

令和 2 年 6 月 23 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K17680

研究課題名(和文)中性子-陽子対相関・対凝縮の解明

研究課題名(英文)Clarification of neutron-proton pairing correlation and condensation

研究代表者

日野原 伸生 (Hinohara, Nobuo)

筑波大学・計算科学研究センター・助教

研究者番号：80511435

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：中性子と陽子の2種類の核子から構成される原子核の低エネルギー状態では対相関と呼ばれる2核子間の相互作用が構造に影響を与える。本研究では対相関の新しい実験的指標として提案された対回転の慣性モーメントという量を用いることで対相関の強度である結合定数を詳細に決定できることを示した。また、中性子-陽子対相関を原子核密度汎関数法計算コードを導入し、陽子過剰不安定核の基底状態での中性子-陽子対凝縮相を分析した。陽子間のみ働くクーロン力により中性子と陽子の対称性(アイソスピン対称性)が破れた現実的な系においても、対相関チャンネルではアイソスピン対称性が近似的に成り立つことを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

中性子-陽子対凝縮相が陽子過剰不安定核の基底状態で発現するかどうかは原子核構造理論の重要な未解決問題である。さらにこれらの原子核は元素合成過程であるrpプロセスの経路上に位置するため、重元素生成の理解にもつながる。本研究で行った対回転の慣性モーメントによる対相関の詳細の決定、さらに世界に先駆けて開発した中性子-陽子対相関を含む原子核密度汎関数法の計算コードは、中性子-陽子対凝縮相の完全な理解に向けた重要な成果であると位置づけられる。

研究成果の概要(英文)：Atomic nuclei are composed of neutrons and protons, and their low-energy states are strongly affected by the two-nucleon pair correlations. In this research we showed the possibility of determination of the pairing coupling constants using the pairing rotational moment of inertia that was proposed as a new experimental indicator of the nuclear pairing condensation. We also implemented the neutron-proton pairing in the nuclear density functional theory solver and analyzed the neutron-proton pair condensed phase in proton-rich unstable nuclei. We showed the importance of the isospin symmetry in the pairing channel in a realistic system with the isospin symmetry broken by the Coulomb interaction.

研究分野：原子核理論

キーワード：原子核密度汎関数法 対相関

## 1. 研究開始当初の背景

中性子と陽子の2種類の核子から構成される原子核の2核子相関である対相関は、基底状態や低エネルギー励起状態で本質的に重要な役割を果たす。中性子対と陽子対のように同種粒子が対を組み、基底状態で対凝縮することは束縛エネルギーの系統性などからよく知られているが、中性子 - 陽子対の凝縮が実現するのかどうかについてはいまだ明らかではない。中性子 - 陽子対相関にはスピンの0のアイソベクトル型とスピンの1のアイソスカラー型の2種類があり、どちらの対凝縮が起こる可能性があるかについても興味を持たれている。特にアイソスカラー型の中性子 - 陽子対相関についてはその相互作用強度である結合定数も含めて不明な点が多い。中性子 - 陽子対凝縮は中性子数と陽子数がほぼ等しくなる陽子過剰不安定核領域で起こる可能性が最も高い。この領域の原子核は元素合成過程の1つである  $r$  p プロセスの経路上に位置しているほか、アイソスカラー型の中性子 - 陽子対相関は  $r$  プロセスの経路を決定付けるベータ崩壊の崩壊レートとも強く相関することが知られているため、宇宙に存在する重元素の合成の全貌を明らかにする上で中性子 - 陽子対相関の理解を進めていくことは重要な課題となっている。

また、二重ベータ崩壊の半減期を決定する原子核行列要素はアイソスカラー型の中性子 - 陽子相互作用によって強く抑制されることが知られている。現在崩壊探索実験が世界的に進行中である、ニュートリノレス二重ベータ崩壊で、測定される崩壊の半減期からマヨラナニュートリノの有効質量を精度良く導出するためには、原子核内での中性子 - 陽子対相関の理解を深め原子核行列要素の値を精密化することが必須となる。

これまでの中性子 - 陽子対相関に関する理論計算の多くは簡単な代数模型に基づいた定性的なものであり、全核種領域の計算が可能な原子核密度汎関数法に基づいて中性子 - 陽子対相関を分析した先行研究はあまり存在しない。原子核密度汎関数法の研究では基底状態において中性子 - 陽子対凝縮は存在しないという仮定のもと、残留相互作用として中性子 - 陽子対相関を準粒子乱雑位相近似でのみ取り入れる方法が主流であるが、この方法ではベータ崩壊やガモフ・テラー共鳴などの荷電交換遷移しか計算できない。また、中性子 - 陽子対の凝縮が基底状態で起きている場合にどのような実験観測量を測定すればその存在が実証できるかについても統一した見解はない。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は陽子過剰不安定核の基底状態での中性子 - 陽子対相関の性質を明らかにし、アイソベクトル型やアイソスカラー型の中性子 - 陽子対凝縮が起きているかどうかを解明することである。そのため、変形原子核も扱うことができ、全核種領域の計算が可能な原子核密度汎関数理論を用い、これに中性子 - 陽子対相関を導入する。また、原子核基底状態で中性子 - 陽子対凝縮が起きていることを反映する適切な実験観測量を調べ、実験と計算を比較することにより中性子 - 陽子対相関の結合定数の決定を目指す。

## 3. 研究の方法

軸対称変形を扱える Skyrme 型原子核密度汎関数法計算コードである HFBTHO を拡張し、中性子 - 陽子対相関を実装する。以前の研究で中性子と陽子を粒子・空孔基底で混合する拡張を HFBTHO で行っており、中性子と陽子の混合を対相関チャンネルに拡張する。これを用いて、アイソスピン空間でのアイソスピンの向きのみが異なるアイソバリック・アナログ状態を同種粒子対が凝縮した基底状態からのアイソスピン回転によって表現し、アイソベクトル型の中性子 - 陽子対凝縮の性質を分析する。また、中性子数と陽子数がほぼ等しくなる陽子過剰不安定原子核の基底状態を計算し、中性子 - 陽子対相関の性質を分析する。基底状態での計算では中性子数および陽子数の平均値に対する拘束条件を導入する。原子核では中性子、陽子の自由度に関するアイソスピン対称性が近似的によく成立しており、アイソベクトル型の中性子 - 陽子対相関を導入することにより、アイソスピン対称性が自発的に破れるため多くの解の縮退が起こる。これを詳細に分析するために中性子 - 陽子対振幅に関する拘束条件も導入する。アイソスピン対称性は陽子間のみ働くクーロン力を導入することにより明示的に破れるため、そのアイソベクトル型対相関への影響も分析する。

## 4. 研究成果

### (1) 原子核密度汎関数法でのエネルギー重率和則の表式の導出

エネルギー重率和則は励起状態の情報を含んだ取り扱いやすい実験観測量であり、特に和則の比から巨大共鳴のピークエネルギーを評価することが可能であるため広く用いられている。本来はすべての励起状態の足し上げで得られるエネルギー重率和則は、ハミルトニアン演算子と遷移演算子の2回交換関係を用いることにより基底状態の密度のみから評価することができる

(サウレスの定理)。原子核密度汎関数法の場合もこのサウレスの定理は広く成立することは知られているものの、対応するハミルトニアン演算子が存在しない場合には従来の方法では厳密にサウレスの定理を導出できなかった。原子核密度汎関数法の場合にエネルギー重率和則を、波動関数の局所ゲージ変換に対応する変換を用いて導出した。この導出ではハミルトニアン演算子を用いていないため、対応するハミルトニアンが存在しない場合にもサウレスの定理が成立することが示された。原子核密度汎関数の局所ゲージ対称性が保たれている場合は従来のサウレスの定理と同じ表式が導出されたが、原子核密度汎関数が局所ゲージ対称性を破る場合はエネルギー重率和則への対称性の破れからの寄与があることを示した。以上の結果は、原子核密度汎関数法で励起状態を計算する手法である有限振幅法の複素積分の方法によって、アイソスカラー型とアイソベクトル型の座標演算子の場合に直接和則を計算することで、局所ゲージ対称性が破れている場合でも今回導出した表式が成立することを数値的にも示した。(論文: Phys. Rev. C **100**, 024310 (2019))

## (2) 対密度汎関数の拡張

原子核が基底状態で対凝縮することによってゲージ対称性が自発的に破れ、対回転と呼ばれるゼロエネルギーの南部・ゴールドストーンモードが現れる。粒子数が2つずつ異なる原子核の基底状態は対回転バンドを形成しており、そのエネルギーは対回転の慣性モーメントによって記述される。従来は対凝縮の定量的議論に奇核と偶核の束縛エネルギー差が用いられてきたが、対凝縮の詳細な性質のみを束縛エネルギーの偶奇性から抜き出すのは難しい。そのため対相関の詳細を定量的に議論することはできず、原子核密度汎関数では対相関を表す対密度汎関数には最も簡単な形と密度依存性が使われてきた。本研究では原子核の基底状態の対凝縮の性質を反映する指標として優れている対回転の慣性モーメントを用いることで、束縛エネルギーの偶奇性での問題を回避し、対密度汎関数の詳細な決定を行った。対密度汎関数の従来項に加え、核子間有効相互作用の運動量依存項から導かれる対密度の空間微分および運動対密度を含む項を対密度汎関数に加え、錫および鉛同位体の中性子の慣性モーメントを系統的に分析した。錫と鉛両方の同位体の慣性モーメントの実験値を同時に定量的に説明するためにはこの対密度の空間微分項および運動対密度項が重要であることを示した。(論文: J. Phys. G **45**, 024004 (2018))

## (3) アイソベクトル型中性子 - 陽子対相関の原子核密度汎関数法への導入

軸対称変形を扱える原子核密度汎関数法計算コード HFBTH0 へアイソベクトル型中性子 - 陽子対相関の実装を行い、アイソバリック・アナログ状態および陽子過剰不安定核の基底状態の分析を行った。中性子対および陽子対が凝縮したアイソスピンの  $z$  成分が最大の状態からのアイソスピン空間での回転によってアイソバリック・アナログ状態を表現し、3つのアイソベクトル型対凝縮がどのように出現するかを分析した。アイソスピン回転前の初期状態での中性子対凝縮、陽子対凝縮の相対ゲージ角のとり方にアイソベクトル型中性子 - 陽子対凝縮が依存し、異なったアイソベクトル型対凝縮を持つ解が無限に縮退することを示した。この縮退はアイソスピン対称性を明示的に破るクーロン力を加えることによって破れ、2つの解のみが残ることも示した。続いて陽子過剰不安定核の分析を行った。中性子数と陽子数が等しくなる原子核では、アイソスピン対称な原子核密度汎関数を用いた場合、アイソベクトル型対相関によって自発的にアイソスピン対称性が破れ、アイソベクトル対振幅の3次元アイソスピン空間で向きが異なる解が縮退するため、様々な中性子対、陽子対、中性子 - 陽子対の混合凝縮解が実現する。このような場合はアイソスピン射影によるアイソスピン対称性の回復が重要となる。アイソベクトル型対相関の3つの結合定数の値を変えたり、クーロン力を加えたりするとアイソスピン対称性が明示的に破れ、この縮退は解ける。しかしながらクーロン力による対相関のアイソスピン対称性の破れの程度は非常に小さく、対相関チャンネルではアイソスピン対称性は近似的に成立し、アイソスピン回転の量子ゆらぎが非常に大きくなることが示された。中性子数と陽子数が異なる原子核の基底状態では、アイソスピン対称な原子核密度汎関数の場合はアイソベクトル型中性子 - 陽子対凝縮は現れず、中性子 - 陽子対の結合定数が大きい場合に限り、対凝縮解を得ることができた。本研究成果をまとめた論文を現在準備中である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hinohara Nobuo	4. 巻 100
2. 論文標題 Energy-weighted sum rule for nuclear density functional theory	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 024310
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevC.100.024310	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nobuo Hinohara	4. 巻 45
2. 論文標題 Extending pairing energy density functional using pairing rotational moments of inertia	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics	6. 最初と最後の頁 024004
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6471/aa9f8b	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計49件（うち招待講演 14件 / うち国際学会 28件）

1. 発表者名 Nobuo Hinohara
2. 発表標題 Neutron-proton pairing in nuclear density functional theory
3. 学会等名 Nuclear Physics Symposium "Challenges in theory of heavy nuclei"（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nobuo Hinohara
2. 発表標題 Isovector pairing energy density functional and pairing collective motion
3. 学会等名 Microscopic Approaches to Nuclear Structure and Reactions（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nobuo Hinohara
2. 発表標題 Collective motion in stable and unstable nuclei within nuclear density functional theory
3. 学会等名 IX International Symposium on Exotic Nuclei (EXON-2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nobuo Hinohara
2. 発表標題 Nuclear density functional theory for collective excitation
3. 学会等名 5th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nobuo Hinohara
2. 発表標題 Pairing Nambu-Goldstone modes in nuclei
3. 学会等名 XXIV Nuclear Physics Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考