

Title	軽い核における双中性子相関の第一原理計算による解明
Sub Title	Elucidating di-neutron correlations in light nuclei via ab initio calculations
Author	阿部, 喬(Abe, Takashi)
Publisher	
Publication year	2025
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2024.)
JaLC DOI	
Abstract	偶数個の核子からなるヘリウム同位体の基底状態と第一励起状態に関してDaejeon16相互作用を用いた閉殻芯を仮定しないモンテカルロ殻模型による第一原理計算により束縛エネルギーや半径、電磁遷移強度確率を計算した。また、軽い4N自己共役核の基底状態に関して、さまざまな模型空間や調和振動子エネルギーにおいて計算し、それらの結果を外挿することにより種々の物理量の第一原理解を求めた。さらに、原子核の形状に関する研究と関連して、炭素12原子核のHoyle状態や重い核における三軸非対称変形における理論研究へと波及し、軽い陽子過剰核の励起状態にみられる鏡映対称性や基底状態の分光学的因子の実験研究にも貢献した。 We have carried out ab-initio calculations of the binding energies, root-mean-square radii, and electric transition strength probabilities for the ground and first-excited states of the helium isotopes with the even number of nucleons, using no-core Monte Carlo shell model with Daejeon16 two-nucleon interaction. We have also performed calculations for the ground states of light 4N self-conjugate nuclei in various model spaces and harmonic-oscillator energies, and have extrapolated the results to obtain first-principles solutions for various physical quantities. In connection with the shape of atomic nucleus, these studies have also contributed to the theoretical studies of the Hoyle state of the carbon-12 nucleus and the triaxial deformation in heavy nuclei, and to the experimental studies of the mirror symmetry appearing in the excited states of light unstable nuclei, and the spectroscopic factors in the ground-states of light proton-rich nuclei.
Notes	研究種目：基盤研究 (C) (一般) 研究期間：2021～2024 課題番号：21K03564 研究分野：原子核物理学
Genre	Research Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_21K03564seika

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

令和 7 年 5 月 25 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2024

課題番号：21K03564

研究課題名(和文) 軽い核における双中性子相関の第一原理計算による解明

研究課題名(英文) Elucidating di-neutron correlations in light nuclei via ab initio calculations

研究代表者

阿部 喬 (Abe, Takashi)

慶應義塾大学・理工学研究科(矢上)・特任准教授

研究者番号：70463958

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：偶数個の核子からなるヘリウム同位体の基底状態と第一励起状態に関してDaejeon16相互作用を用いた閉殻芯を仮定しないモンテカルロ殻模型による第一原理計算により束縛エネルギーや半径、電磁遷移強度確率を計算した。また、軽い4N自己共役核の基底状態に関して、さまざまな模型空間や調和振動子エネルギーにおいて計算し、それらの結果を外挿することにより種々の物理量の第一原理解を求めた。さらに、原子核の形状に関する研究と関連して、炭素12原子核のHoyle状態や重い核における三軸非対称変形における理論研究へと波及し、軽い陽子過剰核の励起状態にみられる鏡映対称性や基底状態の分光学的因子の実験研究にも貢献した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られたヘリウム同位体の波動関数を用いて物体固定座標系での1体密度分布を解析することにより、これらの原子核の形状に関する議論が可能になり、余剰中性子の核子相関について微視的な観点からの知見が得られる。さらに、ヘリウム同位体だけでなく他の原子核に適用することにより、原子核物理学分野の根源的な研究課題である原子核の形状に対して核子対相関や α クラスター相関の果たす役割について微視的な観点から統一的に理解する道筋を与える。

研究成果の概要(英文)：We have carried out ab-initio calculations of the binding energies, root-mean-square radii, and electric transition strength probabilities for the ground and first-excited states of the helium isotopes with the even number of nucleons, using no-core Monte Carlo shell model with Daejeon16 two-nucleon interaction. We have also performed calculations for the ground states of light 4N self-conjugate nuclei in various model spaces and harmonic-oscillator energies, and have extrapolated the results to obtain first-principles solutions for various physical quantities. In connection with the shape of atomic nucleus, these studies have also contributed to the theoretical studies of the Hoyle state of the carbon-12 nucleus and the triaxial deformation in heavy nuclei, and to the experimental studies of the mirror symmetry appearing in the excited states of light unstable nuclei, and the spectroscopic factors in the ground-states of light proton-rich nuclei.

研究分野：原子核物理学

キーワード：核構造 核子対相関 殻模型 第一原理計算

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

軽い中性子過剰核におけるスキンやハローを構成する余剰な 2 個の中性子の間に働く核子相関は双中性子 (ダイニュートロン) 相関と呼ばれ、原子核を構成する中性子数と陽子数がほぼ等しい通常安定核における核子相関と比べ特異な性質を示すことが近年の実験研究や現象論的な模型による理論計算から示唆されている。この核子相関は低密度における中性子物質の理論研究との類推により通常核密度でみられる Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS) 的な弱いペアリング相関ではなく低密度で発現する Bose-Einstein Condensation (BEC) 的な強いペアリング相関に起因するものと考えられている。実際に、ヘリウム 6 原子核の基底状態のスキン構造について、現象論的計算や加速器による実験観測などにより、通常核密度の無限系から期待されるような余剰中性子 2 個が空間的に広がっているような BCS 的な相関よりも低密度の無限系で期待されるような余剰中性子 2 個が空間的にコンパクトな対を形成するような BEC 的な相関が支配的になっていることが示唆されている。さらに、4 つの中性子間の核子相関について、最近の実験研究によりテラニュートロン (4 中性子系) が比較的崩壊幅の狭い共鳴状態として存在することがわかり、これらの通常安定核ではみられない特異な構造を持つ状態において双中性子相関の果たす役割を理論・実験両側面により理解することは原子核物理学分野において喫緊の課題であると認識されている。

2. 研究の目的

本研究課題は、このメカニズムを有限系である中性子過剰核においてクラスター構造などの内部構造を仮定することなく原子核を構成する核子の自由度とその間に働く核力に基づく第一原理計算により定量的な観点から議論しその発現機構を明らかにすることである。これまで無限系である中性子物質については、このダイニュートロン相関に着目した第一原理計算が行われていたが、有限系である中性子過剰核においては未だ十分な計算が行われていないのが現状である。現象論による理論研究や加速器による実験研究の最近の進展を踏まえ、コア原子核に緩く束縛する 2 つの中性子間に働くダイニュートロン相関について、核力に基づく核子多体系の第一原理計算により基底状態だけでなく励起状態も含め微視的な観点から理解を深めることを目指す。

3. 研究の方法

本研究では、ヘリウム 6 原子核における余剰中性子 2 個の間の双中性子相関、ヘリウム 8 原子核における余剰中性子 4 個の間に働く中性子間相関を主な対象とする。余剰中性子が通常核でみられるような空間的に広がった BCS 的な相関を持つのか、BEC 的に空間的にコンパクトな形状を形成するのかどうかを可視化するために、第一原理計算により得られた波動関数を用いて物体固定座標系での 1 体密度分布を解析する。波動関数を計算するために、本研究では閉殻芯を仮定しないモンテカルロ殻模型による第一原理計算手法を採用する。多体計算のインプットとなる核力には、カイラル有効場の理論を用いて構築された Daejeon16 核力を用いる。模型空間は調和振動子基底で 7 主殻までおよびさまざまなサイズのものを取り、それぞれの模型空間で得られたエネルギーなどの物理量は外挿手法により最終的な第一原理解として得られる。

4. 研究成果

(1) 軽い核の基底状態の第一原理計算の原理実証

本研究課題で用いる第一原理計算手法である閉殻芯を仮定しないモンテカルロ殻模型について、ヘリウム 4 原子核からネオン 20 原子核にわたる $4N$ 核の基底状態の物理量を対象とし原理実証研究を行った。非局所的な 2 体核力である Daejeon16 相互作用を用いた場合、ヘリウム 4 原子核から炭素 12 原子核や酸素 16 原子核くらいまでの基底状態の束縛エネルギーは実験値を再現することがわかった。ネオン 20 原子核では実験値よりも有意に過束縛し、原子核を構成する核子数が増えるに従いその傾向は拡大していくものと推測される。今後、本研究で得られた知見をもとに、より広範囲をカバーする非局所的核力を構築する研究が推進されると期待される。

(2) Hoyle 状態の形状に関する第一原理計算

ダイニュートロン相関と同様に軽い核で特徴的に現れる α クラスター相関について、炭素 12 原子核の Hoyle 状態 (第一励起 0^+ 状態) を対象に閉殻芯を仮定しないモンテカルロ殻模型による第一原理計算を行った。物体固定座標系での密度分布の解析から、Hoyle 状態はこれまで主に現象論的なクラスター模型で議論されてきた 3α クラスター成分だけでなく基底状態にみられる

平均場的な状態も寄与していることがわかった。本研究は、従来、殻模型計算では困難とされてきたクラスター構造の研究をモンテカルロ殻模型という大規模数値計算に適した手法を第一原理計算へ応用して実現したもので、今後、炭素 12 原子核よりも重い原子核でみられるクラスター構造の研究へと発展していき、現象論によらない微視的な観点からのクラスター構造の理解へとつながることが期待される。

(3) ヘリウム同位体の基底状態および第一励起状態の第一原理計算

偶数個の核子から構成されるヘリウム同位体（ヘリウム 4, 6, 8, 10 原子核）の基底状態（0+状態）および第一励起状態（2+状態）におけるエネルギー、平均二乗半径、電磁遷移強度確率などの物理量を対象に閉殻芯を仮定しないモンテカルロ殻模型による第一原理計算を行った。ヘリウム 4, 6 原子核については調和振動子 7 主殻の模型空間で励起状態も含め実験値と定量的にもよい一致が得られた。ヘリウム 8, 10 原子核についても、基底数を十分大きく取れば、調和振動子 7 主殻の模型空間でも束縛エネルギーが基底数に関して外挿できることがわかった。同様の計算を調和振動子 2 から 6 主殻の模型空間でも行い、模型空間に関してもエネルギーを外挿できるようになり、束縛エネルギーの第一原理解を求めることができるようになった。これらの成果により、偶数個の核子をもつヘリウム同位体の基底状態と第一励起状態について信頼性の高い多体波動関数が得られるようになったため、炭素 12 の Hoyle 状態の α クラスター構造を議論したときと同様にヘリウム同位体でも物体固定座標系における密度分布を描くことにより、これらの同位体で余剰中性子がどのような核子相関を持つのか可視化することが可能になった。今後、本研究課題で得られた第一原理計算結果をもとにダイニュートロン相関の発現機構の理解へと繋がることが期待される。

(4) 炭素 8 原子核とヘリウム 8 原子核の励起状態にみられる鏡映対称性

ヘリウム 8 原子核の鏡映核である炭素 8 原子核の第一励起状態の励起エネルギーの実験結果にみえる鏡映対称性について簡単な模型計算から連続状態の寄与の重要性を指摘する研究を行った。本研究によって得られた知見を基に、今後、連続状態を考慮したより詳細な多体計算による理論研究や本研究で議論した炭素 8 原子核とヘリウム 8 原子核の対だけでなくその他の原子核対についても実験研究を行うことにより、より一般に共鳴状態における励起エネルギーにみえる鏡映対称性について連続状態の寄与の重要性を理論・実験研究の両側面から引き続き検証していくことが望まれる。さらに、このような励起エネルギーにみられる鏡映対称性が、連続状態の寄与だけでなく多核子相関の寄与とどのように関係するのか議論が進展していくことにより当該研究課題の主題であるダイニュートロン相関の物理との接点が見出されることが期待される。

(4) 軽い陽子過剰核における分光学的因子

ヘリウム 8 原子核の鏡映核である炭素 8 原子核の第一励起状態の励起エネルギーにみえる鏡映対称性の実験研究から派生して、軽い陽子過剰核における (p,d) 反応による分光学的因子の実験研究に携わった。これまで、分光学的因子の実験値と理論値の比が特に中性子/陽子過剰核において移行 (transfer) 反応とノックアウト反応とで大きく食い違うことが長年の謎として知られていた。今回、陽子過剰核を含むホウ素 8 原子核や炭素 9, 10, 12 原子核において、近年、精力的に研究されている不確実性の定量化 (Uncertainty Quantification, UQ) をおこなった光学ポテンシャルを用いてこれらの原子核の分光学的因子を系統的に解析した。その結果、分光学的因子の比は陽子/中性子の分離エネルギーの非対称度の関数としてみた場合、これまでのノックアウト反応により得られていた急激な減少とは違い、ほぼ平坦か緩やかに減少する傾向にあることがわかった。なお、この傾向は、電子散乱実験による研究から示唆されている短距離相関の効果に関連するものと思われ、この研究成果は、これまでの分光学的因子の研究にない新たな視点を与えるものと期待される。

(5) 重い原子核の形状にみられる三軸非対称変形

ヘリウム同位体のような軽い原子核だけでなく、重い原子核の形状に関する理論研究にも携わった。これまで軸対称変形だと広く信じられてきたエルビウム 166 などの重い原子核において、殻模型による大規模数値計算により三軸非対称変形であることを明らかにした。この研究成果により、これまで軸対称変形だと思われていた多くの原子核が三軸非対称変形である可能性が考えられ、今後、このような研究がさらに進展し原子核の形状に関する本質的な理解へとつながることが期待される。

本研究課題の当初の主な目的は軽い原子核における特異な形状についての第一原理計算による解明であったが、このように、当初、想定していなかった軽い原子核の励起状態にみられる鏡映対称性における連続状態の効果の重要性や分光学的因子にみられる短距離相関の効果の影響などについての実験研究へと波及し、軽い原子核の構造における実験・理論両側面からの理解を深めることに貢献した。さらに、重い原子核における形状に関する理論研究へと広がりをもせ、より広い視野に立った原子核の形状に関する本質的な理解を目指した研究へと発展した。当該研究課題で行われた一連の研究は、今後、原子核の構造の理解のさらなる深化へ向けた研究の出発点となることが期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 4件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 S. Koyama, D. Suzuki, M. Assie, L. Lalanne, O. Sorlin, T. Abe et al.	4. 巻 109
2. 論文標題 Mirror symmetry at far edges of stability: The cases of 8C and 8He	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 L031301
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevC.109.L031301	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 Ishibashi Y., Gladkov A., Ichikawa Y., Takamine A., Nishibata H., Sato T., Yamazaki H., Abe T., Daugas J. M., Egami T., Fujita T., Georgiev G., Imamura K., Kawaguchi T., Kobayashi W., Nakamura Y., Ozawa A., Sanjo M., Shimizu N., Tominaga D., Tao L. C., Asahi K., Ueno H.	4. 巻 107
2. 論文標題 Nuclear magnetic moment of the neutron-rich nucleus 210	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 24306
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevC.107.024306	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 Abe T., Maris P., Otsuka T., Shimizu N., Utsuno Y., Vary J. P.	4. 巻 104
2. 論文標題 Ground-state properties of light 4n self-conjugate nuclei in ab initio no-core Monte Carlo shell model calculations with nonlocal NN interactions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 54315
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevC.104.054315	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 Otsuka T., Abe T., Yoshida T., Tsunoda Y., Shimizu N., Itagaki N., Utsuno Y., Vary J., Maris P., Ueno H.	4. 巻 13
2. 論文標題 α -Clustering in atomic nuclei from first principles with statistical learning and the Hoyle state character	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 2234
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-022-29582-0	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 Sakuma Rei, Kanno Shu, Sugisaki Kenji, Abe Takashi, Yamamoto Naoki	4. 巻 110
2. 論文標題 Entanglement-assisted phase-estimation algorithm for calculating dynamical response functions	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 22618
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.110.022618	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 —

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 4件／うち国際学会 5件）

1. 発表者名 T. Abe
2. 発表標題 Alpha-clustering in atomic nuclei from first principles
3. 学会等名 Advances in Radioactive Isotope Science (ARIS2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Abe
2. 発表標題 Alpha-cluster structure from first principles
3. 学会等名 YIPQS long-term workshop ``Mean-field and Cluster Dynamics in Nuclear Systems 2022 (MCD2022) ” (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Abe
2. 発表標題 Alpha-cluster structure from first principles
3. 学会等名 RIKEN-YITP Workshop ``Physics of RI: Recent progress and perspectives (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 阿部喬
2. 発表標題 富岳で探る炭素12のホイル状態
3. 学会等名 「富岳で加速する素粒子・原子核・宇宙・惑星」シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Abe
2. 発表標題 Alpha-clustering of light nuclei from first principles
3. 学会等名 JSPS/NRF/NSFC A3 Foresight program ``Nuclear Physics in the 21st century``（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 阿部喬
2. 発表標題 第一原理計算によるホイル状態のクラスター構造
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Abe
2. 発表標題 Ab initio description of nuclear structure in no-core Monte Carlo shell model
3. 学会等名 XXXII IUPAP Conference on Computational Physics（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 阿部喬
2. 発表標題 モンテカルロ殻模型による第一原理計算の最近の進展
3. 学会等名 「富岳で加速する素粒子・原子核・宇宙・惑星」シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 阿部喬
2. 発表標題 モンテカルロ殻模型による第一原理計算の進展
3. 学会等名 基研研究会「核力に基づいた原子核の構造と反応」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 阿部喬、角田佑介、清水則孝、宇都野穰、大塚孝治
2. 発表標題 モンテカルロ殻模型を用いた第一原理計算によるヘリウム同位体の構造研究
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2022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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------