

原子核変形と二重ベータ崩壊の新しい関連性が明らかに

～自然界の基本相互作用の解明への貢献に期待～

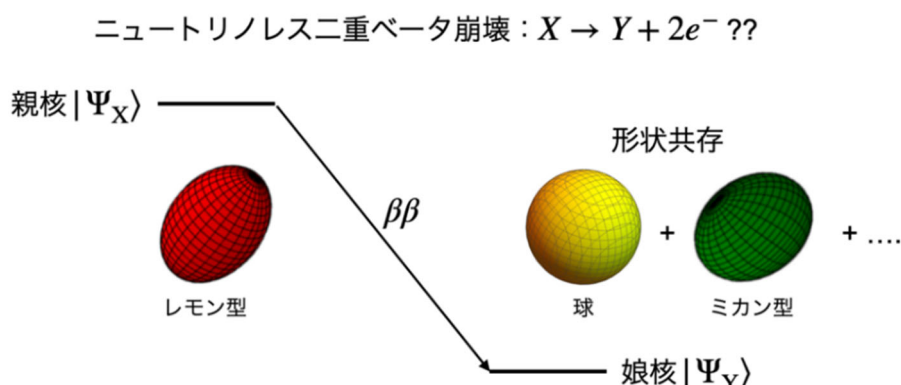
ポイント

- ・ニュートリノレス二重ベータ崩壊における原子核形状の共存の効果を解明。
- ・原子核構造と稀崩壊の統一的な理論的手法の構築に貢献。
- ・自然界の基本相互作用とニュートリノの性質の理解の発展に期待。

概要

北海道大学大学院理学研究院の野村昂亮准教授は、原子核の稀崩壊であるニュートリノレス二重ベータ崩壊の予言における原子核変形の効果を、新たな観点から明らかにしました。ニュートリノレス二重ベータ崩壊は自然界の基本相互作用が要請する対称性・保存則を破る核崩壊であり、実験的に検出された場合、それは既存のパラダイムを超えた新しい物理を示唆します。この核崩壊プロセスの半減期^{*1}の決定には原子核模型による核行列要素の計算が必要ですが、これまでの理論研究では、模型によってその予言値が大きく異なるという問題が知られています。核行列要素は、崩壊の親核及び娘核における変形などの多体相関に大きく影響されます。特に、基底状態^{*2}近傍に複数の形状が現れる形状共存は、原子核構造を理解する上で重要な役割を持ちます。本研究では、原子核模型の一つである相互作用するボソン模型（IBM）^{*3}の微視的な定式化を行うことで、ニュートリノレス二重ベータ崩壊核行列要素の新しい予言値を提示しました。特に親核及び娘核の構造計算に形状共存の効果をとり入れることによって崩壊が抑制されることが示されました。これはニュートリノレス二重ベータ崩壊の半減期の精密な予言にも繋がり、物理の基礎的な問題の解明に向け、現在世界中で精力的に行われている実験研究にも新たな知見を提供できるものと期待されます。

なお、本研究成果は、2025年10月30日（木）公開の Physics Letters B 誌に掲載されました。



ニュートリノレス二重ベータ崩壊の親核またはその娘核の基底状態付近では、異なる形状が共存する場合があります、それが崩壊の半減期の決定に重要な役割を持つことが本研究で明らかとなった。図の $|\Psi_X\rangle$ と $|\Psi_Y\rangle$ はそれぞれ親核、娘核の基底状態を表し、親核はレモン型形状を呈し、娘核では球形とミカン型形状の共存を模式的に示す。

【背景】

放射性崩壊の一つであるベータ崩壊^{*4}は、原子核の構造、元素合成のプロセスといった基礎物理の理解だけでなく、実用的応用においても重要な役割を持ちます。ごく稀に、隣り合う偶偶核^{*5}同士の間でベータ崩壊が2度続けて起きる場合があります。二重ベータ崩壊と呼ばれるこの稀崩壊では通常、電子2個と反電子ニュートリノ2個が放出されます。その一方、ニュートリノを放出しない「ニュートリノレス二重ベータ崩壊」が予想されており、世界中の地下実験施設でその検出に向けた実験が実施、計画されています。仮にこの崩壊が観測された場合、それは電弱相互作用の対称性や不変性の破れを示唆するものであり、さらにニュートリノの性質、質量、階層に関する重要な知見を与えるため、幅広い物理の分野に共通の研究対象となっています。

ニュートリノレス二重ベータ崩壊の半減期の決定には、原子核の理論を用いた核行列要素（NME）の精密計算が必要であり、原子核物理分野からのユニークな貢献といえます。国際的な競争のもと、様々な理論的手法・模型を使った NME 値の予言が世界中で繰り広げられていますが、現在までに行われてきた理論研究では、模型によって予言値に大きな違いがあるという問題があります。原子核は多数の核子（陽子と中性子）からなる量子多体系であり、様々な多体相関が NME の予言値に影響を与えます。その一つが核表面の変形ですが、特に基底状態近傍に複数の幾何学的形状が現れる「形の共存」という現象が起きる場合があります。低エネルギーでの原子核構造における形の共存の重要性は認識されていましたが、核子多体系の微視的な理論に基づいて、個々の核種の変形状態と分光学的性質を詳細かつ系統的に記述し、さらに NME 予言まで包括した統一的な理論の構築は、原子核物理分野の最優先課題の一つです。

【研究手法】

核子のペアをボソンの自由度で近似する「相互作用するボソン模型（IBM）」は、原子核構造計算に大きな成功を収めてきました。IBM はニュートリノレス二重ベータ崩壊 NME の計算にもこれまでの先行研究で応用されてきましたが、親核と娘核の状態を記述するための模型ハミルトニアン^{*6}の相互作用強度パラメータは、励起スペクトルなどの実験データを再現するように決められていたため、核子の自由度に基づいた微視的な原子核構造との関連性が明らかにされていませんでした。2000 年代後半より野村准教授らは、核子多体系の微視的理論である「密度汎関数理論（DFT）」に基づいて IBM のハミルトニアンを決定する方法を開発、発展させてきました。近年、この手法をニュートリノレス二重ベータ崩壊に適用し、現象論的補正のない新しい NME 予言値を与える研究を展開しています。本研究ではこれを大きく発展させ、形の共存の効果を NME 計算に取り入れることに初めて成功しました。

出発点として微視的 DFT の枠組みで、ある変形度空間で定義された核子多体系のポテンシャル・エネルギー面を計算しました。ポテンシャル・エネルギー面には複数のエネルギー極小点が現れる場合があります、それが形状の共存を示唆します。図 1 はニュートリノレス二重ベータ崩壊の親核ゲルマニウム 76 (⁷⁶Ge) とその娘核セレン 76 (⁷⁶Se) のポテンシャル・エネルギー面を示していますが、前者はレモン型のプロレート変形に対応する単一の極小点が、後者では球形に対応する最低エネルギー点のほかに、ミカン型のオブレート変形の局所最小点が見られます。親核と娘核に対応する IBM のハミルトニアンは、DFT で計算したポテンシャル・エネルギー面を再現するように決定しました。NME を求めるには、親核から娘核へと中性子と陽子をそれぞれ 2 個ずつやり取りする遷移の確率を計算することになります。本研究手法の画期的な点は、この遷移確率の計算に必要な演算子^{*7}を、上述の複数の異なるエネルギー極小点の寄与を取り入れられるように新たに定式化し、数値シミュレーシ

ョンに実装したことにあります。

【研究成果】

ニュートリノレス二重ベータ崩壊の親核または娘核のいくつかでは、異なる形状が共存していることが実験・理論で指摘されています。本研究では、代表的なケースについて NME の計算を行いました。図 2 は、今回の理論計算で得られた、親核の基底状態から娘核の基底状態へのニュートリノレス二重ベータ崩壊の NME を示しており、形の共存を考慮しない場合の結果と比較しています。また、模型の一般性を示すために、出発点となる DFT 計算で用いる核子間の相互作用として核構造理論計算で汎用的に用いられる 2 種類を採用しました。主要な結論としては、一部の例外を除き、形の共存の効果を取り入れることによって NME の値が一般的に小さくなる、つまり崩壊が起きる確率が小さくなる、ということがこの結果によって明らかになりました。形の共存効果は特に ^{76}Ge とネオジウム 150 (^{150}Nd) の崩壊において顕著であり、本研究の理論計算においてその重要性が示されました。

【今後への期待】

形状共存は、多くの原子核で見られる普遍的な現象と近年認識されており、それに関連する低エネルギー構造は大きな注目を集めています。本研究は、この現象の詳細に関して定量的な理論的予言を提供するものであり、短寿命核ビームを用いた実験で研究対象となっている不安定な原子核の構造の解明をはじめ、原子核物理分野の最先端の研究発展に貢献できることが期待されます。とりわけ、ニュートリノレス二重ベータ崩壊における変形及び形状共存の効果が本研究で明らかとなりましたが、これは今後の NME の精密な予言値提供に繋がります。世界各地での関連する実験研究にも知見を提供することになり、原子核物理の枠を超えた、物理の基礎的な問題究明に寄与できることが期待されます。

【謝辞】

本研究は JSPS 科研費 JP25K07293 の助成を受けたものです。

論文情報

論文名	Configuration mixing effects on neutrinoless $\beta\beta$ -decay nuclear matrix elements (ニュートリノレス二重ベータ崩壊核行列要素への配位混合の効果)
著者名	野村昂亮 (北海道大学大学院理学研究院)
雑誌名	Physics Letters B (自然科学の専門誌)
DOI	10.1016/j.physletb.2025.139995
公表日	2025 年 10 月 30 日 (木) (オンライン公開)

お問い合わせ先

北海道大学大学院理学研究院 准教授 野村昂亮 (のむらこうすけ)

T E L 011-706-2684 メール nomura@sci.hokudai.ac.jp

U R L <https://nt.sci.hokudai.ac.jp/nomura/>

配信元

北海道大学社会共創部広報課 (〒060-0808 札幌市北区北 8 条西 5 丁目)

T E L 011-706-2610 F A X 011-706-2092 メール jp-press@general.hokudai.ac.jp

【参考図】

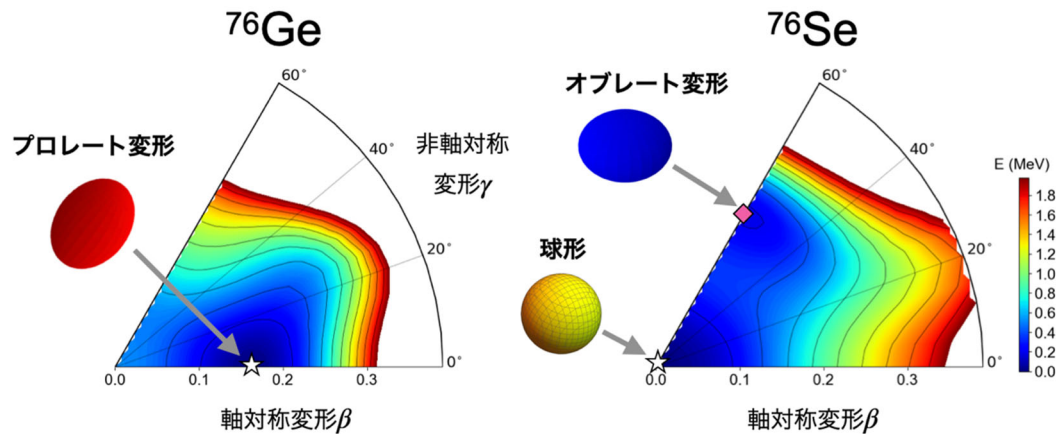


図 1. ^{76}Ge と ^{76}Se の、 (β, γ) 変形度空間内でのポテンシャル・エネルギー面を、最低エネルギー値を基準に等高線プロットしたもの（単位はメガ電子ボルト MeV）。 β は楕円体変形した原子核の対称軸方向への変形、 γ は軸対称からのずれ（非軸対称変形）を表す角度変数であり、0 度から 60 度の範囲で定義される。 $\gamma=0$ 度と 60 度でのエネルギー極小点はそれぞれプロレート変形、オブレート変形状態に、 $\beta=0$ の極小点は球形に対応する。 ^{76}Ge では単一のプロレート変形（星型シンボル）が起き、 ^{76}Se では球形の最小エネルギー点とオブレート変形（菱形）の局所最小点が共存していることが分かる。

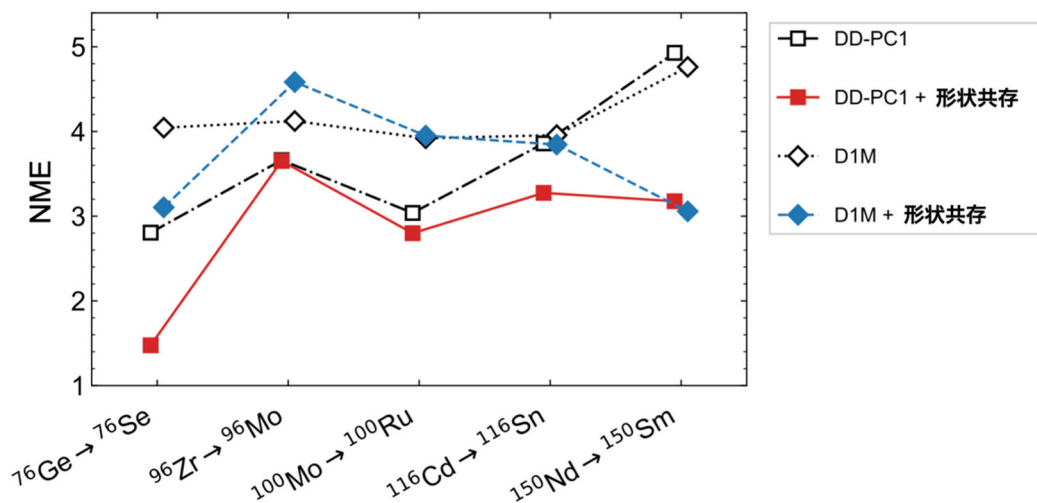


図 2. 本研究で得られたニュートリノレス二重ベータ崩壊 NME の予言値。四角、ダイヤモンドはそれぞれ、核子間相互作用 DD-PC1 及び D1M を用いた計算結果を表す。白抜きシンボルは形状共存の効果を考慮しない通常の計算結果を、赤の四角と青のダイヤモンドは、形状共存の効果をとり入れた計算結果を表す。NME は無次元化している。いずれの相互作用を用いた場合も、多くの崩壊過程において NME が減少していることが読み取れる。

【用語解説】

- *1 半減期 … 放射性崩壊によって原子核が元の半分の量になるまで崩壊する時間のこと。
- *2 基底状態 … 原子核は飛び飛びのエネルギーの値を持つが、そのうちの最低エネルギー状態のこと。
- *3 相互作用するボソン模型 (IBM) … 核子のペアを仮想的なボソンと呼ばれる粒子で表すことで原子核の構造を記述する模型のこと。

- *4 ベータ崩壊 … 原子核中の陽子が中性子に、または中性子が陽子に変換される核崩壊のこと。
- *5 偶偶核 … 原子核は陽子と中性子から構成されるが、陽子数、中性子数ともに偶数の原子核のこと。
- *6 ハミルトニアン … 量子力学において、系の全エネルギーを与える物理量のこと。
- *7 演算子 … 量子力学において物理量を表し、ある状態に作用することでそれを別の状態に変換する。