

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20540259

研究課題名(和文) 中質量領域中性子過剰原子核に現れるダイニュートロン相関とエキゾチック集団励起

研究課題名(英文) Di-neutron correlation and exotic collective excitations in neutron-rich nuclei in medium mass regions

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

研究成果の概要(和文)：中重質量領域の中性子過剰原子核において予想される原子核構造の特徴、特にダイニュートロン相関とエキゾチックな集団励起について、座標表示ハートレー・フォック・ボゴリューボフ理論と連続状態準粒子乱雑位相近似を用いて研究を行った。ダイニュートロン相関に対する間接的なプローブとして、四重極および単極型の2中性子移行応答が有効であること、 $N=82$ 魔法数を超えるスズ同位体において異常な対振動が現れることを明らかにした。また、軸対称変形をもつ場合の座標表示ハートレー・フォック・ボゴリューボフ理論をグリーン関数法で扱うことに成功し、ドリップライン近傍変形核における対相関と準粒子スペクトルの特徴を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We have studied the structure of neutron-rich nuclei in medium-mass regions with focus on the expected di-neutron correlation and exotic modes of collective excitation by means of the coordinate-space Hartree-Fock-Bogoliubov mean-field theory and the continuum quasiparticle random-phase approximation. It is found that the two-neutron transfer with the monopole and quadrupole multipolarity is a sensitive probe to the di-neutron correlation at nuclear surface, and also that an anomalous pair vibration emerges in neutron-rich Sn isotopes beyond the $N=82$ magic number. We have also succeeded in constructing the coordinate-space HFB theory for axially deformed nuclei by using the Green's function technique. Applying this method, we have clarified the pairing properties and the quasiparticle spectra in deformed nuclei near the neutron-drip line.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：理論原子核物理学

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：原子核構造、集団運動、対相関

1. 研究開始当初の背景

低密度中性子物質における対相関は、飽和密度における対相関よりも強くなること、強結合対相関の特徴が現れて、中性子クーパーペアの空間的サイズが数 fm 程度以下になる

可能性が我々の先行研究から明らかになっていた。一方、中重質量領域の中性子過剰原子核における中性子クーパーペアの空間相関の分析からは $2\text{-}3\text{fm}$ 以下での短距離相関(ダイニュートロン相関)も見出されており、

両者の関係が示唆されている。ダイニュートロン相関の存在を確立する意義は極めて高いと考えられた。また、中重質量領域での中性子過剰核の多くは変形する可能性が高く、これらを対象にすることを想定すると、中重質量領域で有力な理論であるハートレー・フォック・ボゴリューボフ理論と連続状態準粒子乱雑位相近似も拡張する必要が生じている。特に、上記の研究での重要な対象であるドリップライン近傍核を扱える形式を開発することが望まれていた。

2. 研究の目的

本研究は、二つの目的があった。ひとつは、中重質量領域の中性子過剰原子核でダイニュートロン相関を実証するためにどのような方法がありえるのか理論的な探究を行い、その手段を見出すことである。他の一つは、変形を伴う中性子過剰原子核を記述するハートレー・フォック・ボゴリューボフ(HFB)理論と連続状態準粒子乱雑位相近似(QRPA)を開発することである。後者では、変形核における対相関を明らかにすることも同時に目指した。

3. 研究の方法

(1)ダイニュートロン相関を理論的に探究するための枠組みとして、我々は座標表示ハートレー・フォック・ボゴリューボフ理論と連続状態準粒子乱雑位相近似を採用する。研究着手前は、双極子応答におけるソフト双極励起モードでの2中性子相関が有望と考えていたが、単極および4重極も含めて多角的な予備分析を行ったところ、これらの多重極度における2中性子移行応答が核表面における対相関・ダイニュートロン相関の強い影響が現れることが判明したので、この2中性子移行応答の分析に焦点をあてた研究を遂行した。

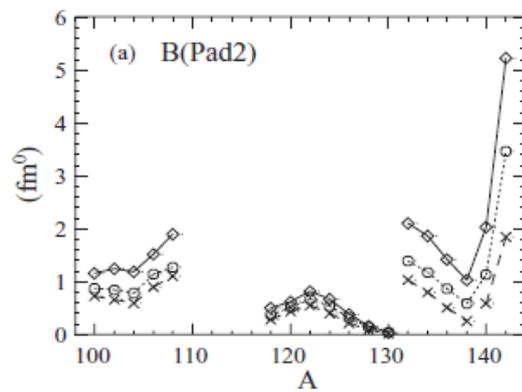
(2)軸対称変形を考慮した座標表示HFB理論・連続状態QRPA理論の開発のために我々が着目したのは、外向き波という遠方での境界条件を満足するグリーン関数を活用する方法である。これは球形のHFB+QRPA理論を定式化する経緯から着想したものであった。この手法では非束縛一粒子軌道に対応する準粒子共鳴などの性質を考察することが可能になる。このことを利用して、ドリップライン近傍の変形中性子過剰核の対相関と準粒子スペクトルの特徴をあわせて分析することにした。

4. 研究成果

(1)ダイニュートロン相関と2中性子移行の連続状態QRPA理論による研究

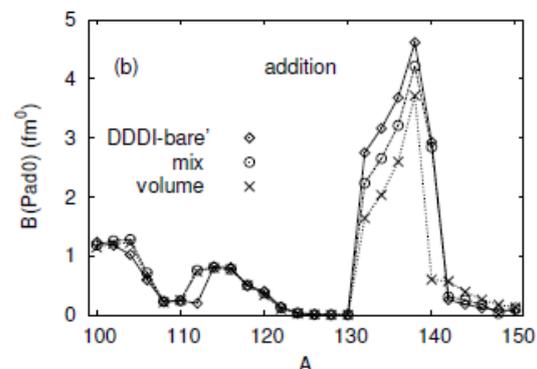
①低励起4重極状態を終状態とする四重極2中性子移行に関して

中性子過剰 Sn, Ni, Ca 同位体を対象にした QRPA 理論による数値計算から、対移行反応行列要素の予測値は、それぞれ、 $N>82, N>40, N>32$ の同位体で大きな増大が見られることが判明した。Sn 同位体では系統的かつ詳細な分析を行い、i) 有効対相関力の密度依存性に対する感受性が高いこと、ii) その原因は、4重極状態が核表面の振動であり原子核の低密度領域に運動の振幅が集中していること、そのために、低密度領域での対相関の強弱に対する敏感さを有するとの機構を把握することができた。下図は、スズ同位体における4重極状態への2中性子移行強度(横軸は質量数)で、3本の線の違いが敏感さを表す。



②基底状態および低励起0+状態終状態とする四重極2中性子移行に関して

0+対振動状態への対移行行列要素も系統的に分析し、 ^{132}Sn よりも中性子過剰な同位体で(A=140まで)、行列要素の顕著な増大を見出した。この「異常な対振動状態」の性質を遷移密度の観点からも分析を行い、対遷移強度が核外部へ大きく染み出していること、対有効相互作用への依存性、中性子数依存性を系統的に分析し、 $N=82$ 魔法数を越えた中性子過剰同位体である ^{132}Sn - ^{140}Sn に現れる「異常な対振動状態」の特質や発現機構を解明した。以下の図は、対振動状態に対する2中性子付



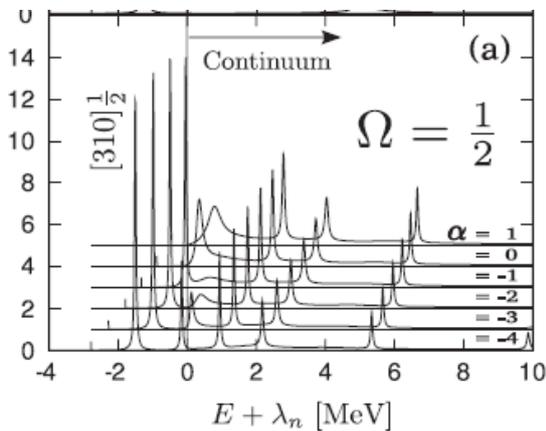
加強度であり、 ^{132}Sn - ^{140}Sn では他の同位体の数倍にもなっていることが「異常性」を端的

に物語っている

③中性子クーパー対における空間相関について、 ^{142}Sn を代表例に分析を行った。原子核の有限サイズ効果からの一定の空間相関が現れるが、2fm 以内の近接相関については対相関が本質的であることを明らかにした。

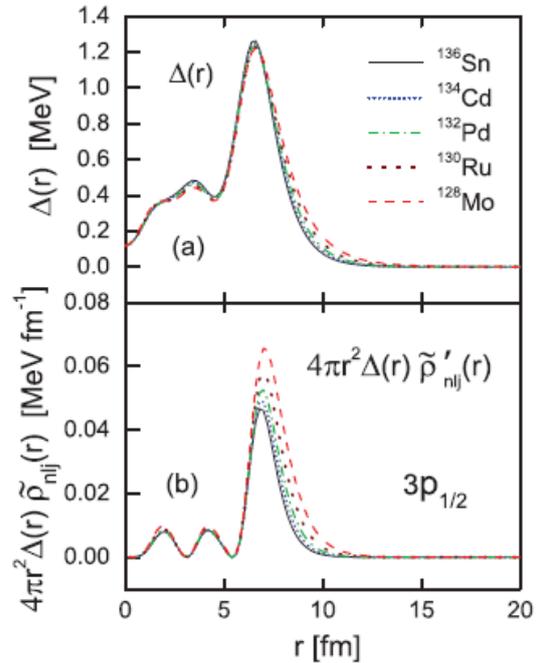
(2) 連続状態HFB理論を用いた変形中性子過剰核の研究

① 変形座標表示HFB理論に対する部分波展開チャンネル結合形式にもとづき、軸対称変形に散乱境界条件を組み込んだ連続状態HFB理論をHFBグリーン関数を用いて定式化した。ハートレー・フックポテンシャルをウッズ・サクソンポテンシャルに置き換える簡単化を行った上で、計算コードを開発した。これを用いて、ドリップライン近傍でかつ変形が推定される中性子過剰Ne/Mg領域同位体を対象にした数値的な分析を行った。特に、準粒子状態が連続状態に埋め込まれて生じる共鳴状態の特徴を、フェルミエネルギーの変化と共鳴の幅や強度の関連から分析し、ドリップライン近傍の変形中性子過剰核において、対相関はその強さを保つことを解明した。下図は、ポテンシャルの変化とともに準粒子スペクトルがどのように変わるかを示したものである。軌道が弱束縛になるとともに、対応する1準粒子状態 $[310]1/2$ の共鳴幅は大きくなるが、対相関への寄与(ピークの積分値)は変化していない。



②スキル密度汎関数モデルに基づく自己無撞着なHFB理論に散乱境界条件を組み込むことで、ドリップライン近傍核に適したHFBモデルを構築した。①と同様にグリーン関数を用いる手法に基づく。これを用いてN=86同調体 ^{136}Sn - ^{128}Mo における弱束縛中性子の準粒子スペクトルと対相関への寄与を分析した。遠心力バリアが小さく波動関数の広がり効果が大きいと予想される弱束縛3p軌道が、連続状態と結合して準粒子共鳴を形成する機構に注目し、共鳴幅の増大に対相関効果が大きいことを明らかにした。

さらに、このような幅の広い共鳴準粒子状態であっても対相関への寄与が大きくなるという、既出論文とは異なる結果を導くとともに、ドリップライン近傍中性子過剰核における対相関の特徴を明らかにした。下図は、ペアポテンシャルをあらわしたもので、ドリップラインにより近いMoで一番対相関が強くなることを示している。



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9件)

- ① Y. Zhang, M. Matsuo, J. Meng, Persistent contribution of unbound quasiparticles to the pair correlation in the continuum Skyrme-Hartree-Fock-Bogoliubov approach Phys. Rev. C83 (2011) 054301 (11p). 査読有
- ② M. Matsuo, Y. Serizawa, Surface-enhanced pair transfer amplitude in quadrupole states of neutron-rich Sn isotopes, Physical Review C82 (2010) 024318 (13p) 査読有
- ③ M. Matsuo, T. Nakatsukasa, Open problems in nuclear structure near drip lines, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 37 (2010) 064017. 査読有
- ④ M. Matsuo, H. Shimoyama, H. Oba, Pair correlations and pair transfers in neutron-rich nuclei, AIP Conference Proceedings 1235 (2010) 9-15. 査読無

- ⑤ H. Oba and M. Matsuo, Continuum Hartree-Fock-Bogoliubov theory for weakly bound deformed nuclei using coordinate-space Green's function method, Physical Review C80 (2009) 024301 (14p). 査読有

[学会発表] (計 20 件)

- ① M. Matsuo, Spatial correlation and enhanced pair transfers, RIBF Symposium "Probing Neutron-Proton Pair Correlations", 2010年11月19日, 理化学研究所
- ② M. Matsuo, H. Shimoyama, Y. Ootaki, Pairing in neutron-rich nuclei: spatial correlation and two-neutron transfer, University of Aizu-JUSTIPEN-EFES Symposium "Cutting-Edge Physics of Unstable Nuclei", 2010年11月10日, 会津大学
- ③ M. Matsuo, H. Shimoyama, T. Yoshida, Continuum Response in Neutron Rich Nuclei: Photo Absorption and Pair Transfer, Japan-Italy EFES-2010 Workshop on Correlations in Reactions and Continuum, 2010年9月6日, Univ. of Turin, Italy
- ④ H. Shimoyama, M. Matsuo, Anomalous Pair Vibrational States in Neutron-Rich Sn Isotopes Beyond A=132, Nuclear Structure 2010, 2010年8月12日, University of California, Berkeley (USA)
- ⑤ M. Matsuo, Probing low-density pairing properties via neutron-rich nuclei, International Symposium on Nuclear Symmetry Energy (NuSYM10), 2010年7月27日, 理化学研究所
- ⑥ M. Matsuo, H. Oba, H. Shimoyama, Pair correlations and pair transfers in neutron-rich nuclei, The 7th Japan-China Joint Nuclear Physics Symposium, 2009年11月9日, 筑波大学
- ⑦ H. Oba and M. Matsuo, Coupled-channel Green's function approach to deformed continuum Hartree-Fock-Bogoliubov theory, International conference "Nuclear Structure and Dynamics", 2009年5月6日, Dubrovnik (Croatia).
- ⑧ M. Matsuo, Soft multipole excitations and pair transfer in neutron-rich nuclei, ESNT workshop "Probing pair correlations: Experimental tools and associated models", 2008年10月14日, DEA/SPhN (フランス)
- ⑨ M. Matsuo and H. Oba, Continuum coupling and pair correlation in deformed weakly bound nuclei: a new Hartree-Fock-Bogoliubov method using the Green's function formalism, Japanese-French Sy

posium "New Paradigms in Nuclear Physics", 2008年10月1日, パリ大学 (フランス)

- ⑩ H. Oba and M. Matsuo, Hartree-Fock-Bogoliubov method for deformed unstable nuclei using coupled-channel Green function, Hokudai-TORIJIN-JUSTIPEN-EFES workshop, 2008年7月25日, 大沼国際セミナーハウス (北海道)

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