

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 16 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2013

課題番号：22540285

研究課題名(和文) 高スピン・エキゾチック変形原子核の研究

研究課題名(英文) Study of exotic deformed high-spin states in nuclei

研究代表者

清水 良文 (Shimizu, Yoshifumi)

九州大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：90187469

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円、(間接経費) 810,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、通常の原子核では現れないエキゾチックな変形状態を調べ、その変形状態に特有の集団的運動としての回転励起状態を、大きな角運動量を持つ高スピン状態まで研究した。ここでのエキゾチック変形とは正四面体型の変形であり、よく知られた原子核の四重極変形(楕円型変形)とは異なった高次の点群対称性を持っており、量子力学的スペクトルに特徴的な様相が現れる。角運動量及びパリティ射影法を用いた微視的計算により、世界で始めてこの特徴的なスペクトルが現れることを示すことができた。正四面体変形状態の存在はまだはっきりと確認されていないが、今回の結果はこれからの研究に大きな示唆を与えるものと期待できる。

研究成果の概要(英文)：In this project, the exotic deformation and its associated collective rotational excitations have been studied up to the high-spin states. As for the exotic deformation we focused on the tetrahedral deformation, which has one of the higher point-group symmetries and is very different from the usual quadrupole deformation (elliptic shape). It was predicted that a very characteristic quantum mechanical spectrum appears for the tetrahedrally-symmetric deformed nucleus. We have, for the first time, succeeded to show that such a characteristic spectrum indeed emerges in tetrahedrally-deformed nuclei by employing fully microscopic quantum-number-projection calculation, i.e., by angular momentum, number, and parity projections at the same time. Although the tetrahedrally-deformed nuclear states have not yet confirmed experimentally, it can be expected that the present result gives an important clue for the future study of this interesting exotic deformation.

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：エキゾチック変形 正四面体変形 原子核高スピン状態 量子数射影法 角運動量とパリティの同時射影

## 1. 研究開始当初の背景

原子核は高々数百個の核子（陽子と中性子）からなる有限量子多体系であるが、基底状態や本研究で対象とする分光学研究が可能な低励起状態では、核子が全体として作る平均場が重要な役割を果たす。この平均場は核子間有効相互作用から自己無撞着に作られるものであり、自発的に回転対称性を破った原子核の変形を引き起こす。実際、多くの原子核の基底状態はレモン型又はミカン型の四重極変形（楕円体型変形）をしているが、パリティを破った洋梨型の変形の存在も知られている。これらの変形は、結晶や分子の分類に用いられる点群対称性でいうところの2次（ある軸の回りの180°回転）の対称性を持つが、より高次の対称性を持った変形状態は存在しないのであろうか。近年、特に図1に示すような正四面体（tetrahedral）型変形が多くの原子核の励起状態に（または場合によっては基底状態にも）存在する可能性が指摘された[1]。分子の世界では例えばメタン（CH<sub>4</sub>）など、分子の配置が正四面体型になるものがいくつかあり比較的馴染み深いものであるが、原子核の平均場は構成粒子である多数の核子の協同現象によって作られるので、その平均場の変形が正四面体型になることは決して自明ではない。

これまで正四面体型の変形は、軽い核、例えば酸素原子核（O）のクラスター励起状態、すなわち、<sup>16</sup>Oを4つのアルファ粒子（α）から成るとみなせる励起状態において、その存在が指摘されてきた。分子の場合との類似性から、4つのα粒子が弱く束縛されている時に最もエネルギー的に有利な配位はα粒子が正四面体の頂点に位置する場合だからである。しかしながら、より重い原子核でこのような正四面体対称性を持つ核子の平均場が実現している証拠は、今のところない状況であり、現実の原子核においてそのような変形状態が存在するかどうかを明らかにすることは大変興味深い。

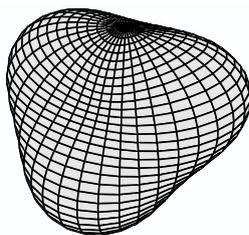


図1: 正四面体変形 (参考文献 [1] より)

## 【参考文献】

- [1] J. Dudek et al., Phys. Rev. Lett. 88 252502 (2002); Phys. Rev. Lett. 97 072501 (2006).

## 2. 研究の目的

### (1) 研究対象について

このように本研究では高次対称性を持つエキゾチック変形状態を、原子核中の核子の自己無撞着平均場を基礎にした微視的立場から研究することが主たる目的である。正四面体型変形のような高次対称性をもつ変形がエネルギー的に有利になる可能性は、よく知られた原子核の魔法数が出現するメカニズムであるシェル効果（殻効果）を考えると明らかになってくる。

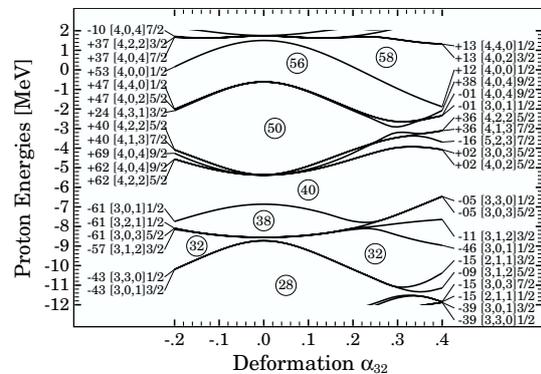


図2: 正四面体変形度を変化させた時の陽子の独立粒子エネルギーの振る舞い (参考文献 [1] より)。

原子核の基底状態は、平均場中の核子の独立粒子軌道を下から順番に詰めていくことによって得られるが、独立粒子エネルギーにギャップが存在すると、ちょうどそこまで詰った時により安定になる。図2では、現実的平均場中の独立粒子エネルギーを正四面体変形度（ $\alpha_{32}$ ）の関数として示しているが、 $\alpha_{32} = 0$ となる点はちょうど球形であり、大きな殻ギャップが生じていることがわかる。これはよく知られた、特に安定な原子核の球形魔法数 28, 50, ... に対応する。正四面体変形度  $\alpha_{32}$  を大きくすると、核子数 32, 40, 58 のところでそれに匹敵する殻ギャップが存在していることわかるが、これは正四面体型の高い対称性のために、一部の軌道にクラスター縮退の2重縮退を越えた4重縮退が起こることから来ている。このような正四面体変形に基づく新しい魔法数に対応する原子核が特にエキゾチック変形を起こしやすく、これらの原子核を主な対象として研究を行なう。

### (2) 具体的な目標とその意義

正四面体型変形状態のような高次のエキゾチックな変形状態は実際には内部状態であり、直接観測可能ではない。基底状態だけを見ているのは変形しているかどうかはわからないのと同様に、それらの存在を確かめるためには、エキゾチックな変形状態に特有の観測可能な励起スペクトルの特徴を明らかにする必要がある。一般に、平均場が自発的に回転対称性を破って変形した場合には、必ず対称性を回復する集団的回転運動が起こる。このことは正四面体型変形の場合も同じであり、純粋な正四面体型変形状態を内部状態とする集団的回転状態の量子的スペクトルがどのようなものになるのか、そして、それらの回転準位間にはどのような特徴的電磁遷移が期待されるのかを明らかにすることが目標となる。

平均場近似に基づいたエキゾチック変形状態の研究は、これまでも行なわれているが、エキゾチック変形の決定的な証拠を得るためには、分光学的スペクトルの分析が不可欠である。本研究では、回転スペクトルの理論的予想を行うと同時に、それぞれの回転準位間の電磁遷移確率を微視的立場から計算することが重要な点である。また、エキゾチック変形の大きさを変化させることによって、励起スペクトルにどのような変化を起こるかを調べることも可能になる。このように、高次対称性が量子多体系に及ぼす効果を系統的に明らかにすることが本研究の意義である。

### 3. 研究の方法

#### (1) 研究遂行のための理論的アプローチ

高次変形は表面エネルギーを損するので、正四面体型変形状態が実際にどの程度の変形度を持ち、どの程度のエネルギーになるかを見積もるには、現実的な理論計算が不可欠である。最近の研究によると、正四面体型変形状態でも超流動効果(対相関)が存在する可能性があるため、回転の効果だけでなく超流動の効果も取り入れる必要がある。また、正四面体型変形はパリティ(偶奇性)をも破っているので、全ての対称性が破れた現実的平均場を用いることになる。本研究の目標は量子スペクトルの計算であり、このためには平均場理論を越えた取扱いが必須であるが、このために全ての対称性を破った最も一般的な平均場状態を出発点として、対称性を回復し多体系の量子状態を計算する方法である量子数射影計算を用いる。特に、角運動量の固有状態を引き出す角運動量射影が、分光学的スペクトルを得るために重要であるが、それだけではなく

パリティ射影や(超流動性も考慮して)粒子数射影も同時に行う必要があり、そのような一般的計算プログラムを独自に開発することが研究方法の根幹的な部分になる。

#### (2) 国際共同研究

実際に、現実の原子核に対する信頼性の高い予言を行うためには、出発点の平均場状態が重要である。この点で、フランス・ストラスブール大学の J.Dudek 氏達が開発している、精度の高い現実的なポテンシャルによって計算された平均場状態を有用である。Dudek 氏は、近年正四面体型変形状態を精力的に研究しており、高次点群対称性が原子核に及ぼす影響についても造詣が深い、この分野の第一人者である。本研究はこの Dudek 氏及び氏を代表とするフランス・ポーランドの理論・実験グループの人達との共同研究として進めるが、本研究計画は、実験結果と正四面体型変形状態の新しい運動モードを結びつける手段として、先方からも強く期待されている。このために申請者は毎年 Dudek 氏のところに2・3週間程度海外出張を行い、共同研究の具体的方法を議論しながら進める。

#### (3) 計算機の導入

上で述べたような、最も一般的な平均場状態から量子数射影法によって、量子スペクトルを求めるためには、多次元の行列の積や逆行列・行列式の計算、また、通常の固有値問題や一般化固有値問題の計算を、非常に多数回行なわなければならない。行列の次元そのものはそれほど大きくはないが(数100次元から10,000次元程度)、特に角運動量射影演算子に含まれるオイラー角に関する積分の分点によっては、それらの計算を数十万回繰り返す必要があり、非常に計算時間がかかる。このために、比較的容易に手に入れられる、最大規模のメモリを持った計算機(高性能パソコン)を3台導入する。特に最近ではCPUを多数持つマルチコア計算機が普及しており、複数のコアを並列的に動かすことによって、非常に効率良く計算することが可能であり、計算時間を大幅に短縮することに成功している。

### 4. 研究成果

#### (1) 主な成果

まず第一に述べるべき成果は、博士課程の大学院生とともに、最も一般的な平均場状態から量子数射影計算を行なう効率の良い計算法を開発し、実用的な計算を可能にしたことである。この効率的方法是は任意の

平均場状態に対して、その正準基底の占有率に基づき寄与の無視できる多くの軌道を省くことによって行なうものであり、これにより平均場を計算する時に実際に用いられる基底に依らず、高速に量子数射影計算を遂行できる (雑誌論文 [8])。

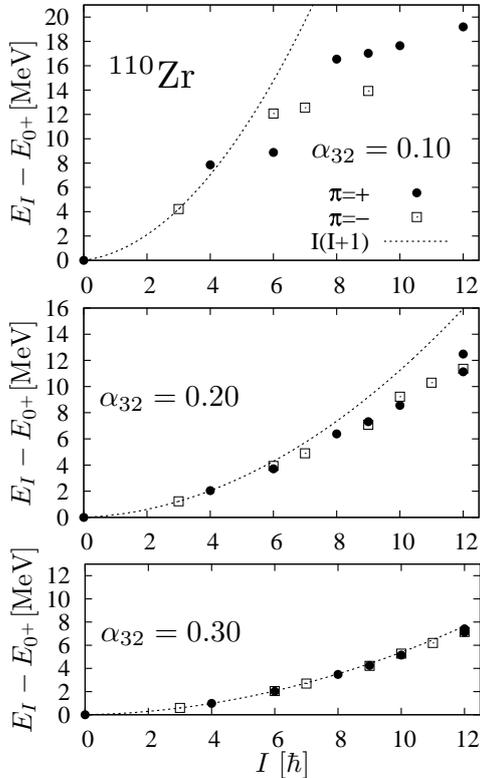


図 3: 正四面体変形状態の量子スペクトルの一例。原子核は  $^{110}_{40}\text{Zr}_{70}$  であり、横軸は  $\hbar$  を単位とする角運動量。上から正四面体変形度が小・中・大の場合を示す。( ) はパリティが正 (負) の状態を表す。点線は  $3^-$  状態を通る、 $I(I+1)$  に比例する理想的な回転バンド (雑誌論文 [3] より)。

この方法を用いて計算した量子スペクトルの例を図 3 に示す。この原子核  $^{110}\text{Zr}$  は陽子数も中性子数も魔法の数 ( $Z = 40, N = 70$ ) であり、理想的な正四面体変形状態が期待されている。このような偶々 2 重閉殻核では、点群でいうところの正四面体群の  $A_1$  規約表現が実現されることが予想され、その場合の回転スペクトルは特徴的なスピンとパリティの値、 $0^+, 3^-, 4^+, 6^+, 6^-, 7^-, 8^+, 9^+, 9^-, 10^+, 10^-, 11^-, 2 \times 12^+, 12^-, \dots$  を持つ。実際、図 3 のスペクトルはまさにこの法則に従っている。また、図 3 に示されているように、変形度が小さい時は素励起モードである  $3^-$  状態を多重励起した振動的なスペクトル、変形度が大きい時は同じ角運動量  $I$  の状態が縮退すると同時に励起エネルギーが  $I(I+1)$  に比例する回転的なス

ペクトルになっており、通常の四重極変形でも見られる振動・回転の「相転移」の様相が正四面体変形でも見られることがわかる。

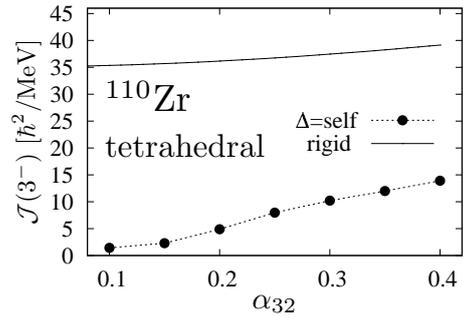


図 4:  $3^-$  状態から引き出された正四面体回転バンドの慣性能率。横軸は正四面体変形度で、実線は剛体を仮定した時の慣性能率 (雑誌論文 [3] より)。

このような正四面体変形の回転状態の興味深い特徴として、慣性能率の値が小さいことが挙げられる。図 4 に示すように対応する剛体値に比べてかなり小さい。四重極変形の場合、慣性能率が小さくなるのは超流動効果によるものであるが、今の場合、原子核は偶々 2 重閉殻核で超流動効果は非常に弱く、何故このような小さな慣性能率になるのかの理由はよく分かっていない。

変形した原子核において実験室系での物理量の観測値を求めるには、量子数射影、特に角運動量射影が必要になる。本研究の対象は正四面体型のエキゾチック変形であるが、全く一般的な平均場からの量子数射影を行なう計算が可能になり、その他の応範囲は広い。一例として、四重極変形した不安定核の反応断面積の計算において、変形核の実験室系での密度分布を角運動量射影法によって計算し、微視的な核反応理論へ応用した (雑誌論文 [6])。角運動量が低い状態に対しては、射影計算で求めた密度分布は変形した内部状態の密度分布を角度平均したもので十分よく近似できることがわかる。

## (2) 成果の国内外でのインパクト

これまでも平均場理論の範囲内では正四面体変形状態の研究は行なわれてきたが、量子スペクトルの計算は、特に重い原子核ではこれまでほとんど行なわれて来なかった。回転不変性・パリティ・粒子数不変性を破る最も一般的な平均場を扱う必要があるからである。上に述べたように、正四面体群という点群の対称性を持った平均場に基づいて微視的量子数射影計算により、世界で始めて量子スペクトルを導出することに成功したことは非常にインパクトが大きい (雑誌

論文 [3])。今までのところ正四面体変形状態は実験上明確に同定されていないが、それは一つには正四面体変形に基づく集団運動の励起スペクトルや電磁遷移確率などの観測量がどのようなものになるかが分からなかったからである。本研究により正四面体回転スペクトルが明らかになり、また、電磁遷移の計算も可能になったことにより、これからの実験的研究に大きな示唆が与えられるものと期待できる。

### (3) 今後の展望

本研究では、最も典型的な場合として偶々2重閉殻核を主として研究してきた。しかしながら、この閉殻核に一つの核子が付いた奇核や、2つの核子が4重縮退準位を占有した場合などにおいては、先に見た $A_1$ 以外の正四面体群の規約表現に属する状態が現れる。このような一般的な場合についても、研究を進めている。また、理想的な正四面体変形ではなく、例えば、よく知られた楕円体変形や洋梨型変形に正四面体変形が重ね合わさったような一般的な変形が実現する可能性も考えられる。このような場合は、正四面体群の対称性は破れており、群論の知識はそのままでは使えないので、微視的な量子数射影計算がより一層重要になる。そのような場合の研究も進めていくことが必要である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(10件)

- [1] S. Watanabe, K. Minomo, M. Shimada, S. Tagami, M. Kimura, M. Takechi, M. Fukuda, D. Nishimura, T. Suzuki, T. Matsumoto, Y. R. Shimizu, and M. Yahiro: Ground-state properties of neutron-rich Mg isotopes, *Physical Review C*, 査読有, **89**:4 (2014), 044610–1–13. DOI: 10.1103/PhysRevC.89.044610
- [2] S. Sasabe, T. Matsumoto, S. Tagami, N. Furutachi, K. Minomo, Y. R. Shimizu, and M. Yahiro: Reaction Mechanism in Odd-Even Staggering of Reaction Cross Sections, *Physical Review C*, 査読有, **88**:3 (2013), 037602-1-4. DOI: 10.1103/PhysRevC.88.037602
- [3] S. Tagami, Y. R. Shimizu, and J. Dudek: Microscopic Study of Tetrahedrally Symmetric Nuclei by Angular-Momentum and Parity Projection Methods, *Physical Review C*, 査読有, **87**:5 (2013), 054306–1–15. DOI: 10.1103/PhysRevC.87.054306
- [4] Fang-Qi Chen, Yang Sun, P. M. Walker, G. D. Dracoulis, Y. R. Shimizu and J. A. Sheikh: Mixing effects on  $K$ -forbidden transition rates from the  $6^+$  isomers in the  $N=104$  isotones, *Journal of Physics G*, 査読有, **40**:1 (2013), 015101–1–12. DOI:10.1088/0954-3899/40/1/015101
- [5] S. Takahara, N. Tajima, and Y. R. Shimizu: Nuclear prolate-shape dominance with the Woods-Saxon potential, *Physical Review C*, 査読有, **86**:6 (2012), 064323–1–13. DOI: 10.1103/PhysRevC.86.064323
- [6] T. Sumi, K. Minomo, S. Tagami, M. Kimura, T. Matsumoto, K. Ogata, Y. R. Shimizu, and M. Yahiro: Deformation of Ne isotopes in the island-of-inversion region, *Physical Review C*, 査読有, **85**:6 (2012), 064613–1–17. DOI: 10.1103/PhysRevC.85.064613
- [7] K. Minomo, T. Sumi, M. Kimura, K. Ogata, Y. R. Shimizu, and M. Yahiro: Determination of the structure of  $^{31}\text{Ne}$  within full-microscopic framework, *Physical Review Letter*, 査読有, **108**:5 (2012), 052503–1–5. DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.052503
- [8] S. Tagami and Y. R. Shimizu: Efficient Method to Perform Quantum Number Projection and Configuration Mixing for Most General Mean-Field States, *Progress Theoretical Physics*, 査読有, **127**:1 (2012), 79–105. DOI: 10.1143/PTP.127.79
- [9] K. Minomo, T. Sumi, M. Kimura, K. Ogata, Y. R. Shimizu, and M. Yahiro: Deformation effect on total reaction cross sections for neutron-rich Ne isotopes, *Physical Review C*, 査読有, **84**:3 (2011), 034602–1–5. DOI: 10.1103/PhysRevC.84.034602
- [10] S. Takahara, N. Onishi, Y. R. Shimizu, and N. Tajima: The role of spin-orbit potential in

nuclear prolate-shape dominance, *Physics Letter B*, 査読有, **702:5** (2011), 429–432.  
DOI: 10.1016/j.physletb.2011.07.030

〔学会発表〕(18 件)

- [1] 嶋田充宏, 田上真伍, 清水良文: ガウス基底を用いた変形した不安定核の回転状態の研究 II, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014 年 3 月 27 日, 東海大学湘南キャンパス.
- [2] 田上真伍, 清水良文, J.Dudek: Gogny 相互作用を用いた量子数射影による四面体変形の研究, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014 年 3 月 27 日, 東海大学湘南キャンパス.
- [3] S. Tagami, M. Shimada, Y. Fujioka, Y. R. Shimizu, and J. Dudek: Nuclear tetrahedral states and high-spin states studied by quantum number projection method, 20th Nuclear Physics Workshop “Marie & Pierre Curie” on “Structure and Dynamics of Atomic Nuclei”, 25 – 29 Sep., 2013, Kazimierz Dolny, Poland.
- [4] J. Dudek, D. Curien, D. Rouvel, K. Mazurek, Y. R. Shimizu, and S. Tagami: The suggested presence of the tetrahedral-symmetry in the ground-state configuration of the  ${}^{96}_{40}\text{Zr}_{56}$  nucleus, 20th Nuclear Physics Workshop “Marie & Pierre Curie” on “Structure and Dynamics of Atomic Nuclei”, 25 – 29 Sep., 2013, Kazimierz Dolny, Poland.
- [5] 嶋田充宏, 田上真伍, 清水良文: ガウス基底を用いた変形した不安定核の回転状態の研究, 日本物理学会 2013 季大会, 2013 年 9 月 21 日, 高知大学朝倉キャンパス.
- [6] 田上真伍, 清水良文, J.Dudek: 点群の射影演算子を用いた四面体変形スペクトルの変形核への適用, 日本物理学会 2013 秋季大会, 2013 年 9 月 21 日, 高知大学朝倉キャンパス.
- [7] 田上真伍, 清水良文, J. Dudek: 量子数射影による四面体変形核の分析—四面体群のスペクトルとの比較, 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 28 日, 広島大学東広島キャンパス.
- [8] 嶋田充宏, 田上真伍, 清水良文: 変形した不安定核での 2 中性子相関, 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 26 日, 広島大学東広島キャンパス.
- [9] S. Tagami, Y. R. Shimizu, and J. Dudek: Study of rotational motions associated with exotic nuclear shapes by angular momentum projection method, ポスター発表, Collective Motion in Nuclei under Extreme Conditions (COMEX4), October 22–26, 2012, Shonan Village Center, Japan.
- [10] 田上真伍, 藤岡雄大, 清水良文: 非軸対称変形核におけるエキゾチックは回転運動の研究, 日本物理学会第 67 回秋季大会, 2012 年 9 月 12 日, 京都産業大学.
- [11] J. Dudek, D. Curien, A. Gózdź, Y. R. Shimizu, and S. Tagami: Exotic Geometrical Symmetries in nuclei: From Group Theory to Experiments, Zakopane Conference on Nuclear Physics, Poland, 1 – 7 Sep., 2012.
- [12] S. Tagami, Y. R. Shimizu, and J. Dudek, Efficient method for quantum number projection and its application to tetrahedral nuclear states, YKIS2011 Symposium “Frontier Issues in Physics of Exotic Nuclei”, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan, 11 – 15 Oct., 2011.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

清水 良文 (Shimizu, Yoshifumi)  
九州大学・大学院理学研究院・准教授  
研究者番号 : 90187469

### (2) 研究分担者

なし