

令和元年6月20日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17687

研究課題名(和文) 密度汎関数法による重い不安定核のスピン・アイソスピン応答の微視的かつ系統的記述

研究課題名(英文) Microscopic and systematic description of the spin-isospin responses of heavy neutron-rich nuclei in density-functional theory

研究代表者

吉田 賢市 (Yoshida, Kenichi)

京都大学・理学研究科・助教

研究者番号：00567547

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：核子の自由度を基にした微視的な量子多体理論である原子核密度汎関数法により、主に原子番号が魔法数を持つ中性子過剰核におけるスピン・アイソスピン応答を系統的に調べた。不安定核では中性子と陽子のフェルミ面が大きく異なり低いエネルギー領域に新しいタイプの状態が現れると予想できるため、負パリティ型の振動モードに着目した。核子の超流動性を反映した中性子数依存性に見られる特徴や、ピグミー共鳴にアナログな状態が現れるなどの新しい知見が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

中性子過剰核における新しいタイプの集団運動の発現可能性は、原子核物理学における重要なテーマの一つである。本研究では、これまで研究が進んでいなかった中性子過剰核のスピン・アイソスピン応答を微視的な理論枠組みを用いて調べることで、新しい励起モードを予言することができた。これらのモードはベータ崩壊にも影響を与える可能性が高く、重元素の起源とされるrプロセス元素合成過程のより深い理解にも貢献できる。

研究成果の概要(英文)：A systematic investigation on the spin-isospin responses in neutron-rich nuclei have been made. Nuclear energy-density functional method, a microscopic quantum many-body theory in terms of the nucleonic degree of freedom, was applied. Due to the imbalance of the chemical potentials of neutrons and protons, the negative-parity modes are expected to occur in low energy. The microscopic calculation revealed the unique roles of the superfluidity on the appearance of low-lying dipole modes and predicted the occurrence of the analog of the pygmy dipole mode.

研究分野：原子核構造

キーワード：中性子過剰核 スピン・アイソスピン応答 密度汎関数理論 ベータ崩壊

1. 研究開始当初の背景

理研の RI ビームファクトリー (RIBF) をはじめ、欧米で建設中、またアジア各国でも計画されている新世代の不安定核ビーム実験施設の稼働によって、中性子過剰なエキゾチック核の研究は、これまで軽い領域に限られていたものが、質量数 50 以上の中重核へと拡がる。そこではいよいよ、スピン、アイソスピン、励起エネルギーなどを変数とする核子多体系の物性研究が可能となる。物質の中心にあるミクロな原子核に対してより深い理解が得られるよう、実験的・理論的に新しい手法の開発を進めていかなければならない。特に理論的には、広い質量数領域にある原子核の量子構造 (基底状態、低励起状態、巨大共鳴状態の性質) を微視的かつ統一的に記述できる枠組みの開発が必要となる。

核子の自由度を出発点とする微視的な核構造模型のうち、リーズナブルな計算機資源で多くの原子核の量子構造を系統的に記述可能であるとされるエネルギー密度汎関数法は、世界的に注目を浴び、多くの理論的・計算科学的研究がなされている。大型計算機及び計算手法の開発により、原子核の質量や変形などの静的性質は、存在が予想されているほとんど全ての領域にある原子核に対して記述可能となってきた。そのような状況の中で、励起モードなどの動的性質を記述するための理論の基礎付けや新しい計算手法の開発に、研究の重点がシフトしている。特に、線型応答計算 (QRPA 法) による集団モードの微視的記述に関しては、近年目覚ましい発展がある。

魔法数から離れた原子核の多くは多体相関により四重極変形しており、広い質量数領域にある原子核の系統的な性質を調べるためには、平均場の変形を考慮に入れることが最も重要である。また、魔法数から離れた原子核において原子核の形を支配するのが核子の超流動性 (対相関) である。対相関は四重極モードのソフト化に本質的な役割を果たしており、変形核におけるベータ振動や集団的回転モードの慣性率の定量的記述にも必須である。さらに、不安定核を記述するにあたり新たな課題として、フェルミ面の浅いドリップ線近傍核では、束縛状態のみならず連続エネルギー状態も含めた対相関を考える必要がある。世界的には、密度汎関数法に基づく変形核・超流動核を含めて広い質量数領域にある不安定核のスピン・アイソスピン応答計算コードの開発に成功しているのは、本研究代表者の他、米国ノースカロライナ大、フランス原子力庁 DAM イルドフランスの 3 グループである。

2. 研究の目的

近年の密度汎関数法に基づく理論的研究の発展により、不安定核におけるスピン・アイソスピン応答の微視的理解を進めることが可能になってきた。そこで、近い将来の実験で期待される、重い不安定核のスピン・アイソスピン応答を理論的に調べる。具体的には、微視的なエネルギー密度汎関数アプローチによる、広い質量数領域にある不安定核を対象とした線型応答の系統的記述を通して、スピン・アイソスピン空間での集団モードの一般的性質を明らかにする。スピン・アイソスピン応答のみならず、アイソスピンを変化させない集団モードに関しても同様の線型応答計算で記述できるため、それも合わせて研究を行い、最新の実験と比較しながら重い不安定核の集団モードの微視的理解を目指す。また、計算のインプットとなるエネルギー密度汎関数の微視的構築を進め、原子核密度汎関数法をより信頼性の高い理論枠組みへと高度化する。さらに、世界に先駆けた大規模数値計算により、天体物理・元素合成シミュレーションに活用される微視的かつ信頼性の高い弱い相互作用の核反応率データを提供することで、元素合成過程の解明に貢献することを大きな目標に掲げ、その準備として本研究を位置付ける。

3. 研究の方法

計算のインプットとなるエネルギー密度汎関数には、スキルム型と呼ばれるものを用いる。複数のパラメーターセットが広く用いられているが、原子核の変形や中性子過剰核の構造計算によく用いられているもの、さらにスピン・アイソスピン励起モードのうち実験的によく知られたガモフ・テラー共鳴の記述を意識して作られたものを用いる。これまでの研究で開発した線型応答計算コードを拡張して、負パリティの励起状態も記述できるようにする。変形した原子核では軌道角運動量は良い量子数では無い。したがって、軌道角運動量そのものではなくその対称軸成分が良い量子数をもつ状態を基底とする計算コードを開発してきた。しかし、軌道角運動量とスピンの両方が有限の大きさを持つ励起モードを記述するのに、単純にそのような基底を用いる場合には異なる全角運動量および軌道角運動量を持つ励起モードが一つの状態に混ざってしまう。そこで、全角運動量と軌道角運動量を指定する形での演算子を定義して計算コードに組み込む。これは、ベータ崩壊率 (第一禁止遷移) の計算に必要な、スピン双極子型の励起モードの記述に必要となる。

4. 研究成果

- (1) 密度汎関数理論においてエネルギー密度汎関数(EDF)をハミルトニアンあるいはラグランジアンから出発して微視的に構築することは長年の課題である。この試みは *ab*

initio-DFT と呼ばれ、その研究は世界的に盛り上がりを見せようとしている。密度場に対する有効作用が EDF の拡張になっている点に着目し、収束が保証されている汎関数積分の非摂動的な計算手法の一つで、場の理論で発展してきたフロー方程式の理論である汎関数くりこみ群を用いて EDF を構築することを試みた。系の基底状態のエネルギーを密度の (汎) 関数にするためにフローする化学ポテンシャルを導入することで、無限一様系に対する基礎方程式を初めて導出した。具体的な適用として、一次元核子系に対する EDF すなわち状態方程式を得た。モンテカルロ法との比較から飽和エネルギーを定量的に再現することを示し (論文 1), また励起状態においては非線形 Tomonaga-Luttinger 液体の特徴を記述できることを示した (論文 2)。

- (2) アイソスピンの関与する励起モードは一般にアイソベクトル型と呼ばれ、中でもよく研究されているアイソベクトル双極子励起には、高いエネルギー領域にある巨大双極子共鳴(GDR)のほか低エネルギー領域にピグミー共鳴(PDR)と言われる状態が存在する。GDR と異なり PDR の構造は未解明であり、現在も多くの研究がなされている。本研究では、アイソベクトル型励起の中でも荷電交換するチャンネルに着目し、アイソスピン対称性の観点から理解を深めることができた。議論を単純にするため球形な原子核、すなわち陽子数について魔法数をもつ Ca, Ni, Sn 同位体に対して、ドリップ線近くまでの系統的な計算を行った。なお、中性子に関しては超流動性を考慮に入れており、変形解が存在する場合には球形に拘束条件を掛けた。得られた結果は大きく 3 点ある (論文 3)。①どの原子核にも巨大共鳴が現れ、遷移密度の分析から GDR にアナログな状態(AGDR)である。②中性子数がある値になったとき、これは中性子のフェルミ面が軌道角運動量の小さな一粒子軌道の近くにあるとき、AGDR よりもエネルギーの低い領域に肩構造のような共鳴状態が現れる。遷移密度の構造は複雑であり、アイソベクトルとアイソスカラー成分が混じっている。これらは PDR に特徴的であり、これにアナログな APDR と呼べる状態を初めて見つけた。③中性子のフェルミ面付近に特定の軌道が存在するとき、低エネルギー領域にさらに新しい励起状態が現れる。これは、中性子の超流動性にも敏感な新しい励起モードである。このモードはベータ崩壊に関与する可能性があり、元素合成過程の理解のためにも重要である。
- (3) 理研で最近得られた希土類領域の不安定核の崩壊実験結果を説明するとともに、更に中性子が過剰な原子核における励起状態の予言を行った。陽子数・中性子数ともに魔法数から離れた原子核では、核子間の相関(単純な球形平均場には取り込めなかった残留相互作用)が最強となり、様々な対称性が自発的に破れた状態がエネルギー的に安定化する。このような原子核は中性子過剰で不安定である場合が多く、実験的にもそのような原子核での集団運動の性質を調べることに興味を持たれてきた。理研 RIBF の EURICA 国際プロジェクトでは、質量数が 170 程度の中性子過剰な希土類原子核のベータ崩壊・ガンマ崩壊を通じた核分光研究が行われた。特に、陽子数 66 を持つジスプロシウムの同位体 (^{172}Dy) では、極めてエネルギーの低い集団振動状態と思われる励起状態が報告された。そこで、幾つかのスキルム型エネルギー密度汎関数を用いた線型応答計算を遂行し、非軸対称変形の方に振動する集団モードであるガンマ振動の励起エネルギーの中性子数依存性が、実験での測定値を見事に再現した。そこでは中性子・陽子ともにフェルミ面近傍の殻構造が集団モード形成に支配的な役割を果たしていることを明らかにした。そのような微視的メカニズムに基づくと、更に中性子過剰になれば、より集団性が強くなることを予言した (論文 4)。また、実験の解析やデータの解釈にも本研究の計算結果が用いられた (論文 5)。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① T. Yokota, K. Yoshida, and T. Kunihiro, “Functional renormalization-group calculation of the equation of state of one-dimensional uniform matter inspired by the Hohenberg-Kohn theorem”, *Physical Review C* (査読有), Vol. 99, 2019, 024302 (10 pages).
<http://10.1103/PhysRevC.99.024302>
- ② T. Yokota, K. Yoshida, and T. Kunihiro, “*Ab-initio* description of excited states of 1D uniform matter with the Hohenberg-Kohn-theorem inspired functional-renormalization-group method”, *Progress of Theoretical and Experimental Physics* (査読有), Vol. 2019, 2019, 011D01 (10 pages).
<http://10.1093/ptep/pty139>
- ③ K. Yoshida, “Charge-exchange dipole excitations in neutron-rich nuclei: $-1\hbar\omega_0$, anti-analog pygmy and anti-analog giant resonances”, *Physical Review C* (査読有), Vol. 96, 2017, 051302(R) (5 pages).
<http://10.1103/PhysRevC.96.051302>
- ④ K. Yoshida, H. Watanabe, “Enhanced collectivity of gamma vibration in neutron-rich

Dy isotopes with N=108-110”, Progress of Theoretical and Experimental Physics (査読有), Vol. 2016, 2016, 113D02 (10 pages).

<http://10.1093/ptep/ptw173>

- ⑤ H. Watanabe, G. X. Zhang, K. Yoshida 他 4 8 名, “Long-lived K isomer and enhanced gamma vibration in the neutron-rich nucleus ^{172}Dy : Collectivity beyond double midshell”, Physics Letters B (査読有), Vol. 760, 2016, pp641-646.
<http://10.1016/j.physletb.2016.07.057>

〔学会発表〕 (計 22 件)

- ① 吉田賢市, “Nuclear density-functional theory for weak matrix elements”, KEK 研究会「ニュートリノ原子核反応とニュートリノ相互作用」, 2019.
- ② K. Yoshida, “Analog pygmy-dipole resonance and low-lying charge-exchange dipole state in neutron-rich nuclei”, The 6th International Conference on Collective Motion in Nuclei under Extreme Conditions, 2018.
- ③ K. Yoshida, “Spin-isospin responses in low-energy: roles of many-body correlations”, RIKEN iTHEMS Interdisciplinary symposium on modern density functional theory - iDFT, 2017.
- ④ K. Yoshida, “Roles of neutron excess and deformation on charge-exchange collective modes of excitation”, YITP workshop ‘Recent Progresses in Nuclear Structure Physics 2016’, 2016.
- ⑤ K. Yoshida, “Low-lying excitations in neutron-rich nuclei: Effects of deformation and pairing”, The First Tsukuba-CCS-RIKEN joint workshop on 'Microscopic theories of nuclear structure and dynamics', 2016.

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号 (8 桁)：

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。