

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K03660

研究課題名(和文) 第一原理計算に基づく原子核クラスター状態におけるテンソル力の働きの解明

研究課題名(英文) Role of tensor force on the nuclear clustering in the ab initio approach

研究代表者

明 孝之 (Myo, Takayuki)

大阪工業大学・工学部・教授

研究者番号：20423212

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：原子核は核子(陽子と中性子)が強い相互作用である核力により結合する多体系である。核力には斥力芯、および核子のスピンの向きに依存するテンソル力がある。この2つの性質は理論的扱いが困難である一方、原子核の性質を決めている。そこで本研究では各要素に対応した相関関数を原子核のモデルに取り入れることで、核力が作る多体相関を取り入れた原子核の記述に成功した。本期間では有限系と無限系における理論の構築を行い、厳密計算との比較等を行うことで有効性を確認した。今後は様々な原子核を調べることで、原子核における核力の役割を解明していく。

研究成果の学術的意義や社会的意義

原子核は強い相互作用である核力が活躍する量子多体系として特徴づけられる。核力により原子核を構成する核子は結合し一体場を形成するが、核力は同時に核子間に多粒子相関を生む。本研究では、核力が原子核の構造に作る多粒子相関の性質の解明と、それを記述する多体論の理論体系を構築した。多体系を解く新しい理論として位置づけられる。本研究の理論は、多体論で良く知られているジャストロー法やクラスター展開法を効果的に取り入れ、拡張をしている。将来的には他分野を含めた一般的な多体系への適用が見込まれる。

研究成果の概要(英文)：Atomic nuclei are many-body systems consisting of nucleons bound by nuclear force. Nuclear force has two main components of the short-range core and the tensor force depending on the spin direction of nucleons, and these properties are difficult in the theoretical description of nuclei. In this study, we proposed a new theory to treat these correlations of the nuclear force by introducing the correlation functions in the nuclear model. These correlation functions produced the many-body correlations induced by nuclear force in nuclei. In this research period, we developed this theory for both finite nuclei and infinite nuclear matter systems. We confirmed the reliability of the present approach by comparing the results with the rigorous calculations.

研究分野：理論核物理

キーワード：核力 テンソル力 第一原理計算 クラスター 分子動力学 共鳴 複素スケールリング 相関関数

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 原子核は核力によって有限個の核子が結合する量子多体系である。核力の主要な成分である 2 核子間力には「斥力芯」をもつ等方的な中心力と核子のスピンの方向に依存する「テンソル力」がある。特にテンソル力は軽い原子核の精密計算によって結合エネルギーへの寄与が大きいことが知られている。しかし多体系におけるテンソル力の扱いは困難であり、原子核の構造にテンソル力が果たす役割が十分に理解されていない。そのため核力に基づいた原子核の性質の理解は不十分である。この課題は原子核分野の根本的な問題である。核力のテンソル力は粒子間の中間子交換が起源であり、ハドロン多体系の構造においても本質的となる相互作用である。

(2) 原子核・ハドロン系に共通する現象として、数個の複合粒子が粒子放出に対して不安定になり、有限の寿命で崩壊する共鳴状態がある。特に不安定核では過剰な中性子や陽子を作る共鳴状態が多く観測されている。これらの共鳴状態の構造は興味深い未知である。共鳴・連続状態まで含めて原子核にみられる非束縛な多体現象を解明し、その構造を理解することは原子核物理の最先端課題である。

## 2. 研究の目的

- (1) 原子核におけるテンソル力と短距離斥力の役割を解明し、核力に基づいて原子核の様々な性質を理解する。この目的のために核力を直接扱い、特にテンソル力の効果を発揮できる新しい原子核モデルを構築する。この新モデルを用いて「核力と核構造」の関係を解明する。本研究期間では特に原子核が分子的状態（クラスター状態）の形成機構に着目する。
- (2) 無限核物質においても核力の性質は重要である。(1)と同様に核力に基づく核物質の理論を構築し、核子密度に対するエネルギーの飽和性の発現における核力、特にテンソル力の役割を解明する。
- (3) 不安定核に出現する多くの共鳴の性質を調べる。特に 3 粒子系以上に分解する多体共鳴状態に着目し、それらのエネルギーと崩壊幅の予言、および構造の特徴を調べる。更には分解反応による散乱状態への強度関数を調べ、共鳴・非共鳴の寄与を調べる。

## 3. 研究の方法

(1) 研究代表者らは、先行研究において核力を扱う原子核モデル「**テンソル最適化殻モデル**」(Tensor-optimized shell model, TOSM)を構築した。TOSM は一体場の描像に基づく殻モデルを原子核の基底関数としているため、一体場の性質を持つ状態(殻モデル的状态)の記述に適している。その一方、TOSM は原子核が分子的形状となる「クラスター状態」の記述に対して不十分であることが分かってきた。そこで新たにクラスター状態を扱う原子核モデル「**テンソル最適化反対称化分子動力学**」(Tensor-Optimized Antisymmetrized Molecular Dynamics, TOAMD)を考案する。基底関数である AMD は核子をガウス波束の分布で表す。ガウス波束の中心値を変分パラメータとすることでクラスター状態が記述可能になる。一方、AMD では短距離斥力やテンソル力などの核力がもたらす粒子間の相関の記述が難しい。そこで AMD の波動関数  $\Phi_{AMD}$  に 2 体の相関関数  $F = \sum_{i < j} f_{ij}$  を逐次的に掛けることで粒子間の相関を導入し、核力を直接用いたエネルギー-変分問題を解く。相関関数  $F$  には核力の特質を考慮して以下の 2 種類を用意する。

スピンに依存するテンソル演算子型  
短距離斥力のための中心力型

これらの相関関数  $F$  のべき級数展開の表式を用いて TOAMD の全波動関数は以下になる。

$$\Phi_{TOAMD} = (1 + F + F^2 + F^3 + \dots) \times \Phi_{AMD}$$

各べき項に含まれる各相関関数はすべて独立な変分関数である。TOAMD ではハミルトニアンと相関関数の多重積をクラスター展開により多体項に分割し、すべての項の行列要素を計算に含める。したがって TOAMD はハミルトニアンに基づく変分法となる。本枠組みでは相関関数  $F$  は複数のガウス関数で展開され、展開係数が波動関数の変分パラメータとなる。AMD 波動関数  $\Phi_{AMD}$  については異なる配位を重ね合わせることが可能であり、各配位ごとに相関関数  $F$  が決定される。これは TOAMD+GCM に対応する。本研究期間では TOAMD の構築、およびこの新理論がどの程度軽い核の構造を記述できるのか、厳密計算との比較を行うことで有効性を調べた。

(2) (1)の TOSM, TOAMD の理論体系は有限原子核である。同様の理論は無限核物質へ展開できる。本研究では、物性分野で考案された手法として、無限物質の一部を取り出してそのエネル

ギーを計算する有限粒子法を採用する。核物質の波動関数を有限核子数の平面波で記述することで TOSM や TOAMD のような有限粒子系の多体論が適用できる。本研究では TOSM を参考に 2 粒子 2 空孔励起した配位を導入し、配位混合を行う。特に粒子状態は高運動量の状態まで用意することで核力の相関を記述する。短距離相関は TOSM と同様にユニタリー相関演算子法 (UCOM) を用いる。これにより核力に基づく変分問題として核物質のエネルギーを計算できる。本研究期間ではこの新しい核物質の理論体系の構築と有効性の検証を行った。

(3) 原子核における共鳴・連続状態を扱うために、「複素スケーリング法」(complex scaling) を使う。特に 3 粒子系以上に分解する多体共鳴の理論的予言を行う。更にグリーン関数を用いて原子核の分解反応の断面積を解析する。例として原子核の励起強度分布を計算し、その構造に含まれる共鳴の効果を検証する。本研究期間では中性子または陽子過剰核を解析し、未知な共鳴状態の予言を行う。モデルには 粒子の回りに弱結合した外殻核子群の運動を解くクラスターモデルを用いる。

#### 4. 研究成果

(1) 「テンソル最適化反対称化分子動力学, TOAMD」の理論体系を構築し、核力を用いて 5 核子系までの軽い核へ適用した。TOAMD において各相関関数の形状はエネルギー変分問題によって決められる。加えて相関関数としてテンソル型と中心力型の 2 種類を用いることが有効であることが示された。核力が波動関数に作る多体相関については、TOAMD では相関関数の多重積により記述される。その際は、図 1 のようにクラスター展開から生じる各多体項をすべて独立な基底関数として扱うことを行った。これにより通常のクラスター展開が拡張され、各多体項に含まれる各相関関数  $F$  もそれぞれ独立な変分関数となり、枠組み全体として変分空間を広げることが可能となった。

TOAMD における相関関数のべき数を 3 次項まで拡張し、かつ各べきに含まれる相関関数をすべて独立に扱った。その結果  $s$  殻核については厳密計算のエネルギー、ハミルトニアン各成分について再現することに成功した(図 2)。これら TOAMD の一連の性質と成果を学術論文として公表したり、国際会議や国内学会の招待・企画講演として発表した。

TOAMD で求めた  ${}^4\text{He}$  の波動関数を用いて核子の運動量分布を計算し実験値と比較した(図 3)。テンソル力を含む核力と含まない有効核力の比較により、テンソル力の効果を高運動量領域 ( $2 \text{ fm}^{-1}$  付近)で確認し、その必然性を認識できた。一方、さらに高運動量領域 ( $4 \text{ fm}^{-1}$  付近)では短距離斥力の効果が確認された。

5 核子系である  ${}^5\text{He}$  では励起状態の記述のために、AMD 波動関数に異なる配位を数個用意し、各配位に相関関数を掛け、それらの基底関数をすべて重ね合わせる「TOAMD+GCM」を行った。各相関関数は各 AMD 波動関数に依存して決まる。配位混合の結果、基底状態には平均場的な  $+n$ 、励起状態にはクラスター的な  $3\text{H}+d$  の成分を主とする異なる状態が得られた。励起エネルギーに関して実験値との対応も良い。TOAMD+GCM により核力に基づいて様々な内部構造を持つ状態の記述が可能になった。

以上から TOAMD により相関関数に基づいて核力を直接扱える新しい変分法が構築された。TOAMD は相関関数のべき数を逐次的に増やすことで変分空間の拡張が可能である。この利点を生かして、次に  $p$  殻核の解析を継続して行っていく。

(2) TOSM と TOAMD で得た多体相関を記述する枠組みの知見を活用して無限核物質の性質を調べた。本研究の特徴として有限粒子数法を採用し、各核子が高い運動量へ励起する配位を 2 粒子 2 空孔の範囲ですべて取り、配位混合を行った。配位混合において多体項を無視する近似は行わなかった。したがって核力に基づく変分計算となる。

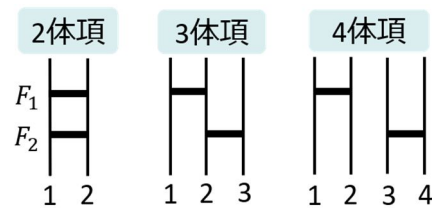


図 1 相関関数のクラスター展開

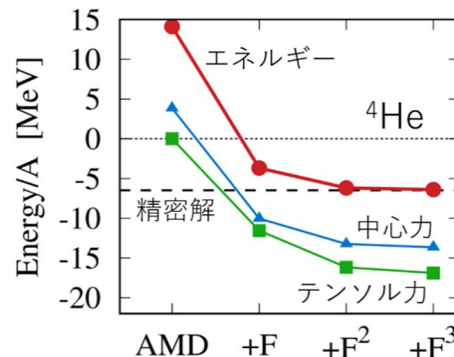


図 2 相関関数の逐次的拡張

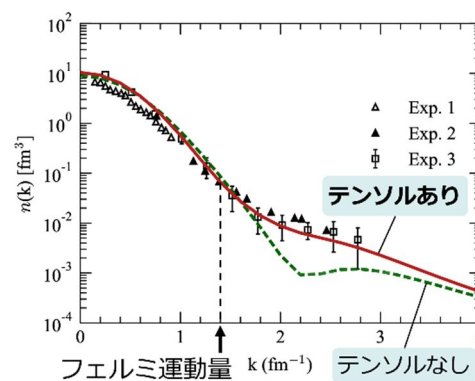


図 3  ${}^4\text{He}$  中の核子の運動量分布

本研究期間では対称核物質と中性子物質の状態方程式をアルゴンヌ型の核力で調べた。計算の結果、まず他の第一原理計算と同等のエネルギーを得ることができた(図4のUCOM+HM)。次に短距離斥力とテンソル力の効果を調べ、特に対称核物質においてはテンソル力の寄与の密度依存性がエネルギーの飽和性と密接な関係にあることを解明した。本研究期間で基本的な枠組みが完成したので、今後は様々な核力や3体力の効果、様々なハドロンの混合の様相を調べていく。

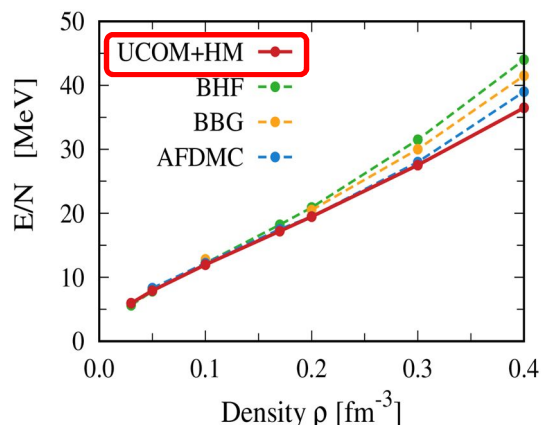


図4 無限中性子物質の状態方程式

(3) complex scaling を用いて質量数8である不安定核  ${}^8\text{He}$  とそのミラー核である  ${}^8\text{C}$  を +N+N+N+N の5体模型で計算し、存在しうるスピン・パリティ状態の共鳴の予言を行った。例として2021年にTRIUMFで報告された  ${}^8\text{He}(2^+)$  の共鳴について、励起エネルギーと崩壊幅を良い一致で予言できた。両原子核の性質の比較を行うことで、アイソスピン対称性の議論を行った。その結果、基底・励起状態によってアイソスピン対称性の度合いは異なることが判明した。

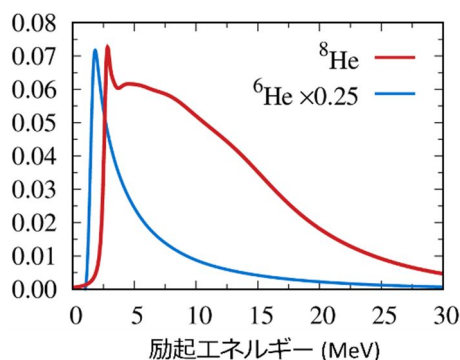


図5 ダイポール遷移強度 ( $e^2\text{fm}^2/\text{MeV}$ )

更に complex scaling で得たグリーン関数を用いて  ${}^8\text{He}$  がクーロン力によって5体系に分解するダイポール強度関数を分析した(図5)。その結果、粒子と4外殻中性子群が互いに逆位相で振動する「ソフトダイポール共鳴」を得ることができ、その強度関数への寄与を導出することに成功した。ソフトダイポール共鳴は過剰な中性子群が起因となる新しい集団運動として1992年に池田清美氏によって提案がな

された。その後、中性子ハロー核を中心に精力的に探索がなされてきたが、理論的に確定されていない。今回  ${}^8\text{He}$  で理論的に共鳴として予言することができた。更にミラー核である  ${}^8\text{C}$  についても粒子と4外殻陽子群が逆振動をする状態に相当する共鳴が見つかり、これは  ${}^8\text{He}$  と対をなす構造であることが判明した。これらの成果によりソフトダイポール共鳴の知見が深まった。今回の理論的予言については、今後の実験的検証が期待される。今後は同様の解析を様々な中性子過剰核で行い、新奇な共鳴状態を探索していく。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計31件（うち査読付論文 30件／うち国際共著 22件／うちオープンアクセス 11件）

1. 著者名 Takayuki Myo	4. 巻 -
2. 論文標題 Many-Body Correlations in Light Nuclei with the Tensor-Optimized Antisymmetrized Molecular Dynamics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Handbook of Nuclear Physics (2022, Living reference work, Springer)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-981-15-8818-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Niu Wan, Takayuki Myo, Hiroki Takemoto, Hiroshi Toki, Chang Xu, Hisashi Horiuchi, Masahiro Isaka, Mengjiao Lyu, Qing Zhao	4. 巻 106
2. 論文標題 Finite particle-number description of symmetric nuclear matter with spin excitations of high-momentum pairs induced by the tensor force	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 34308
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.106.034308	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Takayuki Myo, Myagmarjav Odsuren, Kiyoshi Kato	4. 巻 2022
2. 論文標題 Soft dipole resonance in neutron-rich $^8\text{He}$	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 103D01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptac130	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Takayuki Myo, Mengjiao Lyu, Hiroshi Toki, Hisashi Horiuchi, Qing Zhao, Masahiro Isaka, Hiroki Takemoto, Niu Wan	4. 巻 105
2. 論文標題 New many-body method using cluster expansion diagrams with tensor-optimized antisymmetrized molecular dynamics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 14317
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.105.014317	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計32件（うち招待講演 10件 / うち国際学会 11件）

1. 発表者名 Takayuki Myo
2. 発表標題 Physics of unbound light nuclei with complex scaling (基礎編)
3. 学会等名 日本原子力研究開発機構 先端研レクチャーシリーズ 第6回 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takayuki Myo
2. 発表標題 Physics of unbound light nuclei with complex scaling (応用編)
3. 学会等名 日本原子力研究開発機構 先端研レクチャーシリーズ 第8回 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 明孝之
2. 発表標題 テンソル最適化反対称化分子動力学を用いた現実的核力による原子核の記述
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takayuki Myo
2. 発表標題 Tensor-optimized antisymmetrized molecular dynamics with bare forces for light nuclei
3. 学会等名 Fourth International Workshop on "State of the Art in Nuclear Cluster Physics" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	土岐 博 (Toki Hiroshi) (70163962)	大阪大学・核物理研究センター・名誉教授  (14401)	
研究協力者	池田 清美 (Ikeda Kiyomi) (40011548)	理化学研究所・仁科加速器研究センター・客員研究員  (82401)	
研究協力者	堀内 昶 (Horiuchi Hisashi) (60027349)	大阪大学・核物理研究センター・招へい教授  (14401)	
研究協力者	須原 唯広 (Suhara Tadahiro) (10708407)	松江工業高等専門学校・数理科学科・准教授  (55201)	
研究協力者	山田 泰一 (Yamada Taiichi) (70200722)	関東学院大学・理工学部・教授  (32704)	
研究協力者	井坂 政裕 (Isaka Masahiro) (40708434)	法政大学・法政大学・准教授  (32675)	
研究協力者	加藤 幾芳 (Kato Kiyoshi) (20109416)	北海道大学・理学研究院・名誉教授  (10101)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	菊地 右馬  (Kikuchi Yuma)  (00648024)	徳山工業高等専門学校・一般科目・准教授    (55503)	
研究協力者	土手 昭伸  (Dote Akinobu)  (90450361)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子 原子核研究所・研究機関講師    (82118)	
研究協力者	竹本 宏輝  (Takemoto Hiroki)	大阪医科薬科大学・薬学部・准教授    (34401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
中国	南京大学	同濟大学	南京航空航天大学	他2機関
モンゴル	モンゴル国立大学			