

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2011～2015

課題番号：23244049

研究課題名(和文) 不安定核の新しい殻模型・平均場計算と社会的応用

研究課題名(英文) New shell-model and mean-field calculations on unstable nuclei and their applications

研究代表者

大塚 孝治 (Otsuka, Takaharu)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20201379

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 37,200,000円

研究成果の概要(和文)：原子核の量子多体状態を殻模型、平均場模型から様々な研究した。原子核物理学に直接関わる成果としては、量子色力学から独自の新しい方法を用いて核子間有効相互作用を求め、そこから物理量を求める道筋を開いた。それにより逆転の島のようなエキゾチック原子核の第一原理的な記述を可能にした。第2種殻進化理論を展開し、変形共存現象の理解を進めた。

二重ベータ崩壊の核行列要素を2主殻から成る模型空間の設定で、ニュートリノ質量の決定に向けてこれまでよりも高精度でカルシウム48の場合について計算を行った。光励起スペクトルを計算可能にして、核分裂生成物の核変換に資すべく基礎データを提供できるようにした。

研究成果の概要(英文)：We have carried out various nuclear structure calculations by means of shell-model and mean-field calculations. The effective nucleon-nucleon interaction has been derived from QCD through our own new method, which can be used to calculate various physical quantities. This enables us to study the structure of exotic nuclei, for instance, the island of inversion, from the first principle. The type II shell evolution theory has been developed for the description of shape coexistence.

Nuclear matrix elements of double-beta decay was calculated with two major shells for the case of Ca-48 with higher precision. The calculation of photo-excitation from the shell-model ground state has been made possible, which opens perspectives of providing basic data on nuclear transmutation for nuclear fission products (nuclear waste).

研究分野：原子核物理学理論

キーワード：不安定核 エキゾチック核 殻模型 殻構造 殻進化 平均場模型 核廃棄物 二重ベータ崩壊

1. 研究開始当初の背景

原子核の多体構造を、核子（陽子と中性子の総称）を多数結合させて塊＝原子核にする核力から密接に記述させる必要性が以前にも増して高まっていた。その理由の一つは、陽子数と中性子数がアンバランスな不安定核（エキゾチック核とも言う）の研究が原子核物理学の中心テーマになりつつあるものの、得られる実験データは少なく、以前のようにそれらによって理論モデルのパラメータを決めることが難しくなったためである。同時に、核力の研究が進み、その原子核内での働き方がより明瞭になってきていた。そのような状況で、原子核内での有効核力を求める方法論やアルゴリズムを構築し、原子核の性質を探究する研究が求められていた。

2. 研究の目的

上の項目で述べられている有効核力の導出の方法論を得る。それを殻模型や平均場模型に適用し、不安定核の構造や存在限界（ドリップライン）の解明などの原子核本来の課題、さらには、その応用としての素粒子論や原子力工学の問題に適用し、社会的課題の解決に資する道も探る。

3. 研究の方法

理論的研究によって進め、場合によっては大規模な数値計算を行った。そのための並列計算用計算機を導入した。核力に関しては、量子色力学 (QCD) の有効場理論から得られる N3LO と呼ばれるカテゴリーの 2 体力、及び、藤田-宮沢型 3 体力を出発点とした。2 体力の短距離相関の処理は $V_{low k}$ 法によって行い、原子核の媒質効果（芯偏極など）や高運動量成分の繰り込みを、高柳らによって新たに開発された EKK 法によって行った。このようにして得られた有効核力を用いて、殻模型や平均場模型による数値計算を実行した。さらに、十分な相関を持った殻模型の基底状態から励起スペクトルを求める方法を考案し、例えば、光吸収による電気的雙極子励起のスペクトルが計算できるようにした。このようにして得られるエネルギー固有値、遷移行列要素により、原子核物理学の研究を進めつつ、二重ベータ崩壊の核行列要素の計算などの学際的研究、放射性廃棄物の核変換処理へ向けての応用研究などを進めた。

4. 研究成果

量子色力学 (QCD) の有効場理論から得られる N3LO 型 2 体力、及び、藤田-宮沢型 3 体力から EKK 法などによって有効核力を求めた。対象になった原子核は、一つは反転の島と呼ばれる中性子数が 20 前後で、原子番号が 10～14 くらいの原子核である。中性子数が陽子数のほぼ 2 倍になるものを含み、典型的な不安定核である。これまでは現象論的なハミルトニアンに基づいた研究が成されてきたが、今回始めて、第一原理的な計算によっ

て求められた有効核力による、2 主殻計算が行われた。図 1 にその結果の一例を示す。

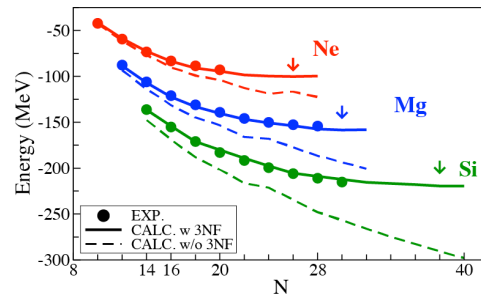


図 1 ネオン (Ne)、マグネシウム (Mg)、珪素 (Si) の不安定核を含むアイソトープの基底状態エネルギー。●印は実験値、実線が本プロジェクトによる成果、破線は比較のために 3 体力をわざと抜いた計算結果である。矢印は存在限界（ドリップライン）の予言値を示す。

図 1 の結果からも分かるように理論計算の結果は実験データをよく再現している。他にも、励起エネルギーや電磁遷移強度、電磁モーメントを計算し、実験との比較や将来の実験へ向けての予言を行っている。研究対象の原子核は、上記のものに加えて、カルシウム、チタン、クロム、鉄、ニッケルのあたりまで広げた計算を行った。ニッケルの一番重いものは、宇宙における元素合成で重要な r プロセスの始まりのあたりに位置し、学際的にも意義がある。これらの結果は学会で報告しつつ、国際学術誌にも投稿中、及び、投稿準備中である。

このような殻模型計算の重要な応用として、ニュートリノの質量を求めるのに必要な二重ベータ崩壊の核行列要素の計算がある。これまでに行ったのは、カルシウム 48 原子核からチタン 48 原子核への二重ベータ崩壊のゼロニュートリノの場合と 2 ニュートリノの場合のものである。

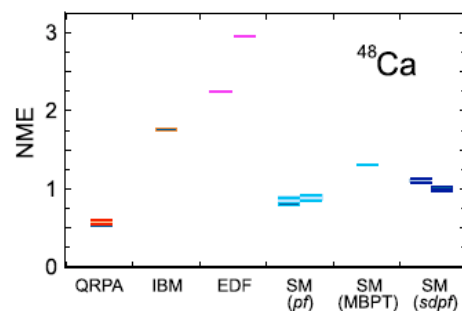


図 2 ゼロニュートリノ二重ベータ崩壊の核行列要素の計算値。右から 2 番目のものが本研究の主要な成果で、他の計算と比較されている。

図2には、計算された核行列要素が示されており、本研究計画によるものが現時点では最も精度が高いと考えられる。この結果は、国際学術誌 Physical Review Letters にて出版され、それは新聞でも報道された。

平均場模型に関わる成果としては、核図表上の変化を表す殻進化(shell evolution)に対し、同じ原子核内でのテンソル力などの効果を表す第2種殻進化(Type II shell evolution)を提案し、ニッケルのアイソトープなどで具体的に論じた。平均場は同じ原子核でも一種類とは限らず、配位によっては大きく異なる平均場を持つことを示した。この性質は双対量子液体と呼ぶことができ、かなり多くの原子核に見出される新しい構造であり、今後の発展が期待される。

殻模型は相関を持った基底状態を産み出すことができるが、そこから比較的高いエネルギーの励起状態への励起スペクトルの適切な計算方法は分かっていた。これを代表者らは考案し、それによる計算を行っている。その応用として、ストロンチウム90のような、核変換処理が強く望まれる放射性廃棄物の光(ガンマ線)照射による処理に向けての基礎データを計算した。中性子放出により別のアイソトープに変えてしまうプロセスに関するものである。同様の計算はどの原子核に対しても行えるので、今後のさらなる発展が期待される。

以上のように、様々な原子核に対して、以前にはなかった理論計算を実行し、学術的、並びに、応用的な成果を出してきた。

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7件)

① 岩田 順敬、清水 則孝、大塚 孝治、他
Large-scale shell-model analysis of the neutrinoless beta beta decay of ^{48}Ca 、Physical Review Letters、査読有、116 巻、2016 年、112502
DOI:10.1103/PhysRevLett.116.112502

② 大塚 孝治、角田 佑介
The role of shell evolution in shape coexistence、J. Physics G: Nuclear and Particle Physics、査読有、43 巻、2016 年、24009
DOI:10.1088/0954-3899/43/2/024009

③ 清水 則孝、宇都野 穰、他、大塚 孝治、
Stochastic estimation of nuclear level density in the nuclear shell model: An application to parity-dependent level density in ^{58}Ni 、Physics Letters B、査読有、753 巻、2016 年、13

DOI:10.1016/j.physletb.2015.12.005

④ 角田 佑介、大塚 孝治、清水 則孝、他
Novel shape evolution in exotic Ni isotopes and configuration-dependent shell structure、Physical Review C、査読有、89 巻、2014 年、031301(R)
DOI:10.1103/PhysRevC.89.031301

⑤ H. Watanabe、G. Lorusso、大塚 孝治、他
Monopole-Driven Shell Evolution below the Doubly Magic Nucleus Sn-132 Explored with the Long-Lived Isomer in Pd-126 、Physical Review Letters、査読有、113 巻、2014 年、042502
DOI:10.1103/PhysRevLett.113.042502

⑥ 角田 直文、高柳 和雄、M. H. -Jensen、大塚 孝治、
Multi-shell effective interactions、Physical Review C、査読有、89 巻、2014 年、024313
DOI:10.1103/PhysRevC.89.024313

⑦ D. Steppenbeck、大塚 孝治、他
Evidence for a new nuclear ‘magic number’ from the level structure of Ca-54 、Nature、査読有、502 巻、2013 年、207.210
DOI:10.1038/nature12522

[学会発表] (計12件)

① 角田 直文、大塚 孝治、鈴木 俊夫、高柳 和雄、清水 則孝、Morten H. -Jensen
核力に基づいた pf-shell 原子核の構造、日本物理学会春季大会、一般講演
2016 年 3 月 19~22 日、東北学院大学泉キャンパス (宮城県、仙台市)

② 大塚 孝治
Shell evolution and nuclear forces、1st Gogny Conference、招待講演
2015 年 12 月 8~11 日、Bruyeres-le-Chatel、France

③ 吉田 聡太、角田 直文、阿部 喬、大塚 孝治、河野 通郎、鈴木 俊夫
カイラル有効場の理論から得られる有効相互作用の基本的性質、日本物理学会秋季大会、一般講演
2015 年 9 月 25~28 日、大阪市立大学杉本キャンパス (大阪府、大阪市)

④ 清水 則孝
Large-scale shell model calculations on E1 spectra in medium and heavy nuclei、5th International Conference on “Collective Motion in Nuclei under

Extreme Conditions”、招待講演
2015年9月5～8日、Krakow、Poland

⑤ 大塚 孝治

Shell-model perspectives for quantities of astrophysical interests in medium and heavy nuclei、
Numazu Workshop 2015: Challenges of modeling supernovae with nuclear data、招待講演
2015年9月1～2日、三島商工会議所（静岡県、三島市）

⑥ 大塚 孝治

Dual quantum liquid picture of nuclei and its implication to reflection asymmetry、
International Conference “Reflections on the atomic nucleus” 招待講演
2015年7月28～30日、Liverpool 大学、英国

⑦ 大塚 孝治

Collectivity and the shell model for exotic nuclei、
International Conference “Nuclear Structure and Dynamics III” 招待講演
2015年6月14～19日、Protoroz-Portorose、スロベニア

⑧ 大塚 孝治

Dual quantum liquid and shell evolutions in exotic nuclei、
International School of Nuclear Physics 36th Course、招待講演
2014年9月16～24日、Erice、Italy

⑨ 大塚 孝治

Shapes of exotic nuclei and shell evolution、
15th International Symposium on Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics (CGS15)、招待講演
2014年8月25～29日、Helmholtz Zentrum Dresden-Rossendorf、Dresden、Germany

⑩ 大塚 孝治

Dual Fermi liquid, critical point and ^{68}Ni 、
Workshop on “The structure of ^{68}Ni : current knowledge and open questions”、招待講演
2014年4月23～24日、KU Leuven、Belgium

⑪ 大塚 孝治

Shape coexistence and shell evolution in exotic Ni isotopes、
International Workshop on “Shape Coexistence Across the Chart of the Nuclides” 招待講演
2014年4月15～16日、Kings Manor, York 大学、英国

⑫ 大塚 孝治

Driving forces of shell evolution and shapes of exotic nuclei、
Gordon Conference on Nuclear Chemistry、招待講演
2013年6月9～14日、Colby-Sawyer College、New London、米国

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

○取得状況（計0件）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大塚 孝治 (OTSUKA, Takaharu)
東京大学・大学院理学系研究科・教授
研究者番号：20201379

(2) 研究分担者

清水 則孝 (SHIMIZU, Noritaka)
東京大学・大学院理学系研究科・准教授
研究者番号：30419254