

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540294

研究課題名(和文)原子核密度汎関数理論で解明する弱束縛中性子の集団ダイナミクス

研究課題名(英文)Collective dynamics of weakly bound neutrons studied with nuclear density functional theory

研究代表者

松尾 正之(Matsuo, Masayuki)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：70212214

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円、(間接経費) 1,110,000円

研究成果の概要(和文)：原子核密度汎関数理論を用い、構成中性子の束縛エネルギーが小さい中性子過剰原子核に出現すると考えられる特徴的な集団ダイナミクスについて以下の3つの課題から研究を実施した。対振動モードの異常性とそれに付随する中性子対移行振幅の特徴を解明した。r過程元素合成にかかわる中性子直接捕獲反応断面積を記述できる連続状態乱雑位相近似を開発した。中性子ドリップライン近傍核のダイニュートロン相関の発現機構を解明した。

研究成果の概要(英文)：Using the nuclear density functional theory, we have studied collective dynamics which high emerge in neutron-rich nuclei containing neutrons with small binding energy. We have clarified anomalous behaviors of the pair vibrational mode and associated neutron-pair transfer amplitude. We have developed a continuum quasiparticle random phase approximation designed to describe the direct neutron capture cross section relevant to the r-process nucleosynthesis. We have clarified the microscopic mechanism of the di-neutron correlation in near-drip-line nuclei.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：弱束縛原子核 対振動モード ダイニュートロン相関 中性子過剰核 連続状態QRPA理論

1. 研究開始当初の背景

(1) 質量数 $A=132$ 以上の中性子過剰 Sn 同位体における対振動モードを連続状態準粒子乱雑位相近似 (連続状態 QRPA) を用いて分析した予備的研究において、非常に大きな 2 中性子移行強度をもつ対振動 0^+ モードが出現することを見出していた。このモードの特質や発現機構を明らかにすることが重要な課題となっていた。

(2) 一方、同じ質量数 $A=132$ 以上の中性子過剰 Sn 同位体における電気双極応答 (アイソベクトル型 1-モード) の予備的な分析により、中性子分離エネルギーのすぐ上に連続的に分布する電気双極強度 (E1 強度) が存在することを見出していた。この大きな E1 強度は、中性子直接捕獲断面積の増大を通して r 過程元素合成に大きな影響を与えると予想された。しかし、中性子直接捕獲断面積のそれまでの理論では、多体相関は考慮されておらず、新たに、連続状態 QRPA 理論に基づいて中性子捕獲反応断面積を記述する核子多体理論を開発する必要があった。

(3) 我々は、以前より、中性子ドリップライン近傍核における中性子対相関の特異性に着目してきた。近年の実験研究が迫りつつあり質量数 30-40 領域ドリップライン近傍核の多くは形状変形を伴うことから、研究立案当初、変形した中性子過剰原子核における対相関・集団ダイナミックスの解明を構想したが、変形と弱束縛の両面を同時に扱うよりも弱束縛に焦点を絞って研究を進めることにした。特に、着目したのは、ドリップライン近傍核が対相関を示す時、ダイニュートロン相関 (近接距離での相関構造をもつ中性子クーパー対) がどのように発現するかという点である。Li-11 など 2 中性子ハローと呼ばれる原子核では、3 体模型やクラスター模型により多くの数値計算がなされているが、多数の弱束縛中性子が関与すると考えられる大きな系 (より大きな質量数領域でのドリップライン核) においてもダイニュートロン相関がみられることを原子核密度汎関数理論 (HFB 理論) は示している。HFB 理論に基づく系統的な分析を通して、より一般的な結論を導ける可能性が見込める状況があった。

2. 研究の目的

(1) 本研究の第一の目的は、弱束縛中性子に伴う集団ダイナミックスの顕著な例である、異常対振動モードの特質や微視的構造、発現機構、普遍性などを、連続状態 QRPA 理論によって詳細に分析し、解明することである。(2) 第二に、 r 過程元素合成に関わる中性子過剰原子核の中性子直接捕獲反応を記述する連続状態 QRPA 理論を開発することである。一般的な QRPA 理論は、原子核の外場に対する線形応答を記述することを目的としている。我々が開発してきた連続状態 QRPA 理論

は、系の励起に付随して生じる中性子放出を記述可能であるという大きな特長を有している。中性子放出の逆過程が中性子直接捕獲であることを利用すれば、上記の要請を満たす中性子直接捕獲理論が構築可能となる。

(3) 第三の目的は、ドリップライン近傍核におけるダイニュートロン相関の発現機構を明らかにすることである。HFB 理論を用いた先行研究により、Li-11 などの軽い 2 中性子ハロー核だけでなく、質量数が 20 以上の中性子過剰原子核全般でダイニュートロン相関が発現している可能性が指摘されている。より包括的な分析を可能にするため、核表面のはるか遠方まで波動関数が浸み出す可能性があるドリップライン核を記述できるよう HFB 理論を拡張することも目指した。

3. 研究の方法

(1) 本研究において中心的な役割を果たす研究手法は、原子核密度汎関数理論である。これは、すべての核子自由度を対等にかつ明示的に扱う微視的量子多体理論という特徴を持つ。一般化されたスレーター行列多体波動関数とエネルギー密度汎関数の変分原理を基礎とし、集団ダイナミックスや対相関などの相関の記述に高い予言性を持つと期待される。本研究では、Skyrme 型とよばれる密度汎関数模型を採用し、対相関は Bogoliubov 準粒子の方法で扱う拡張、いわゆる Skyrme-Hartree-Fock-Bogoliubov 模型 (Skyrme-HFB 模型) を採用して数値的ならびに解析的な分析を行う。一方、ダイナミックスの分析には Skyrme HFB 模型に基づく線形応答理論、すなわち準粒子乱雑位相近似 (準粒子 QRPA) を用いる。準粒子 QRPA は、時間依存 Skyrme HFB 理論の微小振幅近似に対応し、外場に対する線形応答や系の固有振動励起を記述する。本研究では、連続状態 QRPA 理論を中性子直接捕獲反応の記述に拡張するという従来にない定式化にも取り組んだ。

(2) 分析対象としたのは、陽子について閉殻配位 (陽子魔法数) をもつ中性子過剰同位体で、中でも Sn 同位体である。特に、中性子分離エネルギーが急激に減少する $A>132$ ($N>82$) 領域に着目する。また、Sn 同位体のほか、Ca, Ni, Zr などの同位体まで含んだ系統的数値計算を行った。これらの原子核は球形形状であると考えられ、変形効果を分離した本質的に重要な部分に焦点をあてて研究することが可能になる。安定核から中性子ドリップラインまでの広範囲の同位体を分析することで、安定核と中性子過剰核との違い、中性子分離エネルギーの減少が及ぼす影響などを解明することを目指した。

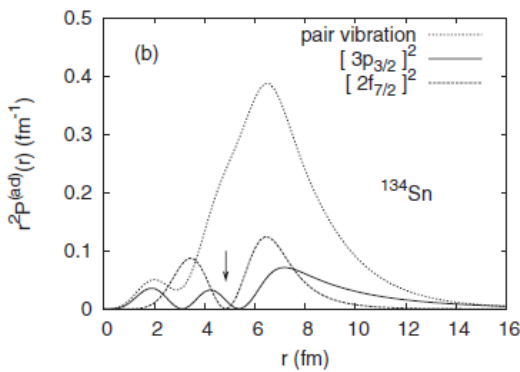
4. 研究成果

本研究で得られた主要な研究成果を、2. 研究の目的の欄で述べた (1) ~ (3) に対応する

3項目に大別して述べる。

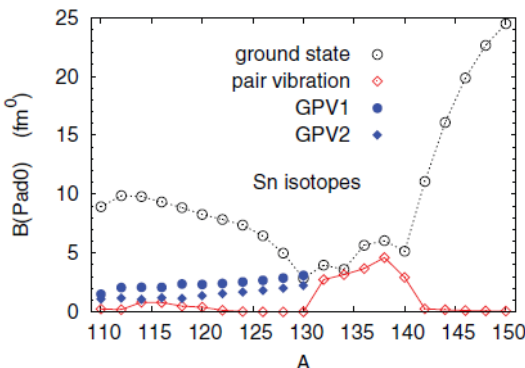
(1)中性子過剰核において出現する異常対振動モード・異常中性子対移行モードの解明

Sn-134 から Sn-142 に出現すると予測している異常対振動モードの特質を明らかにするため、対移行演算子に対する単極線形応答(すなわち 0+状態)を、連続状態 QRPA 理論で数値的に記述し、対移行演算子の遷移密度を詳細に分析した。この結果、この異常対振動状態が核表面のはるか遠方まで届く振幅で特徴づけられることを見出した(下図の破線)。さらに、非集団的・独立粒子的な2準粒子励起(下図で $[3p_{3/2}]^2$, $[2f_{7/2}]^2$ を付した線)では説明つかないこと、つまり、集団相関が強いことの示唆を得た(論文1)。



この集団相関の構造を詳細に分析するために、QRPA 振幅(2準粒子基底で表現した振幅)を計算する定式化を開発した。QRPA 振幅の分析から、i)大きな振幅をもつ主要2準粒子配位の数はいくつかであること、このことは一定の集団性を示しているものの、振幅全体の再現には不十分であり、別の相関が重要であること、ii)一方で、一つ一つの QRPA 振幅は小さいが、非束縛2準粒子配位が多数コヒーレントに寄与していることを発見した。iii)これらは高い軌道角運動量をもつ軌道であり、このことから、この異常対振動モードはダイニュートロン相関が支配しているとの知見を得た(論文2)。

A=132-140 領域だけでなく Sn 安定核(A~110)から A=150 までの広範な同位体領域、さらには高い励起エネルギー領域(Ex~20MeV)



まで分析範囲を拡大した結果、異常対振動モ

ードが安定核においても出現するはずとの新たな知見を得た。安定核では、 $Ex > 10\text{MeV}$ の巨大対振動モードが発現するとされているが、本研究により、Sn 同位体の巨大対振動モードは $A=134-140$ の異常対振動モードと同じ特質をもつこと、つまり、異常対振動モードは安定核でも出現する、という新たな知見を得た(上図)。これは、実験的検証の可能性を大きく拡大するという意味で非常に意義のあることである(論文2)。

Sn 同位体以外で異常対振動モードが発現する可能性を探求するために、Ca, Ni, Zr 同位体についても同様な分析を遂行した。Ca, Ni では対振動モードの異常性は強くなく、弱束縛 p 軌道の存在が発現の重要な契機の一つであることを明らかにした(論文3)。

(2)r 過程元素合成にかかわる中性子直接捕獲反応断面積を記述する連続状態 QRPA 理論の開発

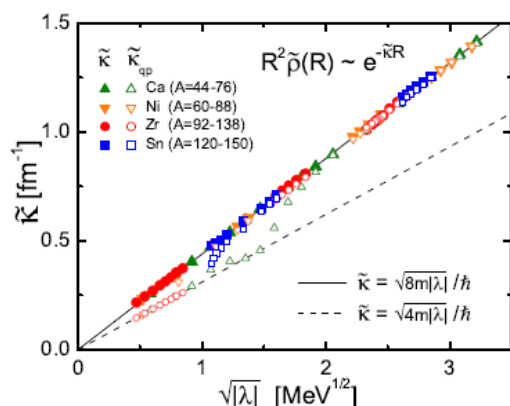
線形応答理論一般が記述する電気双極応答強度関数(E1強度関数)は、終状態を特定しない光吸収反応の全断面積に対応している。連続状態 QRPA 理論による記述では、終状態には1中性子放出(1中性子連続状態)のほか2中性子放出(2中性子連続状態)を含む。もし、これらの終状態に分解することができれば、光吸収における1中性子放出部分断面積が計算可能になり、詳細つり合い原理を使って、逆過程である中性子直接捕獲過程が計算できることになる。本研究では、この分解手法を Zangwill と Soven および Nakatsukasa と Yabana の先行研究をヒントに新たに開発した。一方、r 過程元素合成においては、反応に関与する中性子エネルギーは非常に低く(keV オーダーから 1MeV 程度以下まで)高いエネルギー分解能が求められる。連続状態波動関数に正確な漸近系を用いるなどの拡張もおこなうことで、上記のエネルギー範囲で中性子直接捕獲断面積の数値計算を初めて実施することができた(論文4)。一方で、いくつかの課題も明らかになった。一つには、ドリップライン近傍核を記述するには空間の拡大(核外遠方までの空間)が必要であることである。本研究でその解決の手法も併せて見出したが、実際の数値計算プログラムに実装することで今後の発展が期待できる。また、今後数値計算による定量記述を進めることを念頭に、連続状態にある準粒子状態の理解を深めることも必要である。本研究の発展の一つとして、準粒子共鳴状態の分析を進めたが、これをさらに発展させることも今後の重要な課題となる。

(3)中性子ドリップライン近傍核におけるダイニュートロン相関の発現機構の解明

先行するいくつかの原子核密度汎関数模型計算で、中性子ドリップライン近傍の Zr 同位体($N > 82$)に多数の弱束縛中性子で構成

される巨大ハロー構造が予測されている。対相関によって出現することが知られており、弱束縛中性子系の対相関を研究する格好の対象である。そこで、本研究では、対相関程度の空間分布を表す対密度分布関数（あるいは対凝縮密度と呼ばれるもの）の核外遠方での漸近形を分析した。第一段研究として、漸近系を分析するための手法、すなわち、指数関数的に減衰する振る舞いを定量化する指数係数をフィッティングで求める手法を開発した。この結果、対密度分布の漸近指数係数が1粒子密度分布の漸近指数係数とは明らかに異なることを見出した（論文5）。

漸近指数係数をさらに精度よく分析することを可能にするため、Skyrme-HFB 計算において空間を大きく拡大する手法を開発した。HFB 方程式の数値解法としてメッシュ表現による対角化法を採用し100fmまで拡大することに成功した。この新手法を用い、Ca, Ni, Zr, Sn の安定核からドリップライン核まで系統的 Skyrme-HFB 計算を遂行し、漸近指数係数を精度よく求めたところ、係数と中性子分離エネルギー（中性子フェルミエネルギー）の間に普遍的なスケーリング則を発見



した（図参照）。さらに、クーパーペア波動関数の遠方漸近形の解析的構造を分析し、漸近形が、束縛エネルギーが中性子フェルミエネルギーとダイニュートロン重心の量子浸み出しで規定されること、を発見した。併せて、独立準粒子構造からダイニュートロン構造への変化が中性子分離エネルギーの減少とともに起きることを解析的に示した。

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6件)

H. Shimoyama, M. Matsuo, Di-neutron correlation in monopole two-neutron transfer modes in the Sn isotope chain, *Physical Review C*, 査読有, 88, 054308 (2013).

DOI: 10.1103/PhysRevC.88.054308

H. Shimoyama, M. Matsuo, Di-neutron correlation in monopole pair

transfer modes near the neutron separation energy in Sn, Ni, Ca and Zr isotopes, *Journal of Physics, Conf. Ser.*, 査読無, 436, 12019 (2013).

DOI: 10.1088/1742-6596/436/012019

M. Matsuo, Continuum dipole response near the threshold and the direct neutron capture cross section at astrophysical energies, *Journal of Physics, Conf. Ser.*, 査読無, 445, 12019 (2013).

DOI: 10.1088/1742-6596/445/1/012019

Y. Zhang, M. Matsuo, J. Meng, Pair correlation of giant halo nuclei in continuum Skyrme-Hatree-Fock-Bogoliubov theory, *Physical Review C*, 査読有, 86, 054318 (2012).

DOI: 10.1103/PhysRevC.86.054318

H. Shimoyama, M. Matsuo, Anomalous pairing vibration in neutron-rich Sn isotopes beyond the N=82 magic number, *Physical Review C*, 査読有, 84, 044317 (2011).

DOI: 10.1103/PhysRevC.84.044317

〔学会発表〕(計27件)

M. Matsuo, Two-neutron transfer amplitudes having extended tail: from the pair rotation to the giant pair vibration in Sn isotopic chain, Workshop "From nuclear structure to particle-transfer reactions and back", ECT*, Trento, 2013年11月8日

M. Matsuo, Exotic aspects of pair correlation in neutron-rich nuclei, French-Japanese Symposium on Nuclear Structure Problems, CNRS, Paris, 2013年9月30日

M. Matsuo, International Symposium "Exotic Nuclear Structure from Nucleons", 東京大学, 2012年10月11日

〔図書〕(計1件)

M. Matsuo, Spatial structure of Cooper pairs in nuclei, in "Fifty Years of Nuclear BCS: Pairing in Finite Systems", pp.61-72 (World Scientific 2013)

6. 研究組織

(1)研究代表者

松尾 正之 (MATSUO, Masayuki)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号: 70212214