

令和 3 年 6 月 24 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K05450

研究課題名(和文) 二重ベータ崩壊の半減期評価のための原子核構造の精密計算

研究課題名(英文) Accurate calculations of nuclear structure for half-lives of neutrinoless double beta decay

研究代表者

東山 幸司 (Higashiyama, Koji)

千葉工業大学・創造工学部・教授

研究者番号：60433679

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では質量数80領域、質量数100領域、質量数210領域、質量数220領域の偶偶核・奇核・奇奇核の低励起状態について、平均場を越えた理論である原子核殻模型を用いて数値解析を実行した。原子核殻模型の計算結果は低励起状態のエネルギー準位と電磁遷移を再現することに成功した。また本研究では、質量数80領域、質量数100領域、質量数130領域の原子核に対して、ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊の核行列要素を評価した。我々の計算では先行研究の結果に比べ、2～3倍小さな原子核行列要素が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の特色は、重い原子核の偶偶核・奇核・奇奇核に対し、平均場理論を超えた枠組みにより原子核構造の研究を行い、その結果得られる精度の良い波動関数を用いて二重ベータ崩壊に対する核行列要素を計算することにある。これまでに行われてきた核行列要素の理論計算は、原子核殻模型、乱雑位相近似、相互作用するボソン模型等による研究が行われているが、エネルギー準位や電磁遷移等による原子核構造の再現が確認されておらず、信頼性は高くない。このため、本研究の成果が十分に活かされ、学術的・社会的貢献が大きい。

研究成果の概要(英文)：We investigate nuclear structure of even-even, odd-mass, and doubly odd nuclei in the masses 80, 100, 210 and 220 regions using a nuclear shell model. Energy levels of the low-lying states are reproduced very well along with electromagnetic transition rates. For the mass 80, 100 and 130 regions, we estimate the nuclear matrix elements for the neutrinoless double beta decay. Our calculations give a few times smaller nuclear matrix elements than those obtained by other theoretical methods.

研究分野：原子核理論

キーワード：原子核構造 二重ベータ崩壊 原子核殻模型 核子対殻模型 生成座標法

1. 研究開始当初の背景

ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊 ($0\nu\beta\beta$) は、崩壊が起こり半減期を得られるとニュートリノの基本的性質が明らかになる。それと同時に、素粒子の標準模型を超えた新しい物理への道を開くものとして期待されている。 $0\nu\beta\beta$ の探索実験は、世界各地で地下実験施設が建設され、 ^{48}Ca , ^{76}Ge , ^{130}Te , ^{136}Xe , ^{150}Nd 他、幾つかの偶偶核 (陽子と中性子が共に偶数の原子核) で観測が行われているが、半減期の下限值 (^{76}Ge : 1.9×10^{25} 年, ^{130}Te : 3.0×10^{24} 年等) が得られているに過ぎない。国内でも、東北大学を中心とする KamLAND-Zen 実験グループによる ^{136}Xe の観測や、大阪大学を中心とする CANDLES 実験グループによる ^{48}Ca の観測が行われているが、やはり半減期の下限值 (^{136}Xe : 6.2×10^{24} 年, ^{48}Ca : 5.8×10^{22} 年) しか得られていない。しかし、現在でも多くの実験が行われており、次世代の大規模な実験も提案されていることから、近い将来、 $0\nu\beta\beta$ の半減期が測定される可能性が大きい。

$0\nu\beta\beta$ の半減期は、理論的には素粒子理論により導出されるニュートリノの有効質量と、原子核に関する遷移行列要素 (核行列要素) との積で表されるため、信頼性の高い核行列要素を予言する必要がある。これまで原子核の理論研究では原子核殻模型、乱雑位相近似、相互作用するボソン模型等により核行列要素の計算が行われてきたが、互いの結果が一致していない状況である。これらの計算では、奇核・奇奇核 (陽子、中性子が奇数の原子核) のエネルギー準位等の実験値を再現しておらず、信頼性は高くない。このため、平均場を越えた新しい理論体系による系統的な精密計算が渴望されている。

本研究の代表者等は、核子を完全に微視的に扱うと同時に、核子間相互作用の回転不変性、粒子数不変性を一切破らない原子核殻模型により質量数 80 領域の原子核構造の数値解析を実行した。その波動関数を用いて $0\nu\beta\beta$ の核行列要素を評価すると、先行研究の核行列要素に比べて小さな値が得られた。この研究成果の妥当性を確認すると共に、質量数が 100 以上の重い原子核に対する核行列要素を系統的に計算することを計画している。

2. 研究の目的

本研究の目的は、今まで明らかにされてこなかった重い原子核の核構造を解明すると共に、 $0\nu\beta\beta$ の核行列要素を系統的に計算し、半減期を予言することである。核行列要素の計算には原子核の波動関数の精度が要求されるため、核子自由度に基づく微視的で平均場を越えた理論により、原子核のエネルギー準位・電磁遷移等の実験値を再現しなければならない。本研究では質量数 80 領域 (^{76}Ge , ^{82}Se)、質量数 100 領域 (^{96}Zr , ^{100}Mo)、質量数 130 領域 (^{128}Te , ^{130}Te , ^{136}Xe) 等の原子核構造の数値解析を実行する。計算で得られた原子核波動関数を用いて $0\nu\beta\beta$ の核行列要素を計算する。

質量数が 100 以上の原子核では、中性子や陽子の一粒子エネルギーに現れる特徴的な変化 (核構造の進化)、高スピン軌道にある中性子と陽子によって作られるエネルギー的にほぼ縮退した 2 つの回転バンド (ダブルットバンド)、偶偶核の新たな集団運動対称性による特徴的なスペクトルなどが観測されている。本研究では、原子核構造の数値解析を行う段階で、これらの多様な原子核構造が明らかになる。

現在まで、 $0\nu\beta\beta$ の核行列要素の理論的予言は原子核殻模型、乱雑位相近似、相互作用するボソン模型等様々な模型を用いて行われているが、それらの研究では原子核の核構造が再現されているかは確認されていない。本研究では、その適用が可能である核種に対しては原子核殻模型を用い、配位数が多過ぎて現在の計算環境では取り扱いが不可能な核種に対しては、原子核殻模型の近似理論である核子対殻模型を用いる。さらに、原子核が大きく変形し 2 つの理論では計算できない原子核に対しては生成座標法を用いて検証する。本研究の 3 つの理論は偶偶核・奇核・奇奇核を同じ枠組みで扱うことができるため、幅広い核種のエネルギー準位や電磁遷移を再現することにより有効相互作用にかなりの制限が加わる。これにより、信頼性が高い $0\nu\beta\beta$ の核行列要素を求めることができる。

$0\nu\beta\beta$ はレプトン数非保存かつ、ヘリシティの不一致の過程であり、電弱相互作用の標準模型では許されていない。 $0\nu\beta\beta$ が起こるにはニュートリノに質量があること、ニュートリノ自身が反ニュートリノとなるマヨラナ粒子である必要があるが、ニュートリノに質量があることは既にスーパーカミオカンデ等の実験で確認されている。また、ニュートリノが他の基本粒子に比べて極端に軽い理由を自然に説明しているシーソー模型では、ニュートリノがマヨラナ粒子であることを前提としている。ニュートリノの質量がどの程度の大きさであるかを決定することにより、標準模型を検証できると共に、新たな理論の必要性を示す契機になると期待される。

3. 研究の方法

本研究では、平均場を越えた理論により重い原子核の数値解析を実行し、原子核構造を実現する波動関数を用いて $0\nu\beta\beta$ の核行列要素を系統的に計算する。研究代表者らは、既に原子核殻模型により質量数 130 領域の原子核のエネルギー準位や電磁遷移を再現しており、精密な原子核の波動関数を用意できる。そこで、 $0\nu\beta\beta$ の核行列要素を計算する枠組みを整備し、この領域の原子核に適用する。他の領域の原子核については、原子核殻模型もしくは生成座標法を用いて、偶偶核・奇核・奇奇核の数値解析を実行する。

$0\nu\beta\beta$ では、原子核中の中性子が反ニュートリノを放出し、その反ニュートリノが同じ原子核中の別の中性子に吸収される。この過程において、安定な偶偶核は一時的に不安定な奇奇核を経由して、別の安定な偶偶核へと遷移する。これまでに行われてきた多くの理論研究では、奇奇核の中間状態を考慮せず、ニュートリノの交換のみを考慮したニュートリノポテンシャルを用いた核行列要素の計算が行われてきた。この計算手法については理論的枠組みを整備し、質量数 80 領域の原子核 (^{76}Ge , ^{82}Se) に対して原子核殻模型を用いた計算を行っている。次の段階として本研究では、既に原子核殻模型により原子核構造の数値解析を実行している質量数 130 領域 (^{128}Te , ^{130}Te , ^{136}Xe) において、 $0\nu\beta\beta$ の核行列要素の計算を行う。これまで質量数 80 領域の核行列要素の評価で使用していた計算プログラムでは、配位数が膨大になり計算時間がかかってしまうため、重い原子核の核行列要素の評価に用いることができない。そこで本研究では、計算プログラムを並列計算用書き換え、並列計算用のワークステーションを導入することにより計算時間の短縮化を図り、質量数 130 領域における $0\nu\beta\beta$ の核行列要素を計算する。

本研究では $0\nu\beta\beta$ の核行列要素の計算と並行して、原子核殻模型と核子対殻模型の二つの計算プログラムの拡張を行う。現在の計算プログラムは単一粒子軌道に制限があったため (32 ビット計算)、これらを 64 ビット化し、球形で安定な原子核から離れた領域にある原子核も扱えるよう改良する。次に、この新しい原子核殻模型により質量数 100 領域 (^{96}Zr , ^{100}Mo) での有効相互作用を求める。近年研究が行われている核構造の進化では、核子の一粒子エネルギーの変化がテンソル相互作用によって引き起こされると考えられており、本研究においてもテンソル相互作用を加える。この相互作用は一粒子エネルギーに粒子数依存性を持たせるため、実際の原子核の描像をよりの確に再現できる。対象領域の偶偶核・奇核・奇奇核に対して、エネルギー準位・遷移確率の実験値が系統的に再現できるように、相互作用のパラメーターを設定する。

以上のようにして、質量数 100 領域の原子核を統一的に再現できる有効相互作用が自然に得られる。計算で得られた原子核波動関数を解析し、原子核内の核子の配位、エネルギー準位、準位間の遷移確率等を考察することにより原子核構造を明らかにする。また、これにより現実の原子核をよく再現する波動関数が得られ、 $0\nu\beta\beta$ の核行列要素の系統的な計算が可能になる。

この研究の他に、より重い原子核における原子核構造の数値解析を進める。大きく変形している重い原子核では配位数が多くなり原子核殻模型の適用が困難になるため、本研究では核子対殻模型により数値解析を実行する。核子対殻模型は原子核殻模型の近似計算となるが、広い配位空間を扱うことにより低エネルギー状態において完全な原子核殻模型計算とほぼ一致する計算結果が得られる。さらに本研究では生成座標法を整備し、核子対殻模型の計算結果と比較することにより、計算結果の妥当性を確かめる。生成座標法は核子自由度に基づく微視的で、半古典的な描像を持つ量子力学的多体理論であると共に、原子核の集団運動と単一粒子運動を同時に記述する強力な理論である。質量数 80 領域、質量数 130 領域の原子核構造の数値解析を実行すると共に、さらに重い原子核の研究も目指す。

4. 研究成果

(1) 原子核殻模型による原子核構造の数値解析

質量数 100 領域の Ru, Rh, Pd, Ag, Cd 同位体、質量数 210 領域の Pt, Au, Hg, Tl 同位体および質量数 220 領域の Pb, Bi, Po, At, Rn, Fr 同位体に対して、原子核殻模型による数値解析を行い、偶偶核・奇核・奇奇核の励起メカニズムを明らかにした。これらの領域の核子間に働く相互作用の研究は現在まであまり行われてこなかったため、本研究では現象論的な有効相互作用を用いて数値解析を実行し、幅広い核種のエネルギー準位や電磁遷移の実験値を再現した。質量数 220 領域の研究では、計算で得られたエネルギー準位と実験値を比較することにより、コア励起に起因する八重極励起の影響が低エネルギー状態に現れることが分かった。

この他に、質量数 80 領域の ^{76}Ge , ^{76}As , ^{76}Se , ^{82}Se , ^{82}Br , ^{82}Kr 原子核の原子核殻模型計算を実行した。先行研究で得られた現象論的な有効相互作用の再評価を行い、エネルギー準位や電磁遷移の実験値を再現した。

(2) 二重ベータ崩壊の評価

質量数 80 領域の ^{76}Ge , ^{82}Se 原子核, 質量数 100 領域の ^{96}Zr , ^{96}Ru 原子核および質量数 130 領域の ^{130}Te , ^{136}Xe 原子核に対して, ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊の核行列要素を評価した。これまでに乱雑位相近似, 相互作用するボソン模型等の先行研究で核行列計算が計算されてきたが, 本研究の計算結果はこれらに比べて小さい核行列要素を予言している。また, ^{96}Zr 原子核に対する二重ベータ崩壊の核行列要素の理論研究はあまり行われていなかったが, 本研究により初めて平均場を超えた殻模型による数値解析に成功した。質量数 80 領域および質量数 130 領域については, 殻模型計算と幾つかのタイプの核子対殻模型計算により得られる原子核波動関数を用いて核行列要素の数値解析を実行した。その結果, 模型空間が小さくなるにつれて核行列要素が大きくなることを明らかにした。先行研究では, 核子の一粒子軌道に対する占有数の実験値を再現すれば, 理論計算において核行列要素を正確に求められると考えられてきた。しかしながら, 本研究では占有数が正しく再現できても核行列要素が大きく変化する事を示した。

(3) 生成座標法による偶偶核の三軸非対称変形の性質解明

生成座標法により質量数 80 領域および質量数 130 領域の偶偶核の数値解析を実行した。計算で得られた波動関数を解析することにより, 原子核の軸対称変形の効果を取り入れることでイラストバンドを再現できること, 三軸非対称変形の効果を取り入れなければガンマバンドを再現できないことを確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 K. Higashiyama, K. Yanase, N. Yoshinaga, A. Umeya, A. Uehara, E. Teruya	4. 巻 47
2. 論文標題 Nuclear matrix elements of neutrinoless double beta decay for masses 130 and 136 in the shell model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics	6. 最初と最後の頁 035102-1 ~ 15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6471/ab5400	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 Naotaka Yoshinaga, Eri Teruya, Koji Higashiyama, and Kota Yanase	4. 巻 23
2. 論文標題 Nuclear Schiff Moments in Medium and Heavy Nuclei	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceeding	6. 最初と最後の頁 012034/1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.23.012034	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 -
1. 著者名 Koji Higashiyama, Naotaka Yoshinaga, and Kota Yanase	4. 巻 23
2. 論文標題 Shell Model Study of Nuclei around Mass 100	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceeding	6. 最初と最後の頁 013002/1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.23.013002	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 -
1. 著者名 K. Yanase, E. Teruya, K. Higashiyama, and N. Yoshinaga	4. 巻 98
2. 論文標題 Shell-model study of Pb, Bi, Po, At, Rn, and Fr isotopes with masses from 210 to 217	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 014308/1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.98.014308	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 L. Kaya, A. Vogt, P. Reiter, M. Siciliano, B. Birkenbach, A. Blazhev, L. Coraggio, E. Teruya, N. Yoshinaga, K. Higashiyama, 他	4. 巻 98
2. 論文標題 High-spin structure in the transitional nucleus Xe131: Competitive neutron and proton alignment in the vicinity of the N=82 shell closure	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 014309/1-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.98.014309	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 N. Yoshinaga, K. Yanase, K. Higashiyama, and E. Teruya	4. 巻 98
2. 論文標題 Octupole phonon model based on the shell model for octupole vibrational states	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 044321/1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.98.044321	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 K. Yanase, N. Yoshinaga, K. Higashiyama, N. Yamanaka	4. 巻 99
2. 論文標題 Electric dipole moment of Hg199 atom from P, CP-odd electron-nucleon interaction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 075021/1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.99.075021	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 N. Yoshinaga, K. Yanase, K. Higashiyama, E. Teruya, and D. Taguchi	4. 巻 2018
2. 論文標題 Structure of nuclei with masses 76 and 82 and nuclear matrix elements of neutrinoless double beta decay	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 023D02/1-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptx174	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 -

1. 著者名 E. Teruya, N. Yoshinaga, K. Higashiyama, and K. Asahi	4. 巻 96
2. 論文標題 Effects of particle-hole excitations to nuclear Schiff moments in Xe isotopes	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 015501/1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.96.015501	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 -

[学会発表] 計17件(うち招待講演 0件/うち国際学会 3件)

1. 発表者名 吉永尚孝, 江幡修一郎, 渡邊千夏, 東山幸司
2. 発表標題 重い原子核での殻模型計算におけるテンソル力の役割
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 東山幸司, 吉永尚孝
2. 発表標題 Mo-Ru-Pd領域の原子核における二重ベータ崩壊核行列要素
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉永尚孝, 東山幸司, 梅谷篤史, 柳瀬宏太
2. 発表標題 鉛208付近での有効電荷の殻模型による評価
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 東山幸司, 吉永尚孝, 柳瀬宏太
2. 発表標題 質量数130領域の奇核のE1遷移
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kota Yanase, Koji Higashiyama, Eri Teruya, and Naotaka Yoshinaga
2. 発表標題 Large-scale shell-model calculation and nuclear Schiff moment of 199Hg
3. 学会等名 5th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Naotaka Yoshinaga, Kota Yanase, Koji Higashiyama, and Eri Teruya
2. 発表標題 Large-scale shell-model calculations on nuclei around mass 210
3. 学会等名 5th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Naotaka Yoshinaga, and Koji Higashiyama
2. 発表標題 Neutrinoless double-beta decay rates around mass 130 in the nuclear shell model
3. 学会等名 13th International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions (NN2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柳瀬宏太, 吉永尚孝, 東山幸司
2. 発表標題 殻模型計算によるヨウ素126ダブレットバンドの解析
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉永尚孝, 柳瀬宏太, 東山幸司
2. 発表標題 質量数100領域でのニュートリノレスダブルベータ崩壊の核行列要素
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 東山幸司, 吉永尚孝, 柳瀬宏太
2. 発表標題 Mo-Ru-Pd領域の原子核の励起メカニズム
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉永尚孝, 柳瀬宏太, 東山幸司, 梅谷篤史
2. 発表標題 208Pb付近の有効電荷の軌道による依存性
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柳瀬宏太, 吉永尚孝, 東山幸司, 梅谷篤史
2. 発表標題 原子核殻模型による199Hgのシッフモーメントの評価
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 東山幸司, 吉永尚孝, 柳瀬宏太
2. 発表標題 Mo-Ru-Pd領域の殻模型計算
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 コア励起を入れた殻模型の鉛領域核への適用
2. 発表標題 吉永尚孝, 東山幸司, 柳瀬宏太, 照屋絵理
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 質量数100領域の原子核の生成座標法による解析
2. 発表標題 東山幸司, 吉永尚孝, 柳瀬宏太
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 質量数200領域の原子核のシッフモーメント
2. 発表標題 照屋給理, 吉永尚孝, 東山幸司, 柳瀬宏太
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 殻模型によるニュートリノを放出する二重ベータ崩壊の核行列要素計算
2. 発表標題 柳瀬宏太, 吉永尚孝, 東山幸司, 梅谷篤史
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017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 分 担 者	吉永 尚孝 (Yoshinaga Naotaka) (00192427)	埼玉大学・理工学研究科・教授 (12401)	

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