

奇核形状の相転移の微視的記述に初めて成功

～重元素合成メカニズム解明への貢献に期待～

ポイント

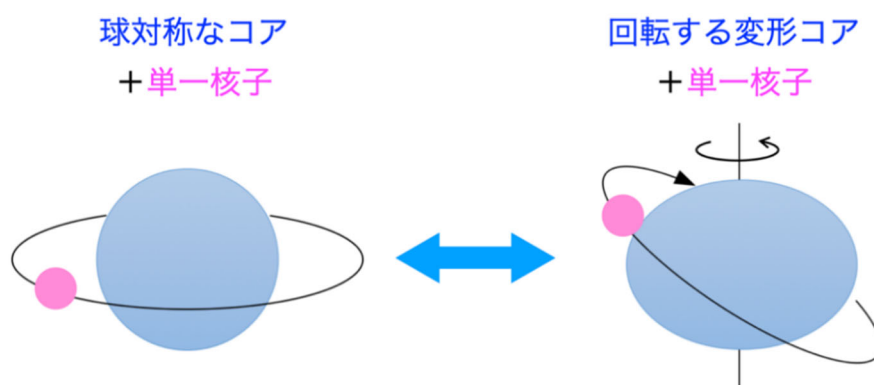
- ・奇核の分光学的性質を予言する新しい理論的手法を提唱。
- ・奇核における形状の相転移を現象論的補正なしに再現することに成功。
- ・宇宙初期の重元素合成のプロセスの理解の発展に期待。

概要

北海道大学大学院理学研究院の野村昂亮准教授らの研究グループは、微視的な核構造理論に基づいて、奇数個の核子数を持つ原子核・奇核の分光学的性質を計算するための新しい理論的手法を提唱しました。現在知られている数千種類の原子核のうちの大半は奇核であるにも関わらず、理論的な取り扱いが非常に困難であることから、研究があまり進んでいませんでした。本研究では、核子多体系の密度汎関数理論を出発点とすることで、奇核の現象論的なモデルである相互作用するボソン・フェルミオンモデル (IBFM) ^{*1} のパラメータを決定する方法論を開発しました。原子核は、表面が変形することによって形を持ちます。原子核の形状は核子数の増減に伴って変化しますが、急激に変化する場合があり、形状の相転移^{*2}と呼ばれます。奇核における形状相転移を、現象論的な補正を加えることなく再現することに初めて成功しました。本研究は、あらゆる核種の構造をミクロな理論に基づいて記述するための包括的な枠組みの構築を目指しており、今後は、宇宙初期における元素合成過程で重要な核変換や基本対称性の検証に関わる核崩壊の理論的予言への応用が期待されます。

なお、本研究成果は、2025年9月13日（土）公開の Physics Letters B 誌に掲載されました。

奇核における形状の相転移



陽子または中性子の数が奇数である奇核は、陽子数・中性子数ともに偶数の偶偶核をコアとし、それとペアに組んでいない独立な核子との結合を考えることで理解される。コアが球対称な場合と、楕円体変形して回転する場合があり、核子数の増減に伴ってそれらの間で形状の相転移と呼ばれる急激な遷移が起きる。ミクロな理論に基づき、奇核における形状相転移を再現することに初めて成功した。

【背景】

原子核は多数の核子（陽子と中性子）から構成され、ミクロな世界の理論である量子力学によって支配される量子多体系です。現在までに数千種類もの原子核の存在が示唆されていますが、陽子と中性子の数が共に偶数の「偶偶核」、陽子数または中性子数が奇数の「偶奇核」、陽子数・中性子が共に奇数の「奇奇核」の3種類に大きく分けられます。原子核の低エネルギー状態では、陽子と陽子、中性子と中性子がそれぞれペアを組むという描像が良い近似として用いられます。この近似の下、偶偶核の構造は様々な理論モデルによって研究されてきました。それに対し偶奇核・奇奇核（以下、まとめて奇核）では、このような核子のペアに加えて、ペアに組んでいない単独の核子の存在を考慮する必要があります。その理解は偶偶核と比べて非常に困難とされています。

原子核の理論研究では、あらゆる原子核の励起エネルギー^{*3}や電磁遷移^{*4}といった分光学的な性質を、微視的に（経験的知識に頼らずに）理解しようという試みが活発に行われています。現在までに知られている原子核の大半が奇核であるにも関わらず、こういった微視的な原子核構造研究のほとんどは偶偶核を対象としたものであり、奇核の構造に関するミクロな理論に基づいた理解はあまり進んでいませんでした。偶偶核、奇核の構造についての統一的な理論は、宇宙初期において重元素が合成されるプロセスで重要な役割を持つベータ崩壊^{*5}をはじめとした、核変換が起きる確率の予言に必要です。このような核変換に関する知見は、物質の起源は何かという物理学の基礎的な問いへの鍵を握るだけでなく、原子力工学分野への応用など、社会的実用の可能性もあります。

【研究手法】

本研究では、出発点として核子多体系の微視的理論の一つである「密度汎関数法（DFT）」を用いた量子多体計算を行いました。DFTは、原子核の表面変形、サイズ、質量といった巨視的な性質の記述を得意とし、ほぼ全ての原子核についてこれらの性質を精度よく予言することができます。DFTの枠組みで奇核の分光学的性質を計算することもできますが、現状では、比較的軽い（核子数の少ない）、特定の原子核への適用に限定されています。奇核の構造を記述するための現象論的なモデルである「相互作用するボソン・フェルミオンモデル（IBFM）」は、系のハミルトニアン^{*6}に含まれるパラメータを、実験データを再現するように決定することで、数多くの奇核の分光学的な性質を再現するのに大きな成功を収めてきました。IBFMのパラメータを、核子多体系DFTを用いて微視的に決定しようという試みが10年ほど前より野村准教授らによりなされてきましたが、部分的であり、全てのパラメータを経験的知識なしに決定するには至っていませんでした。このように、IBFMの適用範囲は実験データの存在する場合に限定され、実験的に知られていない奇核の構造を予言することができませんでした。

本研究は、核多体系のDFTをベースとすることで、IBFMモデルのハミルトニアンを微視的に導出する方法を提唱するものです。それは、原子核の物体固定座標系でのIBFMのエネルギー期待値と単一核子軌道のエネルギーを変形度の関数として求め、それらが、DFT計算から得られる対応する物理量を再現するように、IBFMのパラメータを決定するというものです。この手法は、偶偶核の場合に野村准教授らが2000年代後半に提唱した方法論の一部を用いていますが、奇核への拡張は本研究の完成を待つこととなりました。

【研究成果】

原子核は、複雑な量子多体系である反面、表面が変形することによってある「形」を持ちます。表面が変形すると、それは時間と共に振動します。あるいは、原子核全体がさらに大きく楕円体に変形

し、それが回転運動を起こす場合があります。これらは原子核を構成する多数の核子が関与するため集団運動と呼ばれます。核子数の関数として原子核の変形状態を解析すると、例えば球対称な形から楕円体変形した形に、原子核の形状が変化する現象が知られています。形状の変化はしばしば急激に起きることがあり、形状の相転移と呼ばれます。奇核における形状相転移を特徴付ける性質として、ある核子数を境に、最低エネルギー状態の角運動量^{*7}が変化するという現象が知られています。本研究では、新たに開発した理論的手法を、このような形状相転移の起きる典型的なケースであるユーロピウム同位体^{*8}に適用しました。図1は、理論計算によって得られた励起状態エネルギーと対応する実験データを、中性子数の関数として示したものです。図から、中性子数90の核種で、最低エネルギー状態の角運動量が増加していることが分かります。このように、現象論的な補正を加えることなく奇核の形状相転移を再現することに、初めて成功しました。

【今後への期待】

本研究は、実験的に未開拓な奇核の分光学的性質に関して、定量的な理論的予言を可能とします。これは、世界中の大型加速器施設における、短寿命核ビームを用いた実験研究に対して有用な指針を提供することに繋がります。これらの実験研究では、元素合成プロセスにおいて重要な重い（核子数の多い）偶偶核・奇核が研究対象となっています。本研究は、そのような原子核をミクロな理論に基づいて包括的に記述するための枠組みを提供するものです。将来的には、元素合成に関わる核変換の確率の予言など、物理の基礎的な問題解明への応用が期待されます。

【謝辞】

本研究は JST SPRING JPMJSP2119、及び JSPS 科研費 JP25K07293 の助成を受けたものです。

論文情報

論文名	Microscopic determination of the interacting boson-fermion model Hamiltonian from the nuclear energy density functional (原子核密度汎関数法を用いた相互作用するボソン・フェルミオン模型ハミルトニアンの微視的決定)
著者名	本間雅也 ¹ 、野村昂亮 ² (¹ 北海道大学大学院理学院、 ² 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)
D O I	10.1016/j.physletb.2025.139880
公表日	2025年9月13日(土)(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】

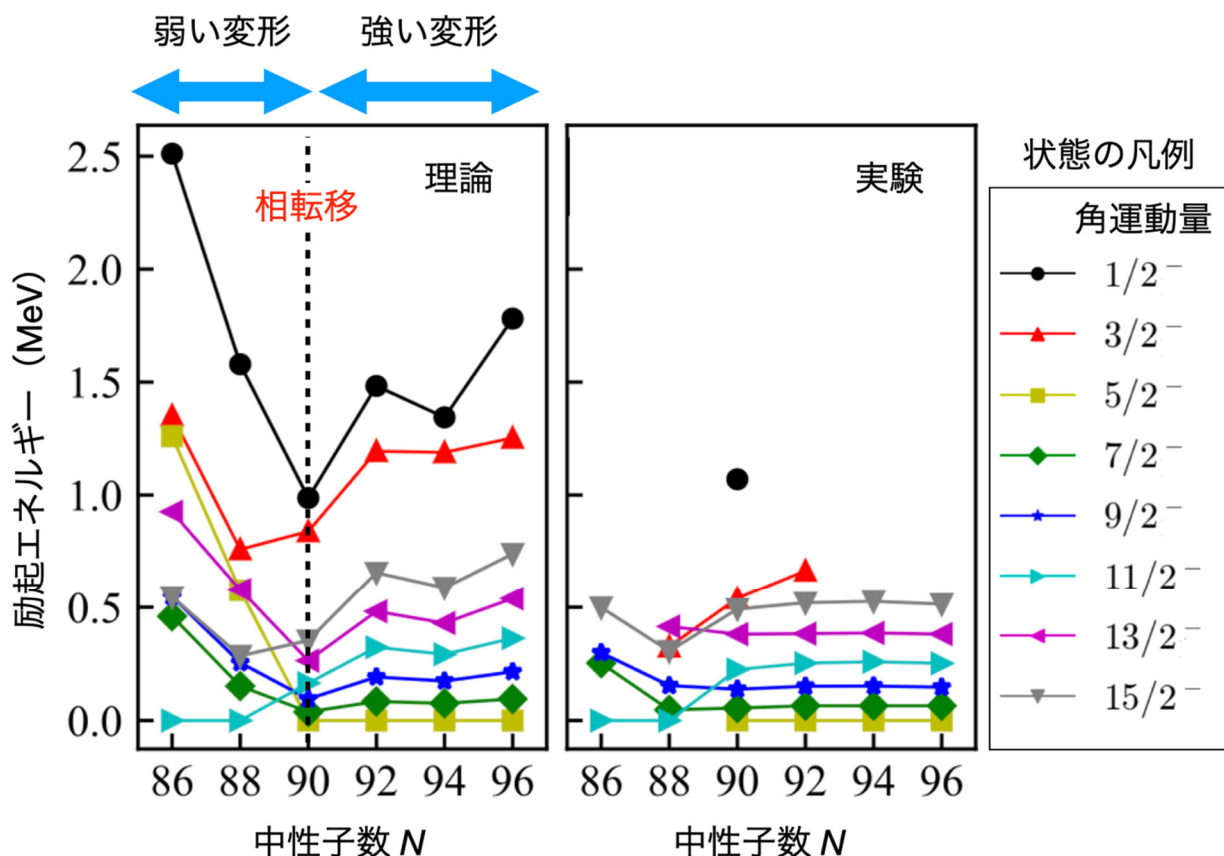


図1. 左図は、陽子数（ Z ）が奇数（ $Z=63$ ）、中性子数（ N ）が偶数のユーロピウム同位体に関して、本研究の理論計算で得られた励起状態のエネルギーを N の関数としてプロットしたもの。エネルギーの単位は MeV（メガ電子ボルト）。凡例で示したシンボルは、 $1/2^-$ 、 $3/2^-$ 、...など半整数の角運動量を持つ異なる励起状態を表す。角運動量の右肩のマイナス記号は、空間反転を表すパリティと呼ばれる量である。 $N=86$ 及び 88 の同位体では、角運動量 $11/2^-$ を持つ状態が最低エネルギーであるが、これらの同位体は変形が小さく球対称に近い相と考えられる。 N が 90 より大きな同位体では、角運動量 $5/2^-$ を持つ状態が最低エネルギーであり、これらは強く変形した相にある。さらに、角運動量 $7/2^-$ や $9/2^-$ を持つ状態のエネルギーも $N=86\sim90$ にかけて急激に下がっていることが読み取れる。 $N=88\sim90$ にかけての、このような励起エネルギーの急激な変化は奇核同位体における形状の相転移を示唆している。右図は対応する実験データを表しており、理論計算で概ね良く再現されていることが分かる。

【用語解説】

- *1 相互作用するボソン・フェルミオン模型（IBFM） … 核子のペアを仮想的なボソンと呼ばれる粒子で表し、ペアに組んでいない核子（フェルミオン）との結合を考慮することにより奇核の構造を記述する原子核模型のこと。
- *2 相転移 … 系のある相から、別の相に変化する現象で、様々な物理系で見られる。
- *3 励起エネルギー … 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の状態と、それよりも高いエネルギーの状態とのエネルギー差を励起エネルギーと呼ぶ。
- *4 電磁遷移 … 異なるエネルギーを持つ量子力学的な状態間で、電磁気的な相互作用によって起きる遷移のこと。

- *5 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。
- *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 角運動量 … 原子核の回転の向きと強さを表す量で、飛び飛びの整数または半整数値を取る。
- *8 同位体 … 陽子数が共通で、中性子数の異なる原子核のこと。