

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 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：2015～2017

課題番号：15K05091

研究課題名(和文)不安定核における核子間テンソル力の特異性の影響

研究課題名(英文)Effect of tensor force on the structure of unstable nuclei

研究代表者

明 孝之(Myō, Takayuki)

大阪工業大学・工学部・准教授

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)：原子核は陽子と中性子が核力により結合している量子多体系である。核力には等方的な性質をもつ「中心力」と非等方性をもつ「テンソル力」がある。本研究では後者のテンソル力が原子核の構造に与える影響について調べる。その目的のため、本期間は核力を用いる原子核理論の構築を行った。その結果、理論体系が完成し軽い原子核の厳密計算を再現することが分かった。今後は本理論を様々な原子核に適用しテンソル力の働きを解明していく。他に不安定核やK中間子を含む原子核に現れる多体共鳴状態の性質についても調べた。

研究成果の概要(英文)：Atomic nuclei are the quantum many-body systems bound by nuclear force. Nuclear force consists of two kinds of components; one is isotropic 'central force' and the other is non-isotropic 'tensor force'. In this study, we investigate the role of the tensor force on the structure of atomic nuclei. For this purpose, in this research period, we have developed a new theory of atomic nuclei, which is capable of treating tensor force. It is found that our new theory reproduces the precise calculations of light nuclei. Based on this achievement, we will apply this theory to various atomic nuclei in future. In addition, we have also investigated the resonances in unstable nuclei and in the nuclei involving K meson.

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 分子動力学 共鳴 複素スケーリング法 相関関数

1. 研究開始当初の背景

(1) 原子核は核子が核力により結合する多体系である。核力の主要な成分となる2核子間力には等方的な中心力と共に、核子のスピンの方向に依存する「テンソル力」がある。テンソル力は非中心力であるが軽い原子核の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、テンソル力は理論的扱いが困難であるため原子核全般における働きが十分に理解されていない。そのため核力の性質に基づいた原子核構造の理解は不十分である。この課題は原子核分野の基本的な問題である。

(2) 原子核・ハドロン多体系に共通の現象として、数個の複合粒子が緩く結合し、粒子放出に対して不安定であるため短寿命で崩壊する共鳴状態がある。共鳴状態は不安定核や中間子原子核で頻繁に観測されるが、各々の状態の構造は未知であり興味深い。共鳴・連続状態まで含めてハドロン・原子核にみられる非束縛多体問題を解き明かし、その構造を理解することは原子核物理の最先端課題となっている。

2. 研究の目的

(1) 原子核におけるテンソル力の役割を解明し、核力に基づいて原子核の様々な性質を理解する。そのために研究代表者はテンソル力の効果を発揮でき核力を直接扱える新しい原子核模型を構築する。この新模型を用いて「核力と核構造」の関係を解明する。

(2) 不安定核・ハドロン系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注目し、それらのエネルギー、崩壊幅の予言と構造の特徴を調べる。

3. 研究の方法

(1) 研究代表者らは、テンソル力を含む核力を扱う原子核模型「**テンソル最適化殻模型**」(Tensor-optimized shell model, TOSM)を既に構築している。TOSMは一体場の描像に基づく殻模型を原子核の基底関数とし、粒子空孔励起による配位混合を行う。特に核力により混ざる「2粒子2空孔状態」を制限無しに取り入れる、核力から出発した変分法である。このときの核子の粒子状態には

高い軌道角運動量
 ガウス関数展開法による動径分布

をとることで広い変分空間を与える。この拡張によりテンソル力が原子核中の核子の運動にもたらず高運動量成分を記述できる。その結果、テンソル力の効果が発揮され、核力に基づいて原子核構造を調べることが可能になる。TOSMは特に一体場の様相が強い状態(殻模型的状态)の記述に適している。実際にアルゴン型核力の核力を用いた解析の結果は、p殻核の多くのエネルギー準位は良く再現する。一方、TOSMは原子核内で粒子が空間的

に発達し分子的形状を呈する「クラスター状態」の記述は不十分であることが、軽い核の系統的な解析を通して分かってきた。

(2) (1)のTOSMで不十分な点を補う新しい原子核模型「**テンソル最適化反対称化分子動力学**」(Tensor-Optimized Antisymmetrized Molecular Dynamics, TOAMD)を考案し構築する。基底関数であるAMDは核子をガウス波束で表す。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では短距離相関やテンソル相関などの核力による粒子間の相関は記述できない。そこでAMDの波動関数 Φ_{AMD} に2体の相関関数 $F = \sum_{i,j} f_{ij}$ を掛けることで相関を導入し、核力を直接用いたエネルギー変分問題を解く。核力の特徴を考慮した相関関数Fには

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

の2種類を用意する。TOAMDの波動関数は相関関数Fによる冪級数展開の形式

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

となり、各冪項に含まれる相関関数はすべて独立な変分関数である。本研究期間では、まずTOAMDがどの程度軽い核の構造を記述できるのか、その有効性を調べた。

(3) 原子核・ハドロン多体系における共鳴・連続状態を扱うために、「**複素スケール法**」(Complex Scaling Method, CSM)を使う。特に3粒子系以上に分解する多体共鳴を扱う。更にグリーン関数法を用いて分解反応の断面積を解析する。例えば原子核の光分解反応断面積等で観測される共鳴の効果を検証する。

4. 研究成果

(1) 「**テンソル最適化殻模型, TOSM**」により、アルゴン型核力に基づいてBe同位体(9Be, 10Be)と10Bを分析した。先行研究で報告した8Beと同様に、低励起から高励起の状態を系統的に調べた。Be同位体は粒子を2個含むため、2的なクラスター状態の自由度が活性化すると考えられる。解析の結果、9Beにおいて基底状態近傍の負パリティのエネルギー準位はよく再現された。更に高励起状態のエネルギー準位も実験値を良く再現し、かつ予言を行った。これらの結果からTOSMの有効性が示された。この傾向は8Beと同様である。ここで8Beと9Beに共通の結果として、低励起状態と高励起状態は異なるエネルギー領域に分かれて存在しているが、両グループ間のエネルギー間隔が実験値より狭いことが挙げられる。この理由として、基底状態を含む低励起状態では2つの粒子が発達したクラスター状態が示唆され、その状態はTOSMでは記述が不十分であるため、相対的なエネルギーが再現できないものと考

えられる。一方、高励起状態は一体場的な状態が支配的であり、TOSM によりこの性質はよく記述されている。前者の低励起状態の記述に関しては将来的に(2) TOAMD を用いて クラスターの成分を波動関数に含めた統一的な解析を行う。10Be, 10B についても同様の励起状態の解析を行った。

(2) 「**テンソル最適化反対称化分子動力学, TOAMD**」を構築し、その有効性を軽い核で示した。まず研究期間中に TOAMD の枠組みを完成させた。その後、アルゴンヌ型の核力を用いて TOAMD を質量数 4 までの s 殻核に適用し、厳密計算による解を、エネルギー、ハミルトニアン各成分、核半径について再現することに成功した(図参照)。この再現性には、TOAMD における相関関数の冪数を 2 次項まで拡張し、かつ各冪に含まれる相関関数をすべて独立に扱うことが重要であった。

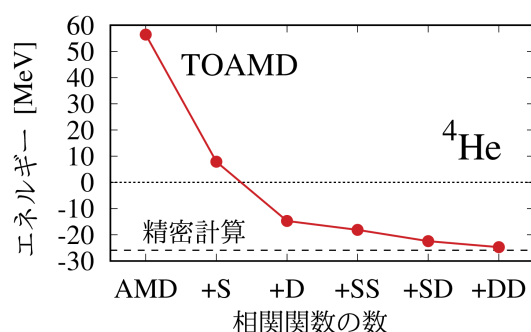
s 殻核の結果から、TOAMD は相関関数に基づく変分法として有名な「ジャストロー法」よりも低いエネルギー解を示すことが分かった。両者の比較は以下のように考えられる。

ジャストロー法では、予め関数形を適切に決めた相関関数を用意し、それを原子核内のすべての 2 核子間に共通に掛ける。

TOAMD では、原子核内で同時に相関を持つ 2 核子の数は相関関数 F の冪数で決まるため限られるが、独立な相関関数の数は多い。更に F 関数形を先見的に与える必要性はない。

TOAMD における相関の自由度はジャストロー法よりも多く、かつ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。この効果により TOAMD はジャストロー法よりも良いエネルギーを与えることが分かった。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物理的に有効であることも示された。これら TOAMD の一連の性質と成果、および枠組みの詳細な説明を学術論文として公表した。

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 は相関関数の冪数を増やすことで逐次的に変分空間を広げることが可能である。この利点を生かして、p 殻核への解析を今後行う。



(3) TOAMD における基底関数は AMD である。(2)では AMD に単一配位を採用し、核力の効果を相関関数により記述した。TOAMD の拡張法として AMD を多配位にして配位混合を行うことが挙げられる。本研究では配位を有効的に作る方法として、AMD のガウス波束の中心値を活用する。波束の中心値は複素数であり、その虚部は核子の運動量を表す。ここで核力が含む短距離斥力とテンソル力は、ともに原子核内にフェルミ運動量を超える「高運動量成分」を作ること注目する。そこでガウス波束の虚部を変分パラメータとして考える。これには木村氏や板垣氏による先行研究がある。本研究では高運動量を 2 核子間に逆向きで導入する板垣氏の方法を採用し、更に以下の拡張を施した。

核子の運動量の方向の種類を増やす
全核子ペアの組み合わせを取り入れる

最初、単一の AMD 配位に高運動量を持つ核子ペアを 1 個含む基底関数を考えた。そのうえで可能な配位を全て重ね合わせ、エネルギー変分問題として解いた。本手法の有効性を調べるため、2 粒子 2 空孔状態を完全に扱え TOSM を基準として比較した。核力を用いた計算の結果、この手法は TOSM で得られたハミルトニアン各成分の解を全て再現した。すなわち、逆向きの運動量を持つ核子ペアは 2 粒子 2 空孔励起と同等の効果であることが示された。

この方法は AMD 型の波動関数に高運動量成分を取り入れる方法であるので「High-Momentum AMD, HM-AMD」とよぶこととした。本研究では、更なる拡張として高運動量を持つ核子ペアを原子核中に複数個入れる方法も考案し (Multi high-momentum pairs)、これにより単距離斥力の相関も記述できることが示された。

これらの成果に基づき、HM-AMD を TOAMD と結合させた「HM-TOAMD」も考案した。軽い核に適用し、厳密計算を再現することに成功した。

(4) 研究協力者の加藤幾芳氏、菊地右馬氏を中心として、complex scaling 法を用いて 9Be の $8\text{Be} + n$ 的な状態の性質を調べた。9Be は $+ + n$ の 3 体分解の励起エネルギーが低く、3 体的な状態は元素合成にも影響する。したがって 3 体散乱状態の性質は 9Be の理解に重要である。なかでも $1/2^+$ の量子数を持つ状態は $8\text{Be}(\text{共鳴}) + n$ 的な準 2 体状態であると考えられ、特に相対運動が、共鳴状態ではない仮想 s 波状態である可能性が指摘されている。本研究では、この状態への光反応断面積が示すピークとの関連性を踏まえつつ、仮想状態と理解すべき状態であること示した。

(5) 研究協力者の土手昭伸氏を中心として、K 中間子原子核の代表例である K-pp 核の結合

チャンネル3体計算を行い、未知な共鳴状態を同定した。K中間子と核子間の相互作用は非常に強く、この影響によりK中間子を含むバリオン多体系が高密度物質を構成する可能性が示唆されている。本研究ではK-ppの性質を解明するため、 π や η といったチャンネルを陽に取り入れ、かつ少数系手法とcomplex scaling法を用いて共鳴状態を正しく扱った。その結果、K中間子-核子間相互作用として現象論的なものとカイラル動力学に基づくものを用いた場合を比較し、最新の実験値との比較を行った。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計31件)

Takayuki Myo, Short-range correlation in high-momentum antisymmetrized molecular dynamics, Progress of Theoretical and Experimental Physics 2018 (2018) 031D01, 査読有
DOI: 10.1093/ptep/pty020

明孝之, 反対称化分子動力学による軽い原子核の第一原理計算 - ジャストロー法にかわる新しい相関関数法 -, 日本物理学会誌第72巻12号「最近の研究から」 pp.867-871, 査読有

Takayuki Myo, Hiroshi Toki, Kiyomi Ikeda, Hisashi Horiuchi, Tadahiro Suhara, Mengjiao Lyu, Masahiro Isaka, and Taiichi Yamada, High-momentum antisymmetrized molecular dynamics compared with tensor-optimized shell model for strong tensor correlation, Progress of Theoretical and Experimental Physics 2017 (2017) 111D01, 査読有
DOI:10.1093/ptep/ptx143

Takayuki Myo, Hiroshi Toki, Kiyomi Ikeda, Hisashi Horiuchi, and Tadahiro Suhara, Power series expansion method in tensor-optimized antisymmetrized molecular dynamics beyond the Jastrow correlation method, Physical Review C 96 (2017) 034309, 査読有
DOI:10.1103/PhysRevC.96.034309

Takayuki Myo, Hiroshi Toki, Kiyomi Ikeda, Hisashi Horiuchi, and Tadahiro Suhara, Tensor-optimized antisymmetrized molecular dynamics as a successive variational method in nuclear many-body system, Physics Letters B 769 (2017) 213-218, 査読有
DOI:10.1016/j.physletb.2017.03.059

Takayuki Myo, Atsushi Umeya, Hiroshi Toki, Kiyomi Ikeda, Structures in $^9,^{10}\text{Be}$

and ^{10}B studied with tensor-optimized shell model, Progress of Theoretical and Experimental Physics (2015) 063D03, 査読有
DOI:10.1093/ptep/ptv077

Takayuki Myo, Hiroshi Toki, Kiyomi Ikeda, Hisashi Horiuchi, Tadahiro Suhara, Tensor-optimized antisymmetrized molecular dynamics in nuclear physics, Progress of Theoretical and Experimental Physics (2015) 073D02, 査読有
DOI:10.1093/ptep/ptv087

[学会発表](計31件)

明孝之, Lyu Mengjiao, 井坂政裕, 土岐博, 堀内昶, 池田清美, 須原唯広, 山田泰一, 高運動量成分を取り入れたAMDとテンソル最適化AMD, テンソル最適化殻模型の比較, 日本物理学会第73回年次大会, 東京理科大学 野田キャンパス, 2018年3月22-25日

Takayuki Myo, Tensor-optimized antisymmetrized molecular dynamics for light nuclei with bare nuclear interactions, The Seventh Asia-Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics (APFB 2017), 中国・桂林, 2017年8月25-30日

明孝之, テンソル最適化AMDによる核力に基づく軽い核の構造, 基研研究会「核力に基づく核構造, 核反応物理の展開」, 京都大学 基礎物理学研究所, 2017年3月27-29日

Takayuki Myo, Tensor-optimized antisymmetrized molecular dynamics for light nuclei with bare interaction, Workshop on Nuclear Cluster Physics (WNCP2016), 関東学院大学 関内メディアセンター, 2016年11月14-17日

Takayuki Myo, Role of tensor force in light nuclei with tensor-optimized antisymmetrized molecular dynamics, YITP workshop on Meson in Nucleus 2016 (MIN2016), 京都大学 基礎物理学研究所, 2016年7月31-8月2日

明孝之, 軽い中性子過剰核における共鳴現象, 日本物理学会分科会 シンポジウム「ドリップライン近傍のハイパー核と不安定核」, 大阪市立大学, 2015年9月27日

明孝之, 須原唯広, 土岐博, 堀内昶, 池田清美, テンソル最適化反対称化分子動

力学による軽い核の記述、日本物理学会
分科会、大阪市立大学、2015年9月25
日

Takayuki Myo、Importance of tensor
force in light nuclei studied with
tensor-optimized shell model、2nd
International workshop & 12th RIBF
discussion on Neutron-Proton
Correlations、香港大学、2015年7月8
日

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.oit.ac.jp/ge/~myo/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

明 孝之 (MYO, Takayuki)
大阪工業大学・工学部・准教授
研究者番号：20423212

(2) 研究協力者

土岐 博 (TOKI, Hiroshi)
大阪大学・核物理研究センター・名誉教授
研究者番号：70163962

池田 清美 (IKEDA, Kiyomi)
理化学研究所・仁科加速器研究センター・
客員研究員
研究者番号：40011548

堀内 昶 (HORIUCHI, Hisashi)
大阪大学・核物理研究センター・招聘教授
研究者番号：60027349

須原 唯広 (SUHARA, Tadahiro)
松江工業高等専門学校・数理科学科・講師
研究者番号：10708407

山田 泰一 (YAMADA, Taiichi)
関東学院大学・理工学部・教授
研究者番号：70200722

井坂 政裕 (ISAKA, Masahiro)
大阪大学・核物理研究センター・
特別研究員(PD)
研究者番号：40708434

梅谷 篤史 (UMEYA Atsushi)
日本工業大学・共通教育系・准教授
研究者番号：20454580

加藤 幾芳 (KATO, Kiyoshi)
北海道大学・理学部・名誉教授
研究者番号：20109416

菊地 右馬 (KIKUCHI, Yuma)
大阪市立大学・大学院理学研究科・
特任講師
研究者番号：00648024

土手 昭伸 (DOTE, Akinobu)
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
研究者番号：90450361

船木 靖郎 (FUNAKI, Yasuro)
関東学院大学・理工学部・准教授
研究者番号：00435679