

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：13101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23740223

研究課題名(和文)原子核密度汎関数法に基づく中重不安定核の系統的線型応答計算

研究課題名(英文) Systematic linear-response calculations of medium-heavy unstable nuclei in a nuclear energy-density-functional approach

研究代表者

吉田 賢市 (YOSHIDA, Kenichi)

新潟大学・自然科学系・助教

研究者番号：00567547

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：天然には安定に存在しない原子核(不安定核)を含む広い質量数領域にある原子核の集団モードを微視的に記述するため、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のコードを構築・整備し、大規模並列計算機を用いて系統的計算を遂行した。実験データが豊富にある希土類原子核における種々の応答計算から、用いるエネルギー密度汎関数の信頼性を確認し、更に巨大共鳴状態の性質から無限核物質の性質を引き出すことに成功した。また、中性子陽子間の対相互作用を適切に選ぶことにより、変形した中性子過剰核のベータ崩壊率を定量的・系統的に記述できることを世界で初めて示した。

研究成果の概要(英文)：A new calculation scheme based on a Skyrme-energy density functional (EDF) was developed and applied to systematic calculation of linear responses of nuclei in a wide mass region. It was shown that the Skyrme EDF is able to reproduce well the giant multipole resonances in the stable rare-earth nuclei, in which lots of experimental data are available. Then, the nuclear matter properties such as incompressibility were extracted through the excitation energies of giant resonances. Furthermore, the calculation scheme was extended to describe the spin-isospin responses. It was shown that beta-decay rates of deformed neutron-rich nuclei relevant to the r-process nucleosynthesis could be produced quantitatively with a proper choice of the proton-neutron pairing interaction.

研究分野：原子核理論

キーワード：集団運動 原子核密度汎関数法 乱雑位相近似法 核子対相関

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、欧米でも建設中の次世代の不安定核ビーム実験施設が本格的に稼働を開始すると、不安定核の研究は、それまで軽い領域に限られていたものが、中重核へと広がる。そこではいよいよ、アイソスピン・励起エネルギー・スピンなどを変数とする原子核の物性研究が可能となり、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・モデル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。

2. 研究の目的

原子核密度汎関数法に基づいた自己無撞着線型応答計算を、陽子ドリップ線から中性子ドリップ線、質量数 20 程度の軽い原子核から重い原子核まで系統的に行い、低励起集団モード及び巨大共鳴状態を微視的に記述する。なお、基底状態に関しては、既に世界中で系統的な計算が行われており本研究では、より高度な理論モデル・計算技術が必要な励起状態の微視的・系統的記述に重きを置く。更に、それら計算結果から、エネルギー密度汎関数の改良にユニークな寄与を果たすことを目的とする。現在利用可能な大型計算機を最大限に利用するとともに、次世代スーパーコンピュータによる大規模並列計算のアプリケーションとなることを目指した計算コードを開発することも目指す。

3. 研究の方法

原子核密度汎関数法に基づく線型応答計算の手法は、Random Phase Approximation (RPA) 法として知られている。これは、particle-hole 励起の重ね合わせにより集団的な励起状態を記述するものである。安定核ではフェルミレベルが深いため、振動モードの記述には通常、励起する particle に対しても束縛状態近似(調和振動子ポテンシャルに閉じ込めるなどして得られる)が用いられる。ところが、核子が弱く束縛された不安定核ではフェルミレベルがゼロに近い場合、particle は連続エネルギー状態に容易に励起する。従って、束縛状態と連続エネルギー状態との間の結合を陽に取り扱わなければならない。それ故、重い不安定核に特有な集団励起モードの発現可能性を追究し、それらの性質を定量的に予測するには、閾値を超える連続エネルギー状態への励起を考慮に入れた理論枠組みが必要である。

また、密度汎関数法に基づく RPA 法を、ドリップ線近傍核を含む不安定核に適用するためには、上の「連続エネルギー状態との結合」の他に、次の 3 点を考慮に入れる必要がある: 原子核(平均場)の変形、超流動性・対相関、及び静的(基底状態の記述)及び動的

(励起状態の記述)計算における相互作用の自己無撞着性である。本課題では、申請者がこれまでに開発してきた Skyrme 型エネルギー密度汎関数を用いたこれら 4 点を満足する理論枠組みを用いた。また、多数の原子核の線型応答計算が効率良く遂行できるように並列化を行った。実際の計算には「京」を含む理化学研究所・京都大学基礎物理学研究所・筑波大学計算科学センターの大型計算機を用いた。

4. 研究成果

(1) 原子核の形状変化に伴う巨大共鳴状態の性質の変転と核物質の理解

巨大共鳴は原子核の典型的な集団モードであり、原子核全体がその運動に関与することから核物質の性質とも関係する。また、核変形に伴う共鳴状態の性質の変化は、多くの理論的・実験的研究の対象として興味を持たれている。マクロスコピックな理論モデルによる定性的理解は進んできたが、定量性も含めた包括的な理解には微視的な理論手法が必要である。

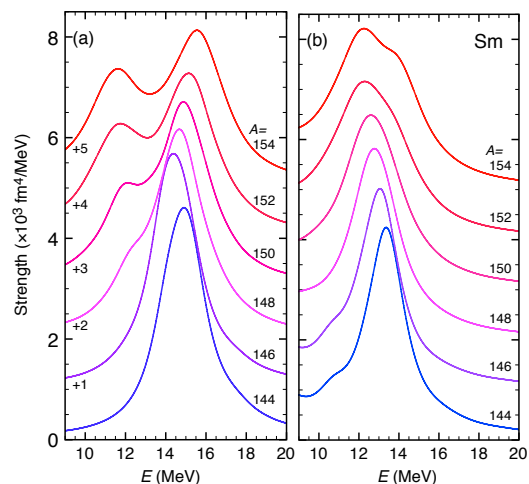


図 1 : Sm 同位体における(a)アイソスカラー型巨大単極共鳴状態と(b)アイソスカラー型巨大四重極共鳴状態

安定性近傍にある Sm や Nd などの希土類原子核は、中性子数の変化とともに形状が球形からプロレート変形に緩やかに変化することが知られている。本課題の前段階の研究でアイソベクトル型巨大双極共鳴は、変形の発現によって共鳴のピークが二つに分裂し、変形の発達によってそのエネルギー差が大きくなることを世界で初めて微視的に再現するのに成功した。本課題では、アイソスカラー型並びにアイソベクトル型単極・双極・四重極・八重極巨大共鳴状態の記述を系統的に行った。図 1 はその一例(アイソスカラー型単極・四重極応答)である。中性子数が 82 のときは、魔法数であることを反映して球形であり、四重極共鳴状態は単一の幅の狭いピーク構造を示す。中性子数 86 で変形が発現し、

更に中性子数が増大すると共鳴幅は大きくなる。しかし、アイソベクトル型巨大双極共鳴で見られた「変形による共鳴ピークの分裂」は見られない。これは、変形によって分裂する3つの量子状態(角運動量の対称軸成分である K 量子数で分類される)のエネルギー差が球形核での共鳴状態の幅に比べて十分大きくないためである。最も大きな変形を示す ^{154}Sm でも K 分裂エネルギーは 2.8 MeV であり、実験的に測定されている結果と矛盾しない。

一方、単極共鳴は変形の発現・発達に伴い、2ピーク構造が顕著になる。単極共鳴では $K=0$ の状態しかないため、変形によって K 分裂が起きることはない。この2ピーク構造は、回転対称性の破れに伴う角運動量の混じりによるものであり、特に四重極共鳴の $K=0$ の成分の混合によるものである。変形が大きく発達するほど、四重極共鳴状態との混合が大きくなる。

以上のように、多核子ダイナミクスの微視的記述・理解が進化したのと並行して、異なる核物質の性質を与える複数のエネルギー密度汎関数を用いた系統的計算を遂行することにより、原子核の共鳴エネルギーから圧縮率・有効質量など核物質の情報を引き出せることを示した。

(2) 中性子過剰変形核におけるスピン・アイソスピン応答とベータ崩壊率

中性子過剰核における集団モードの研究は、余剰中性子の関与する新奇ダイナミクスの発現や中性子過剰核物質の理解などへ向けて、世界中で活発に行われている。また、原子核物理のみならず中性子星の構造・ダイナミクス、元素合成の解明など宇宙物理との関連も大きい。

最近理研 RIBF において、元素合成 r -過程に関与する中性子過剰 Zr 同位体のベータ崩壊率の系統的測定がなされた。元素合成 r -過程に関与する不安定核は、その多くが変形している可能性が指摘され、また中性子は弱く束縛されているので波動関数の空間的広がりを適切に取り扱う必要がある。世界的に見て、この条件を満足する理論枠組みを持っているのは我々を含む少数のグループのみであり、元素合成の理解にユニークな貢献ができる。

まず、ベータ崩壊率を微視的に求めるために原子核のスピン・アイソスピン応答を計算するコードを新しく作った。これにより、Skyrme エネルギー密度汎関数を用いて、変形した不安定におけるフェルミ型並びにガモフテラー(GT)型の遷移強度分布関数を得ることができるようになった。図2は、中性子過剰 Zr 同位体の GT 遷移強度分布関数から、フェルミの黄金律を用いて得られたベータ崩壊率の計算例である。半減期には、中性子と陽子の間にはたらくアイソスカラー型対

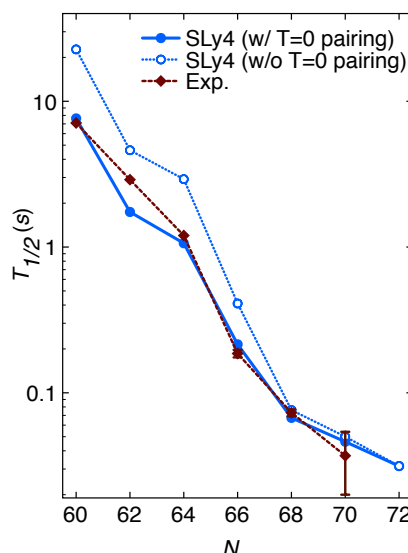


図2：中性子過剰 Zr 同位体のベータ崩壊半減期の理論値と実験値の比較。実線と点線は、アイソスカラー型対相互作用の有無による理論計算値の違いを表す。

相互作用が重要な役割を果たしていることが分かった。特に、GT 励起の選択則を満足する状態がフェルミ面近傍にあり、少なくとも中性子又は陽子が超流動状態にあるときには、半減期を数十倍短くすることがあることを見出した。これは、アイソスカラー型並びにアイソベクトル型対相関の協働現象である。核内でのアイソスカラー型対相関は未解明の部分が多く、この観点から低励起 GT 励起モードの微視的構造やベータ崩壊について今後研究が進展することが期待できる。

(3) 中性子-陽子対相関によって生み出される新しい集団モード

対相関は原子核の低エネルギーダイナミクスにおいて重要な役割を果たす。閉殻構造を持つ原子核では揺らぎ(対振動)として、その相関の大きさを見ることができる。また、開殻構造をもつ原子核では、有限の対ギャップエネルギーをもつ超流動状態がエネルギー的に安定になる。したがって、閉殻原子核での対振動は超流動相への前駆現象あるいはソフトモードと見なすことができる。

アイソベクトル型($T=1$)・スピン三重項の対相関については実験的・理論的にもよく研究され、理解が深まってきている。近年の Rare Isotope ビーム加速器技術の進展により、重い $N=Z$ 核に興味を持たれている。ここでは、中性子と陽子ともにフェルミ面近傍の殻構造が似ており、一粒子状態波動関数の空間的重なりが大きいことから、中性子-陽子対相関が重要になる可能性があるとの指摘がある。また、核力の特徴からアイソスカラー型($T=0$)・スピン三重項の新奇超流動相の発現可能性が注目を集めている。これまでの研究では、どの領域の原子核においてスピン三

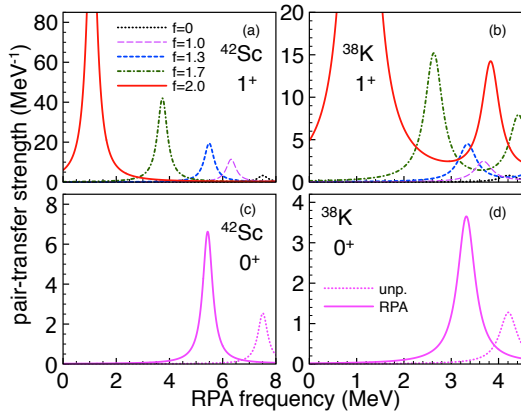


図3: ^{40}Ca における T=0 型の(a)対付加及び(b)対除去遷移強度分布関数と T=1 型の(c)対付加及び(d)対除去遷移強度分布関数。T=0 型分布関数には、中性子-陽子対相互作用の強度 f を変化させている。なお、係数 f は T=1 対相互作用の強度との比である。

重項超流動状態がエネルギー的に安定に存在するかに重きが置かれてきた。

本研究では、閉殻構造をもつ ^{40}Ca 核における中性子-陽子対付加並びに対除去モードを調べることで、中性子-陽子対凝縮相へのソフトモードの発現可能性を追究した。

図3には、対移行遷移強度分布関数を示す。T=0 チャネルの二体の対相互作用強度を大きくするほど、励起モードのエネルギーの低下と遷移強度の増大が見られる。ある程度以上に相互作用強度を大きくすると解が不安定になり、これは T=0 対凝縮相がエネルギー的に安定に存在することを示唆する。したがって、奇奇核(^{38}K や ^{42}Sc)の低励起 1^+ 状態は、T=0 凝縮相へのソフトモードであると解釈することができる。

本研究では、世界で初めて T=0 型の対振動モードの発現可能性を議論し、T=0 対凝縮相の発現そのものではなく前駆現象に焦点を当てることにより、より多くの原子核から T=0 対相関の情報が得られることを示した。

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 12 件)

- ① K. Yoshida
 “Proton-neutron pairing vibrations in N=Z nuclei: Precursory soft mode of isoscalar pairing condensation”
 Physical Review C 90, 2014, 031303(R) (5 pages), 査読有
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.90.031303>
- ② K. Yoshida
 “Spin-isospin response of deformed neutron-rich nuclei in a self-consistent Skyrme energy-density functional

approach”

Progress of Theoretical and Experimental Physics 2013, 2013, 113D02 (17 pages), 査読有
 doi: 10.1093/ptep/ptt091

- ③ K. Yoshida, T. Nakatsukasa
 “Shape evolution of giant resonances in Nd and Sm isotopes”
 Physical Review C 88, 2013, 034309 (15 pages), 査読有
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.88.034309>
- ④ K. Sato, N. Hinohara, K. Yoshida, T. Nakatsukasa, M. Matsuo, and M. Matsuyanagi
 “Shape transition and fluctuations in neutron-rich Cr isotopes around N=40”
 Physical Review C 86, 2012, 024316 (10 pages), 査読有
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.86.024316>
- ⑤ N. Hinohara, K. Sato, K. Yoshida, T. Nakatsukasa, M. Matsuo, and M. Matsuyanagi
 “Shape fluctuations in the ground and excited 0^+ states in $^{32,34,36}\text{Mg}$ ”
 Physical Review C 84, 2011, 061302(R) (5 pages), 査読有
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.84.061302>
- ⑥ K. Yoshida, N. Hinohara
 “Shape changes and large-amplitude collective dynamics in neutron-rich Cr isotopes”
 Physical Review C 83, 2011, 061302(R) (5 pages), 査読有
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.83.061302>

[学会発表] (計 33 件)

- ① K. Yoshida
 “Giant multi-pole responses in rare-earth nuclei with shape changes”
 International Workshop on Nuclear Science and Simulation in fundamental and applied researches
 2014 年 10 月 31 日, Ton Duc Thang University, Ho Chi Minh City, Vietnam
- ② K. Yoshida
 “Skyrme EDF for charge-changing excitation modes”
 ICNT Workshop “Physics of exotic nuclei: Theoretical advances and challenges”
 2014 年 6 月 13 日, RIKEN, Wako, Saitama
- ③ K. Yoshida
 “Low-lying Gamow-Teller Excitations and Beta-Decay Properties of Neutron-Rich Zr Isotopes”

The second International Conference
on Advances in Radioactive Isotopes
Science

2014年6月6日, University of Tokyo

④ K. Yoshida

“Shape evolution in Skyrme
energy-density functional method”

IN2P3-BLTP Workshop “Recent
Achievements in Nuclear Theory”

2013年7月23日, Bogoliubov
Laboratory of Theoretical Physics,
JINR, Dubna, Russia

⑤ K. Yoshida

“Skyrme energy-density functional
approach to collective modes of
excitation in exotic nuclei”

5th International Conference on
“Fission and properties of neutron-rich
nuclei”

2012年11月8日, Sanibel Island,
Florida, USA

⑥ K. Yoshida

“Skyrme energy density functionals for
nuclear collective dynamics”

KITPC Program From nucleon
structure to nuclear structure and
compact astrophysical objects

2012年6月20日, KITPC, Beijing,
China

⑦ K. Yoshida

“Collective excitation in exotic nuclei”

YKIS2011 Symposium on Frontier
Issues in Physics of Exotic Nuclei

2011年10月11日, YITP, Kyoto
University

⑧ K. Yoshida

“Collective modes of excitation in
deformed neutron-rich nuclei”

The first International Conference on
Advances in Radioactive Isotopes
Science

2011年5月31日, Leuven, Belgium

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 賢市 (YOSHIDA, Kenichi)

新潟大学・自然科学系・助教

研究者番号: 00567547