

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19740146
 研究課題名（和文） 平均場を越えたアプローチによる中重核の励起メカニズムの探求
 研究課題名（英文） Research on excitation mechanism for medium and heavy nuclei via approaches beyond mean field approximations
 研究代表者
 東山 幸司（HIGASHIYAMA KOJI）
 千葉工業大学・工学部・助教
 研究者番号：60433679

研究成果の概要（和文）：本研究では様々な理論により中重核領域の原子核構造について研究を行い、次のような研究成果を得た。(1) 2核子コア結合模型を用い、質量数130領域の奇奇核のダブレットバンドを調査した。波動関数を解析することで、これらの状態のレベルスキームは中性子1個と陽子1個の角運動量の箸配位と偶偶核のコアの四重極励起が弱く結合したことにより生じることを見出した。(2) 中性子過剰な Se、As、Ge、Ga アイソトープに対して殻模型計算を行い、計算で得られたエネルギーレベルと電磁遷移を実験値と比較した。殻模型の結果の解析から、高スピン領域では $0g_{9/2}$ 軌道にある中性子2個の整列が現れることを確認した。(3) 遷移核の構造を調べるため、生成座標法による計算の新しいアルゴリズムを開発した。この理論の Se、Ge 偶偶核への適用により質量数80領域の三軸非対称変形の重要性を示した。

研究成果の概要（英文）：We have studied the nuclear structure of medium and heavy nuclei in terms of various models and have obtained the following results. (1) We investigated the doublet bands in the doubly-odd nuclei around the mass 130 in terms of the quadrupole coupling model. By analyzing wave functions, we have found that the level scheme of these states arises from chopsticks configurations of two angular momenta of the unpaired neutron and the unpaired proton, weakly coupled with the quadrupole excitations of the even-even core. (2) We performed shell-model calculations for neutron-rich Se, As, Ge, and Ga isotopes, and compared the calculated energy levels and electromagnetic transitions with the experimental data. Through the analysis of the shell model results, it is confirmed that the spin alignment of two neutrons in the $0g_{9/2}$ orbital becomes apparent at high spins. (3) We have developed a new algorithm for generator coordinate method calculations in order to investigate the structure in transitional nuclei. An application of this model to the even-even Se and Ge nuclei indicated the importance of triaxial deformation in the mass 80 region.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,100,000	0	1,100,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,500,000	420,000	2,920,000

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：原子核構造・中重核・殻模型・核子対殻模型・生成座標法・2核子コア結合模型

1. 研究開始当初の背景

原子核の低エネルギー領域では、核子（陽子と中性子）の単一粒子運動と原子核の集団運動は大きさにおいても効果においてもそれほど明確に切り離されるものではなく、両者を統一的に扱うことが原子核構造を理解するためには必要不可欠である。質量が軽い原子核では、全配位混合殻模型、反対称化分子動力学法などにより精密計算が行われ、集団運動と単一粒子運動を同時に記述することに成功している。しかしながら、中重核（比較的重い原子核）において集団運動と単一粒子運動を統一的に扱う理論的枠組みはほとんど整備されていない。

一方、近年の実験では中重核の興味深い現象が数多く報告されている。閉核近傍の原子核では、テンソル相互作用によって引き起こされる核子の単一粒子エネルギーによる特徴的な変化（核構造の進化）が現れ、そのメカニズムが調べられている。また、奇奇核において、高スピン軌道にある陽子と中性子によって作られたと考えられる、エネルギー的にほぼ縮退した2つの回転バンド（ダブレットバンド）が観測されている。このダブレットバンドはカイラル対称性と呼ばれる対称性により具現化されたものと解釈され、ダブレットバンドをカイラルバンドと考えるのが定説となっている。偶偶核の低エネルギー領域においては、原子核全体が変形、回転および振動することにより生み出される様々なスペクトルの美しいパターンが観測され、その様相は陽子数・中性子数によって変化することが知られている。さらに、偶偶核の高スピン領域では、原子核の集団運動状態が単一粒子状態へと相転移するバックベンディングと呼ばれる現象が観測され、多くの理論研究が行われている。

このように、実験では中重核の様々な研究が行われると共に、新しい研究計画も進められている。近年、天然に存在する原子核よりも中性子数の多い中性子過剰核が大きな注目を集めており、理化学研究所のR I ビームファクトリー計画をはじめ、世界各地で中性子過剰核ビームの加速器の建設計画が進行中である。これらの加速器により、近い将来何千という新しい原子核が発見され、その特異な構造が分析されることとなり、幅広い領域の原子核構造を記述するための新しい理論体系が渴望されている。

研究代表者等は、核子を完全に微視的に扱うと同時に、ハミルトニアン

の対称性を一切破らない核子対殻模型を提案し、発展させてきた。この核子対殻模型を用い、質量数130領域の原子核の数値解析を行い、幅広い範囲の偶偶核・奇核・奇奇核のエネルギー準位や電磁遷移を再現することに成功した。さらに、奇奇核に現れるダブレットバンドはカイラル対称性による解釈を全く支持せず、今まで知られていなかった新しい励起メカニズムにより生じることを明らかにした。

2. 研究の目的

本研究の目的は、中重核に現れる多様な原子核構造を解明することであった。このことは、原子核構造を定量的に評価できる模型を用いて、幅広い核種のエネルギー準位・電磁遷移等の実験値を再現し、その波動関数を解析することで初めて明らかになる。殻模型や核子対殻模型は大きく変形した原子核の数値解析が困難であることから、変形領域では生成座標法や2核子コア結合模型を用いて原子核構造の数値解析を実行する必要があった。

3. 研究の方法

本研究では集団運動性と単一粒子性が混在する中重核領域の原子核構造について、様々な理論的枠組みにより研究を行った。そのテーマは主に3つに分類できる。以下にそれぞれの研究の方法とその成果についてまとめる。

(1) 質量数130領域のダブレットバンド

実験で観測されている質量数130領域のダブレットバンドは、陽子と中性子が共に偶数のコア部分に、高スピン軌道 ($0h_{11/2}$ 軌道) にある1個の陽子と1個の中性子を付け加えた構造を持っていることが示されている。そこで本研究では、コア部分に1個の陽子と1個の中性子を結合させることにより奇奇核を記述する2核子コア結合模型を用いて理論研究を行った。コア部分は質量数130領域の偶偶核が示す集団運動的なエネルギー準位を再現するように定め、コア部分・1個の陽子・1個の中性子の間にはたらく相互作用には四重極相互作用を適用した。相互作用のパラメーターは幅広い領域における奇奇核のエネルギー準位・電磁遷移の実験値を再現するように決めた。

(2) 質量数80領域の原子核の殻模型計算

原子核は陽子と中性子が共に魔法数になったとき、非常に安定になり、陽子数と中性子数が魔法数から少し離れた原子核の低エネルギー状態は、安定な原子核に幾つかの陽子と中性子を付加した構造により説明できることが知られている。本研究で用いた殻模型は、安定な原子核の周りにある陽子と中性子（バレンス核子）の占める状態を幾つかの一粒軌道に制限して、原子核構造を記述する理論である。質量数 80 領域の原子核を記述するため、本研究では一粒軌道として $0g_{9/2}$ 、 $1p_{1/2}$ 、 $1p_{3/2}$ 、 $0f_{7/2}$ 軌道を用いた。中重核領域では有効相互作用の研究はほとんど行われていないため、現象論的な相互作用を仮定し、そのパラメータは幅広い領域における偶偶核・奇核のエネルギー準位の実験値を再現するように決めた。

(3) 生成座標法による集団運動状態の解析

生成座標法は核子自由度に基づく微視的で、同時に半古典的な描像を持つ完全に量子力学的多体理論であり、核子多体系である原子核の集団運動と単一粒子運動を記述する強力な理論である。生成座標法では原子核の変形に応じた波動関数を平均場模型などにより用意し、その波動関数に角運動量射影等を行うことで基底ベクトルを生成する。本研究では、陽子系と中性子系に対して別々に角運動量射影を行い、この陽子系と中性子系の基底ベクトルを結合することで原子核全体の状態を生成する、新しいアルゴリズムを開発した。陽子系または中性子系の取り扱いを容易にするため、平均場の波動関数としてニルソン状態を用いた。

質量数 80 領域の原子核について生成座標法を適用するにあたり、バレンス核子が占有する一粒軌道と核子間相互作用は殻模型計算と同じものを用いた。また、生成座標法の計算は、原子核の三軸非対称変形の効果を取り入れた場合と軸対称変形の効果のみを取り入れた場合に対して行った。

4. 研究成果

(1) 質量数 130 領域のダブルットバンド

本研究は質量数 130 領域の奇奇核に対して数値解析を実行したが、以下では ^{134}La 原子核の結果のみを示す。2核子コア結合模型によるエネルギー準位の計算結果と実験値の比較を図 1 に示す。イラスト状態（それぞれのスピンについてエネルギーが一番低い状態）に関して、実験ではスピンの 8 の状態のエネルギーが一番低く、スピンが大きくなるとエネルギーが増加している。2核子コア結合模型の計算結果でもスピンの 8 の状態のエネ

ルギーが一番低く、スピンの 9 以上の状態も実験値をよく再現している。イレリア状態（それぞれのスピンについて二番目にエネルギーが低い状態）については、実験値は 4 つの状態しか見つかっていない。計算結果はこれらの状態をよく再現しており、さらに実験で観測されていない状態を予言している。

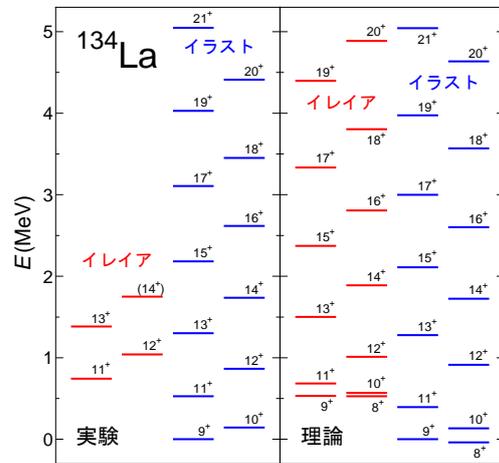


図 1 ^{134}La 原子核に対する実験のエネルギー準位と計算結果(理論)の比較。図中の数字と符号は状態がもつスピンとパリティを表す。右の 2 列がイラスト状態、左の 2 列がイレリア状態である。

次に、イラスト状態における陽子と中性子の角運動量のなす角 θ をスピン I の関数として図 2 に示す。スピンの 8 の状態では 2 つの角運動量は直交しており、スピンの 11 まではスピンが増加するにつれ、2 つの角運動量のなす角は減少する。スピンの 11 以上の状態では、2 つの角運動量は開閉運動をくりかえし、1 個の陽子と 1 個の中性子はコア部分に弱く結合していることが分かる。

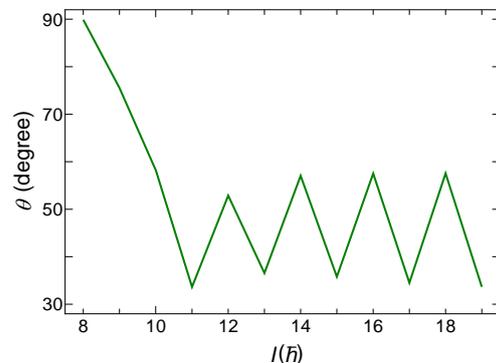


図 2 イラスト状態に対する陽子と中性子の角運動量のなす角

さらに波動関数を解析すると、イラスト状

態とイレニア状態ではその構造は全く異なることが分かった。この結果はカイラル対称性をまったく支持せず、非常に似通った2つの回転バンドは単にエネルギー的に偶然同じところに現れるだけだということが判明した。

(2) 質量数 80 領域の原子核の殻模型計算

本研究は、質量数 80 領域の偶偶核・奇核に対して系統的な数値解析を実行したが、以下では ^{80}Se 原子核の結果のみを示す。殻模型によるエネルギー準位の計算結果と実験値を図3に示す。この図より、イラスト状態に関して、殻模型の計算結果は実験値を良く再現していることが分かる。特に実験では、スピンの6と8の状態におけるエネルギーの差が小さくなっており、殻模型でもその傾向をよく示している。他の状態についても、スピンの2、0、3の特徴的な状態が殻模型で良く再現されている。

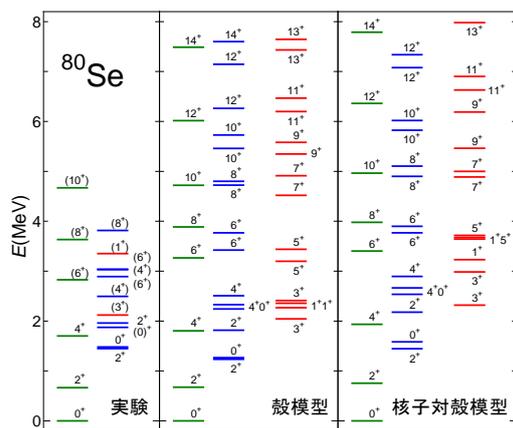


図3 ^{134}La 原子核に対する実験のエネルギー準位と計算結果(理論)の比較。図中の数字と符号は状態がもつスピンとパリティを表している。左の1列がイラスト状態、右の2列が他の状態である。

次に、 ^{80}Se の原子核構造を明らかにするため、殻模型計算で用いたものと同じ有効相互作用を用い、核子対殻模型による数値解析を実行した。核子対殻模型は全殻模型空間を対象とはせず、その空間を集団運動核子対によって作られる空間に制限して殻模型計算を行う理論である。本研究では角運動量がそれぞれ0、2、4の集団運動核子対、S対、D対、G対と $0g_{9/2}$ 軌道にある2つの核子でできたH対により殻模型空間を制限した核子対

殻模型を用いた。核子対殻模型計算で得られたエネルギー準位と殻模型の計算結果の比較を図3に示す。この図より、核子対殻模型で作られる模型空間は殻模型の計算結果を再現するのに十分であることが分かる。特に、核子対殻模型によるイラスト状態の計算結果は、殻模型計算を良く再現している。

計算で得られた波動関数を解析するため、 ^{80}Se 原子核のイラスト状態におけるD、G、H対 (π は陽子、 ν は中性子を表す) の数の期待値をスピン I の関数として図4に示す。スピンの0~6の状態では、スピンの増加すると陽子と中性子のD対の数が増加しているため、これらの状態では角運動量が0と2の集団運動核子対の寄与が大きいことが分かった。また、スピンの8の状態では、陽子と中性子のD対の数が減少すると共に、角運動量が8の中性子のH対の数がほぼ1となり、角運動量が8のイラスト状態で $0g_{9/2}$ 軌道にある2つの中性子の整列が起こっていることが分かった。このことから角運動量が6と8の状態の間で、集団運動状態が単一粒子状態へと相転移するバックベンディング現象が生じることを確認した。

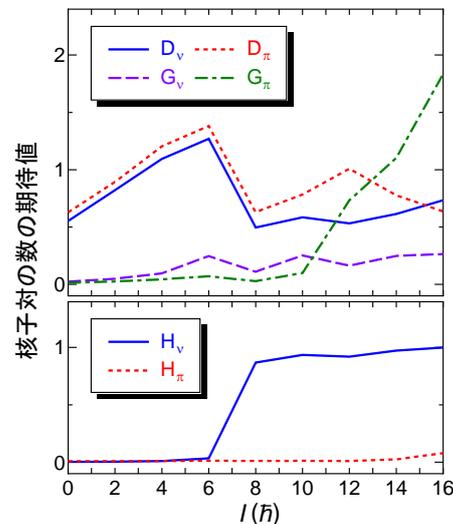


図4 上段:イラスト状態に対する集団運動核子D対、G対の数の期待値。下段:イラスト状態に対する角運動量が8のH対の数の期待値。

(3) 生成座標法による集団運動状態の解析

本研究では、質量数 80 領域の Se、Ge アイソトープに対して数値解析を実行したが、以下では ^{78}Ge 原子核の計算結果についてのみ議論する。生成座標法と殻模型の計算により得

られた励起エネルギーをスピン I の関数として図 1 に示す。この図より、イラスト状態に関して、2つの生成座標法の結果は殻模型計算を良く再現していることが分かる。特に殻模型の結果では、スピンの 6 と 8 の状態におけるエネルギーの差が小さくなっており、生成座標法でもその傾向をよく示している。

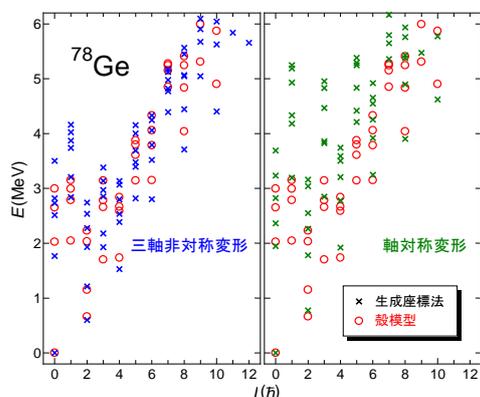


図 5 ^{78}Ge 原子核に対する生成座標法 (×印) と殻模型 (○印) によるエネルギー準位の計算結果の比較。図の左が三軸非対称変形の効果を取り入れた生成座標法の計算結果で、右が軸対称変形の効果のみを取り入れたもの。

他の状態に関しては、軸対称変形の場合、殻模型計算のスピンの 2、3、5 の低エネルギー状態を再現することができない。これに対して、三軸非対称変形の場合はこれらの状態を再現することに成功した。このことから、これらの状態を再現するためには三軸非対称変形の効果を波動関数に取り入れることが重要であることが分かった。原子核の三軸非対称変形に起因する、イラスト状態の上に見えるスピンの 2、3、4、5 の状態はガンマバンドと呼ばれており、質量数 130 領域等の偶偶核で多くの研究が行われている。質量数 80 領域の偶偶核において三軸非対称変形の重要性を明らかにした研究は行われておらず、本研究により初めてそれが示された。

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 10 件)

- ① N. Yoshinaga, K. Higashiyama, P. H. Regan, Shell Model Study of Neutron Rich Se and Ge Isotopes, AIP Conference Proceedings, 査読無, Vol. 1120, 2009, pp. 255–259
- ② N. Yoshinaga, K. Higashiyama,

A Simple Description of Doublet Bands in Mass around 100, AIP Conference Proceedings, 査読無, Vol. 1120, 2009, pp. 599–600

- ③ Toshio Suzuki, Michio Honma, Koji Higashiyama, Takashi Yoshida, Toshitaka Kajino, Takaharu Otsuka, Hideyuki Umeda, Ken'ichi Nomoto, Neutrino-induced reactions on ^{56}Fe and ^{56}Ni , and production of ^{55}Mn in population III stars, Physical Review C, 査読有, Vol. 79, 2009, pp. 061603/1–4
- ④ N. Yoshinaga, K. Higashiyama, P. H. Regan, Band structure of doubly-odd Tc and Rh isotopes, AIP Conference Proceedings, 査読無, Vol. 1090, 2009, pp. 599–600
- ⑤ Naotaka Yoshinaga, Koji Higashiyama, Band structure of doubly-odd Tc and Rh isotopes, AIP Conference Proceedings, 査読無, Vol. 1090, 2009, pp. 589–590
- ⑥ N. Yoshinaga, K. Higashiyama, Systematic studies of doublet bands in doubly-odd nuclei using a simple model, INPC 2007, 査読無, Vol. 2, 2008, pp. 376–378
- ⑦ N. Yoshinaga, K. Higashiyama, P. H. Regan, High-spin structure of neutron-rich Se, As, Ge, and Ga isotopes, Physical Review C, 査読有, Vol. 78, 2008, pp. 044320/1–12
- ⑧ Koji Higashiyama, Naotaka Yoshinaga, Simple Description of Doublet Bands with Mass of Approximately 100, Progress of Theoretical Physics, 査読有, Vol. 120, 2008, pp. 525–548
- ⑨ G. A. Jones, P. H. Regan, Zs. Podolyak, N. Yoshinaga, K. Higashiyama 他, 計 32 名, Yrast studies of $^{80,82}\text{Se}$ using deep-inelastic reactions, Physical Review C, 査読有, Vol. 76, 2007, pp. 054317/1–5
- ⑩ K. Higashiyama, N. Yoshinaga, Application of a quadrupole-coupling model to doublet bands in doubly odd nuclei, The European Physical Journal A, 査読有, Vol. 33, 2007, pp. 355–374

[学会発表] (計15件)

- ① 東山幸司、吉永尚孝、質量数 80 領域の偶偶核・奇核の生成座標法と殻模型、日本物理学会第 65 回年次大会、2010 年 3 月 20 日、岡山大学 (岡山県)
- ② 吉永尚孝、東山幸司、荒井亮、中重核のシッフモーメントの殻模型による評価、日本物理学会第 65 回年次大会、2010 年 3 月 20 日、岡山大学 (岡山県)
- ③ Koji Higashiyama、Naotaka Yoshinaga、Generator coordinate method analysis of low-lying and high-spin states in medium- and heavy-mass nuclei、T Third Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physical Society and the Physical Society of Japan、2009 年 10 月 17 日、Hilton Waikoloa Village (アメリカ)
- ④ Naotaka Yoshinaga、Koji Higashiyama、Effective interactions between neutrons and protons in the intruder orbitals、T Third Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physical Society and the Physical Society of Japan、2009 年 10 月 15 日、Hilton Waikoloa Village (アメリカ)
- ⑤ 東山幸司、吉永尚孝、生成座標法による開殻系の解析、日本物理学会第 64 回年次大会、2009 年 3 月 27 日、立教大学 (東京都)
- ⑥ 吉永尚孝、東山幸司、中重核領域奇奇核での中性子・陽子間有効相互作用、日本物理学会第 64 回年次大会、2009 年 3 月 27 日、立教大学 (東京都)
- ⑦ 東山幸司、吉永尚孝、生成座標法による中重核の記述、日本物理学会 2008 年秋季大会、2008 年 9 月 20 日、山形大学 (山形県)
- ⑧ 吉永尚孝、東山幸司、中性子過剰 Ge-Se 同位体の核構造、日本物理学会 2008 年秋季大会、2008 年 9 月 20 日、山形大学 (山形県)
- ⑨ Koji Higashiyama、Shell model study of neutron rich Se and Ge isotopes、The 5th International Conference on Exotic Nuclei and Atomic Masses (ENAM08)、2008 年 9 月 11 日、The Ryn Castle Hotel (ポーランド)
- ⑩ K. Higashiyama、N. Yoshinaga、P. H. Regan、High-spin structure of neutron rich Se and Ge isotopes、The CNS-RIKEN Joint Symposium on Frontier of gamma-ray spectroscopy and Perspectives for Nuclear Structure Studies (gamma08)、2008 年 4 月 3 日、理化学研究所 (埼玉県)
- ⑪ 東山幸司、吉永尚孝、平均場を用いた生成座標法と殻模型の比較、日本物理学会第 63 回年次大会、2008 年 3 月 26 日、近畿大学 (大阪府)
- ⑫ 吉永尚孝、東山幸司、質量数 130 領域の殻模型的アプローチによる β 崩壊、日本物理学会第 63 回年次大会、2008 年 3 月 26 日、近畿大学 (大阪府)
- ⑬ 東山幸司、吉永尚孝、中性子過剰 A~80 領域の高スピン構造、日本物理学会第 62 回年次大会、2007 年 9 月 23 日、北海道大学 (北海道)
- ⑭ 吉永尚孝、東山幸司、核子対殻模型による中重核領域の β 崩壊、日本物理学会第 62 回年次大会、2007 年 9 月 21 日、北海道大学 (北海道)
- ⑮ Koji Higashiyama、Microscopic description of doubly-odd nuclei with mass approximately 100、The 23rd International Nuclear Physics Conference、2007 年 6 月 4 日、東京国際フォーラム (東京都)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

東山 幸司 (HIGASHIYAMA KOJI)
千葉工業大学・工学部・助教
研究者番号：60433679