

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：10106

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2023

課題番号：18K03636

研究課題名(和文) 核子対相関と非束縛状態を基とした核構造の多様性の系統的解明

研究課題名(英文) Systematic study of the diversity of nuclear structures based on nucleon pair correlation and unbound states

研究代表者

升井 洋志 (Masui, Hiroshi)

北見工業大学・工学部・教授

研究者番号：30396345

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：原子核における核子対相関と非束縛状態が核構造の多様性に対する寄与を(1)陽子-中性子相関におけるテンソル力の影響が非束縛状態の構造依存性、(2)中性子-中性子相関が核構造に与える影響、(3)連続状態の構造変化への関わり、の3つの側面から研究を進めた。Cluster-Orbital Shell Modelアプローチにより、(1)については ^{18}F 、 ^{42}Sc 、 ^{58}Cu におけるテンソル力とエネルギー準位の関係、(2)については ^{31}F の Anti-Halo構造形成、(3)については炭素同位体における連続状態の寄与、という切り口から詳細に解析を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

不安定核の構造を、三体模型の枠組みにおいてCluster-Orbital Shell Model (COSM)にGauss基底(GEM)を適用して詳細に解析した。本研究では中性子-中性子対、陽子-中性子対のいずれの場合においても、三体の束縛状態の構造の鍵を握るのがコア核からくる連続状態の変化であることを示した。この切り口は、我々のアプローチ(COSM+GEM)を用いることが重要であり、他の平均場のアプローチ等においては議論が難しい。さらに、データサイエンス的アプローチを用いてパラメータの妥当性を議論していたことから、他分野における研究遂行の指針づくりに大いなる寄与があったと考えられる。

研究成果の概要(英文)：We have studied the contribution of nucleon pairing correlations and unbound states in atomic nuclei to the diversity of nuclear structures from three aspects: (1) the effect of tensor forces in proton-neutron correlations on the structure of unbound states, (2) the effect of neutron-neutron correlations on nuclear structures, and (3) their involvement in structural changes of the continuum states. Using the Cluster-Orbital Shell Model approach, we have performed detailed analyses of (1) the relationship between tensor forces and energy levels in ^{18}F , ^{42}Sc , and ^{58}Cu , (2) the formation of the anti-halo structure in ^{31}F , and (3) the contribution of the continuum states in carbon isotopes.

研究分野：原子核理論、数理データサイエンス

キーワード：不安定核 連続状態 テンソル相互作用 対相関

1. 研究開始当初の背景

原子核は構成単位である核子の大きさと相互作用(核力)の有効範囲がほぼ同じオーダーである孤立量子多体系である。さらに核力は原子核内で強い核子相関を引き起こし、核子間距離が近いと相関が全体の核構造に大きな影響を与える。1985年の ^{11}Li のハロー構造の発見(Tanihata et al.)から、核子相関に起因する新たな核構造の理論的研究が進められてきた。例えば、現実的核力のテンソル成分を取り入れるよう最適化したモデルによる核子相関と核構造の解析、非束縛状態の重要性を示した共鳴状態(ガモフ状態)を基底による新たな殻モデルの発展等が挙げられる。これまでの研究で示されてきたことは(1)多体構造における核子相関の影響 (2)現実的核力を用いた精密計算 (3)非束縛状態の寄与の3つを取り扱える枠組みがドリップライン近傍核の核構造を理解する上で重要である。

2. 研究の目的

原子核構造の多様性を理解する上で重要な「核力が引き起こす対相関」と「非束縛状態の寄与」をガウス基底関数で統一的に記述し、核子ドリップライン近傍における不安定核領域の多様な構造変化を系統的に理解することが目的である。本研究の最大の特徴は、原子核全体の模型空間をコア核と価核子に分離し、核構造の多様性をコア核内の核子対相関が価核子の占有軌道に与える影響と非束縛状態を含めた価核子の状態変化として表現することである。価核子の模型空間においてはガウス関数基底を用いた微視的模型アプローチにより正確に解き上げることが可能であり、緩く束縛されたドリップライン近傍核の漸近的振る舞いを精密に取り扱う。さらに本研究の計算手法を一般化することで、原子核理論のみならず元素合成や量子多体論の枠組み拡張等、他分野における理論的発展への寄与が期待できる。

3. 研究の方法

本申請は(1)現実的核力が引き起こす核子相関の精密な解析および(II)価核子の模型空間における非束縛状態が核構造に与える影響の解明の二つを明らかにするものである。それらの理論的解明にあたり、ガウス基底(GEM)によるクラスター殻模型的アプローチ(COSM)を計算手法の主軸とし、核内での相関を微視的視点で解析を行った。対象としたものは

- (1)テンソル力による陽子-中性子相関と核構造
- (2)中性子対相関による Anti-Halo 構造
- (3)連続状態の核構造への寄与

である。それらについて、COSM+GEMの三体模型による精密な核構造計算と、それを基にした連続状態の寄与の解析を行った。

4. 研究成果

- (1)テンソル力による陽子-中性子相関と核構造

原子核を構成する核子では、アイソスピンの向きが異なる陽子と中性子が非常に強い相関を示す。このことは2核子系において重陽子以外は束縛状態が存在しないことや、 ^6Li 、 ^{18}F のような 0^+ のコア核に陽子と中性子が付与された原子核の基底状態が 1^+ のスピンのパリティを持つことから示される。しかし、 ^{42}Sc のように例外も存在し、この場合 ^{40}Ca のコア核に陽子-中性子対が加わったと考えると 1^+ の基底状態が期待されるが、実際には 0^+ が基底状態となる系も存在する。

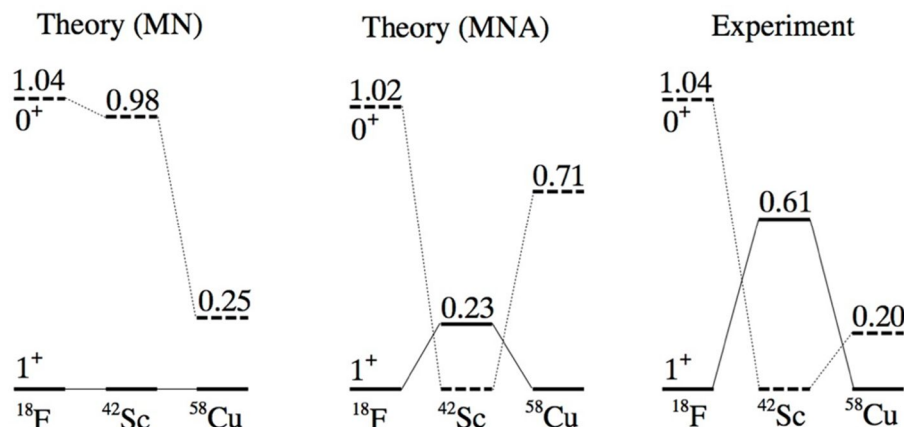


図1. コア核+p+n系における 1^+ および 0^+ 準位の比較

我々はこの基底状態の逆転とテンソル力とが密接に関わり合っていると考え、現象論的テンソル力および現実的テンソル力の2つの相互作用を用いてコア核+p+nの三体模型で計算を行った。結果として、コア核+1核子系での連続状態（日束縛状態）の準位構造がテンソル力の相関に重要な役割を持つことと、その準位構造がテンソル相関を弱める条件下において 1^+ と 0^+ の準位の逆転が起こることを示した。

図1は 0^+ のコア核に陽子と中性子が付与された原子核、 ^{18}F 、 ^{42}Sc 、 ^{58}Cu の 1^+ と 0^+ の準位を示している。右端が実験値であり ^{18}F と ^{58}Cu の基底状態は 1^+ であるのに対し ^{42}Sc は 0^+ となっていることがわかる。これに対して理論計算の方は、左端に示す中心力のみ(MN)の結果がすべて 1^+ が基底状態になってしまうが、テンソル力を取り入れた相互作用(MNA)では ^{42}Sc の逆転を再現している。これは図2に示すように、テンソル相関のペア(Q-pairing)がコア核+1核子の非束縛状態の準位としてどのくらいのエネルギーに現れるかに関係している。 ^{18}F と ^{58}Cu の場合Q-pairingの一方は基底状態あるいは低励起状態であるのに対し、 ^{42}Sc ではどちらも高い励起状態で陽子-中性子対を形成することになるので、本来強い相関を示す 1^+ での陽子-中性子対よりも、同じ起動に入る 0^+ がエネルギー的に選択されるためである。MNAは現象論的なテンソル力であったが、我々は現実的テンソル力を用いても同様の結果をもたらすことを示した。

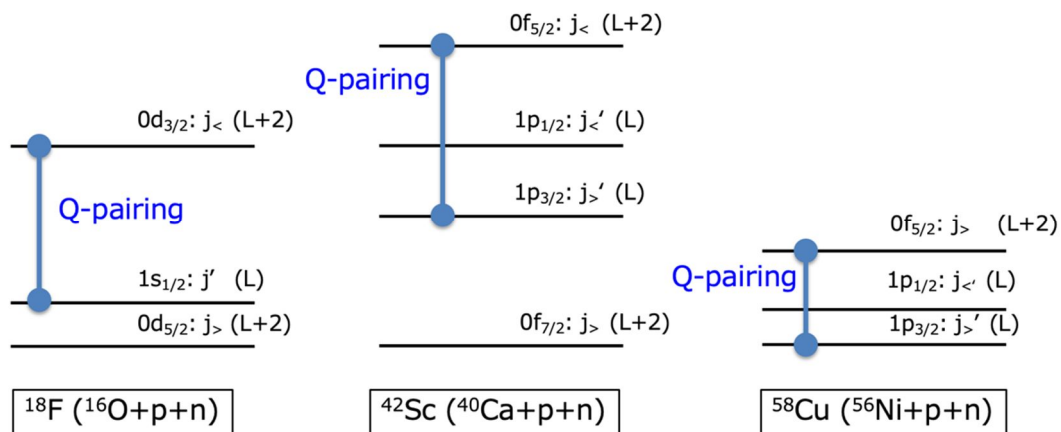


図2. テンソル相関ペア(Q-pairing)と準位

(2) 中性子対相関による Anti-Halo 構造

一般に、緩い束縛状態を形成する中性子過剰核においては、最外殻にある1中性子ないしは2中性子は遠方まで広がった密度分布を持ち、非常に大きい核半径を示す。これは「Halo構造」と呼ばれ、波動関数の漸近的振る舞いからくる中性子過剰核における特徴的な構造である。しかし、いくつかの原子核においては価核子(中性子)が1つの系ではHalo的な構造を示すが、2つになった場合に核半径が1中性子の場合に比べて小さくなる現象が観測されている。これは「Anti-Halo効果」とされ、中性子-中性子相関が重要な役割を示していることが理論計算から示唆されている。

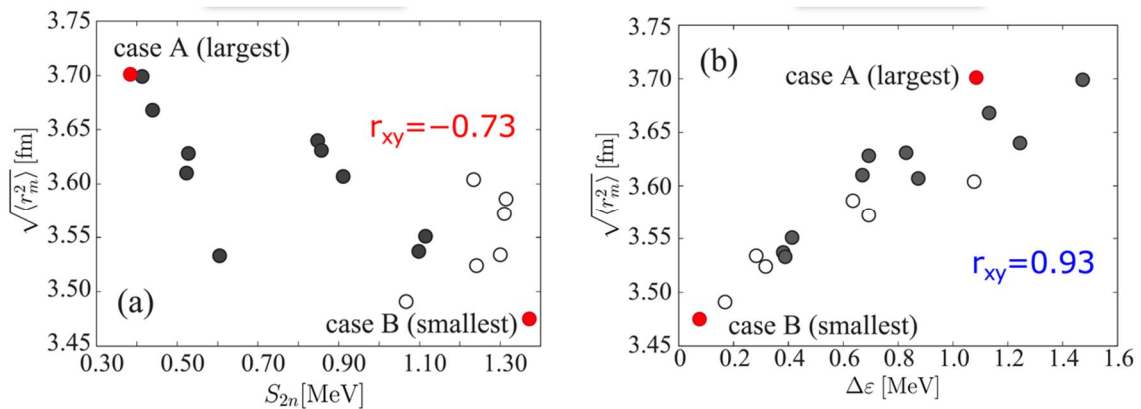


図3. ^{31}F の核半径と2中性子分離エネルギー(S_{2n})および準位差(ϵ)との相関

我々はこのAnti-Haloがどのような条件下において発現するかをフッ素同位体の ^{31}F について調べ、Anti-Halo効果が、連続状態である非束縛状態の励起準位の構造と中性子-中性子対との競合によって引き起こされることを示した。図3はどのような変数が核半径と強

い相関を示すかを調べた結果である。左の図は 2 中性子分離エネルギー (S_{2n}) を横軸に撮ったもの、右の図は部分系: ^{30}F ($^{29}\text{F}+n$) 系における $f_{7/2}$ 軌道と $p_{3/2}$ 軌道のエネルギー準位の差 (ε) を横軸にとったものである。いくつか点があるのは、 $^{29}\text{F}+n$ 系のポテンシャルが不定なため、実験を再現する範囲で様々なパターンをとった結果である。この図から、明らかにエネルギー準位の差 (ε) を横軸にとった場合の方が強い相関を示している ($r_{xy}=0.93$)。よって、本質的に ^{31}F の核半径に寄与するのは、その部分系である ^{30}F の準位の差 (ε) であることがわかる。右の図で Anti-Halo 効果が出ているのは ε が小さい場合であるが、この理由は図 4 で示す。

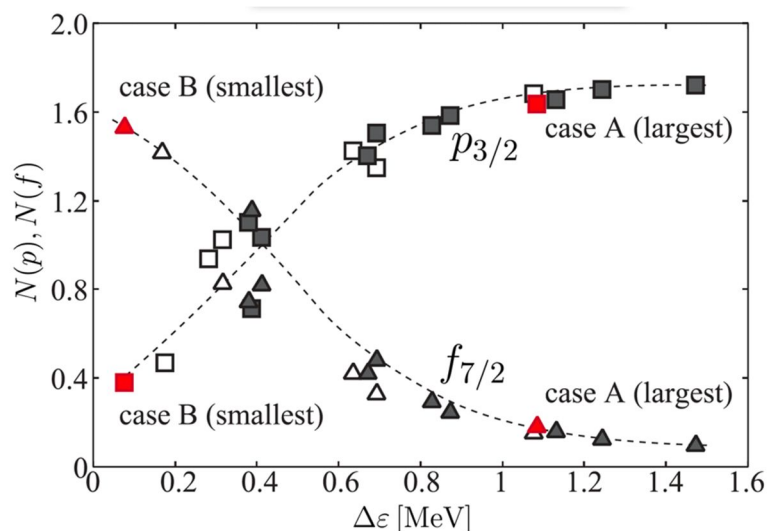


図 4. ^{31}F における 2 中性子占有度の準位差 (ε) 依存性

図 4 は ^{31}F の $f_{7/2}$ と $p_{3/2}$ 軌道における 2 中性子の占める割合を示している。横軸の ε が小さいところでは、中性子-中性子相関をより稼ぐ $f_{7/2}$ 軌道に中性子が多く入り、結果として核半径が小さくなる。大きくなるにつれ中性子-中性子相関よりもコア核から得られるエネルギーの方が大きくなり、 $p_{3/2}$ 軌道に中性子が多く入ることになる。我々はこの ε と中性子対相関の競合が核半径に影響を与えて起こる構造変化を「Nobel anti-halo 効果」と呼び、中性子過剰核の核構造の理解において重要な指摘を行った。

(3) 連続状態の核構造への寄与

我々はこれまで(1)および(2)において陽子-中性子相関、中性子-中性子相関が非束縛状態の準位構造と密接に関連していることを示してきた。我々の理論的アプローチはガウス基底 (GEM) を用いるため、少ない基底関数を用いながらも非常に高いエネルギーの連続状態を効果的に取り込む枠組みとなっている。一方、Shell model に代表されるような 1 粒子状態を基底関数とする方法では、高いエネルギーの連続状態を基底関数として取り入れるためには膨大な数の基底を用意することになり、低いエネルギーに模型空間を限定するか、モンテカルロ的アプローチによる基底関数の節約等が必要である。

そこで、非束縛状態の模型空間の限定が核構造に与える影響を議論するため、炭素同位体を対象とし、コア核+2 中性子の三体模型を用いて詳細な計算を行った。計算は比較的安定な ^{16}C ($^{14}\text{C}+2n$)、少し緩く束縛されている ^{20}C ($^{18}\text{C}+2n$)、Halo 構造を持つ可能性のある ^{22}C ($^{20}\text{C}+2n$) について行い、束縛エネルギーの違い、コア核+1 中性子系の連続状態の構造の違いが現れる系を選んだ。

模型空間の限定は通常 2 つの方向性があり、一つは 1 粒子状態のエネルギー、もう一つは 1 粒子状態の取りうる角運動量である。角運動量の制限は我々のアプローチである COSM+GEM でも取られており、一般に取り入れる角運動量の上昇に対して緩やかにエネルギーが収束していくことが多くの原子核で示されている。よって、我々は COSM+GEM で用意した基底関数にユニタリー変換を加えて 1 粒子状態の積を構成し、それに対してエネルギーの制限を加える方法を用いた。それにより、模型空間をエネルギーによって限定した場合、1 粒子基底の角運動量を大きく取ったとしても、あるエネルギーで収束が止まってしまう、その止まるポイントは基底関数の最大エネルギー準位に依存することを示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 H. Masui, W. Horiuchi, and M. Kimura	4. 巻 63
2. 論文標題 Two-neutron halo structure and anti-halo effect in ^{31}F	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Few-Body Systems	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00601-021-01715-z	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 Hiroshi Masui, Wataru Horiuchi, Masaaki Kimura	4. 巻 101
2. 論文標題 Two-neutron halo structure of ^{31}F and a novel pairing antihalo effect	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. C	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevC.101.041303	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 Hiroshi Masui, Kei Kikuchi, Ren Kurose, Xun Shao	4. 巻 3
2. 論文標題 Concept of a Unified Research Management System and its Application to Data Clustering	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Institutional Research and Management	6. 最初と最後の頁 50-61
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Myagmarjav Odsuren, Yuma Kikuchi, Takayuki Myo, Hiroshi Masui and Kiyoshi Kato	4. 巻 99
2. 論文標題 Photodisintegration cross sections for resonant states and virtual states	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 034312 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevC.99.034312	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 該当する

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 升井洋志
2. 発表標題 31Fでの新しいanti-halo形成
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 Neutron-halo structure and anti-halo effect in 31F
2. 発表標題 Hiroshi Masui
3. 学会等名 8th Asia-Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics "APFB2020" (国際学会)
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 升井洋志
2. 発表標題 31FにおけるHalo /Anti-Halo形成
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 Hiroshi Masui
2. 発表標題 Data Compilation Procedure of the Nuclear Reaction Data on the Unified Research Management System
3. 学会等名 2019 8th International Congress on Advanced Applied Informatics (IIAI-AAI) (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 Hiroshi Masui
2. 発表標題 Effect of tensor force for Iso-scaler and iso-vector correlations in nuclei
3. 学会等名 ECT* workshop on Universal physics in Many-Body Quantum Systems - From Atoms to Quarks (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 升井洋志
2. 発表標題 現実的核力を基にしたテンソル力の陽子-中性子相関への影響
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 Hiroshi Masui
2. 発表標題 Role of the Tensor Force on the Proton-Neutron Correlation in $N = Z$ Nuclei
3. 学会等名 Fourth International Workshop on “State of the Art in Nuclear Cluster Physics” (SOTANCP4) (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 Hiroshi Masui
2. 発表標題 Proton-neutron correlation through the tensor force in a three-body model
3. 学会等名 Workshop on Nuclear Cluster Physics (WNCP2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 Hiroshi Masui
2. 発表標題 Concept of a Unified Research Management System and its Application to Data Clustering
3. 学会等名 7th International congress on advanced applied informatics (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------