74回年次大会、2019年3月15日、九州大学(福岡県)

Y. Sakuragi,  
High-density nuclear matter probed by nucleus-nucleus scattering: - its implication to neutron star mass problem - ,  
EMMI workshop on "Cold dense nuclear matter from short range correlations to neutron stars, Oct.13, 2015, GSI, Germany

櫻木弘之、核物質の飽和性と多体力： - 原子核散乱で解き明かす中性子星の核物質 - 、  
南部陽一郎先生 追悼シンポジウム、2015年9月29日、大阪市立大学(大阪府)

金子祥太郎、櫻木弘之、古本猛憲、  
高エネルギー $^6\text{Li}$  散乱における $^6\text{Li}$  分解効果のエネルギー依存性、  
日本物理学会2015秋季大会、2015年9月25日、大阪市立大学(大阪府)

櫻木弘之、古本猛憲、山本安夫、  
High-density nuclear matter probed by nucleus-nucleus scattering,  
新学術領域研究「実験と観測で解き明かす中性子星の核物質」研究集会、2015年9月17日、  
湘南国際村センター(神奈川県)

T. Furumoto,  
Approach to high-density nuclear matter via nucleus-nucleus elastic scattering,  
XXXIV Mazurian Lakes Conference on Physics, Sept.6, 2015, Piaski, Poland

## 6 . 研究組織

### (1)連携研究者

連携研究者氏名：古本猛憲

ローマ字氏名： (FURUMOTO, Takenori)

所属研究機関名： 横浜国立大学

部局名：教育学部

職名：准教授

研究者番号(8桁)： 20581086

連携研究者氏名：山本安夫

ローマ字氏名： (YAMAMOTO, Yasuo)

所属研究機関名： 理化学研究所

部局名：仁科加速器研究センター

職名：客員研究員

研究者番号(8桁)： 80124866

(2)研究協力者

研究協力者氏名： 緒方一介

ローマ字氏名： (OGATA, Kazuyuki)

研究協力者氏名： 佐藤弘一

ローマ字氏名： (SATO, Koichi)

研究協力者氏名： 千葉陽平

ローマ字氏名： (CHIBA, Yohei)

研究協力者氏名： 菊地右馬

ローマ字氏名： (KIKUCHI, Yuma)

研究協力者氏名： 金子祥太郎

ローマ字氏名： (KANEKO, Shotaro)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。