

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 4 月 22 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400245

研究課題名(和文) 核準位密度における殻構造及び集団運動の効果の微視的理論による解明

研究課題名(英文) Elucidation of effects of shell structure and collective motions on nuclear level densities via microscopic theories

研究代表者

中田 仁 (Nakada, Hitoshi)

千葉大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80221448

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：殻模型モンテカルロ法を用いて微視的立場から核準位密度の記述を進め、偶々核と同一の枠組みにより希土類領域の奇中性子核の形状変化と準位密度を再現した他、模型空間を拡張してNi領域の核準位密度のパリティ依存性を再現することにも成功した。これらの成果を基に、有限温度平均場近似の結果との比較も援用して、振動及び回転による集団運動の効果、さらに粒子数保存則の影響を調べ新しい知見を得た。他方、半微視的有効相互作用を用いた自己無撞着平均場計算により、マジック・ナンバーに代表される殻構造変化の全体像を、実験値とほぼ矛盾なく明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The nuclear level densities have been described from microscopic standpoints using the shell-model Monte Carlo methods. Level densities and shape change of the odd-neutron nuclei in the rare-earth region are successfully reproduced by the same framework with those for the surrounding even-even nuclei. Parity-dependence of the level densities of the Ni-region nuclei is also reproduced in an extended model space. Based on these achievements and comparing them to the results of the finite-temperature mean-field approximations, effects of the vibrational and rotational collective motions have been investigated. Influence of the particle-number conservation has been investigated as well. Besides, by self-consistent mean-field calculations with semi-realistic effective interactions, shell structure and its variation, which are manifested by the magic numbers, have been overviewed, which are compatible with the experimental data.

研究分野：理論核物理

キーワード：核準位密度 殻模型モンテカルロ法 殻構造 集団運動 平均場近似

1. 研究開始当初の背景

原子核の準位密度は低エネルギー核反応を取扱う上で非常に重要な物理量である。種々の実験データの解析にも用いられる他、宇宙での元素合成のモデル計算における重要な input であり、核質量と共に我々の身の回りの元素の起源を定量的に理解する上での key となっている。中田(研究代表者)は、Y. Alhassid (研究協力者) 等との共同研究の下で、殻模型モンテカルロ法を用いて模型空間内での厳密な量子力学計算を実行することにより核準位密度の微視的研究を推進し、その精密な記述に成功してきた。最近では、中重核において変形核の準位密度及び球形核から変形核への crossover 転移も精密に扱えることを明らかにし、また核準位密度の角運動量依存性の理解も大きく進展した。他方、初期の中質量核に対する研究で核準位密度のパリティ依存性を指摘したが、これに刺激された実験が行われ、エネルギーにより不一致も指摘されるようになった。問題となっている Fe-Ni 領域核は、s 過程及び r 過程による重元素合成において特に重要な役割を担っており、その準位密度のパリティ依存性は重元素合成の理解に大きく影響する可能性があるため、再検討が望まれている。

核準位密度の記述においては、その簡便さと膨大な数の核種に比較的容易に応用できることから、現象論的モデルによるものや平均場近似によるものがよく用いられる。それらは一定の成功を収めてきたが、閉殻近傍での殻構造の影響、及び集団運動の影響について大きな不定性を残している。これは、それらの取入れ方が不十分または全く現象論的で、微視的立場からの理解が進んでいないためである。殻模型モンテカルロ法の応用により、このような欠点を克服し微視的な理解を大きく進めることが期待される。

近年、テンソル力等が原子核の殻構造に陽子数・中性子数依存性をもたらすことが指摘されており、不安定核の準位密度を予言するためにはその mechanism を定量的レベルで把握することも重要と考えられる。

2. 研究の目的

核準位密度は宇宙核物理学の重要な input であり、理論的立場からは経験的・半経験的研究が進められてきたが、その微視的理解は十分とは言えず、予言能力にも限界がある。本研究では主として殻模型モンテカルロ法を用い、殻構造や集団運動の効果を適切に取り入れることのできる殻模型により、特に理解が遅れている殻構造及び集団運動(対相関変形等)の効果を微視的立場から解明することを目的とする。まず定性的性質を解明した上で、パリティ依存性や角運動量依存性を含めた解析を行い、系統的・定量的理解を図る。

3. 研究の方法

主として殻模型モンテカルロ法による大規模数値計算を実行し、模型空間内で有効 Hamiltonian のみを input として核準位密度を求め、実験データと比較する。模型空間は変形や cover すべき励起 energy 等の様々な物理的条件を考慮に入れて定め、有効 Hamiltonian には、Woods-Saxon potential を基にした 1 粒子 energy、及び主要な集団運動を記述し得る一方でモンテカルロ法の符号問題を避けることが可能な、対相互作用と多重極相互作用から成る 2 体相互作用を用いる。今までの研究により、このような有効 Hamiltonian が核準位密度の研究に適していることが確認済みである。

パリティ依存性や角運動量依存性を含めた解析を行うため、殻模型モンテカルロ法に種々の量子数射影法を組み込む。また、有限温度平均場近似も援用し、核準位密度における殻構造及び集団運動の効果を調べる。Fe-Ni 領域核、Ca 領域核、希土類核、Zr 周辺核等を計算対象とする。

核準位密度の理解、及びその殻模型による計算を進める上でも、原子核の殻構造を適切に理解することが前提となる。半微視的核子間相互作用による自己無撞着平均場計算を実行して、テンソル力等による殻構造変化の効果も調べる。

4. 研究成果

(1) 核準位密度

希土類領域の奇中性子核の形状変化と準位密度

Nd-Sm 領域の偶々核で用いたものと同じ Hamiltonian を使って殻模型モンテカルロ法を実行し、Nd-Sm 領域の球形核・変形核・遷移核にわたる一連の奇中性子核の状態密度を計算した。その結果、偶々核と同様、中性子数の変化に伴う形状相転移の様子も含め核準位密度の実験データをよく再現することを示した。またその際、実験データを援用して殻模型モンテカルロ法の結果から基底状態エネルギーを引き出す新しい方法を開発した。

Ca-Ni 領域の核準位密度の系統的研究

まず、この領域で十分に広い模型空間に対する有効 Hamiltonian を定めるため、共鳴一粒子軌道が関わる相互作用行列要素の計算法について検討した。その結果、Pade 近似による外挿が有効であることが分かった。さらに、Ni 領域において、十分に広い模型空間に対して実験データをよく再現しかつ殻模型モンテカルロ計算に適した有効相互作用パラメータを見出し、それを用いた殻模型モンテカルロ計算を実行して、微視的立場から状態密度の実験データを再現することに成功した。⁵⁸Ni の J=2 準位密度について、その parity による差異が実験的に調べられ、ある energy 領域で約 20 年前に実行された計算の結果との不一致が指摘されていたが、当時の計算では無視されていた Z=N=20 を跨ぐ励起が

parity 依存性に寄与し、それを考慮に入れることにより実験データが再現できることを確認した。

全核準位密度の直接計算

従来の殻模型モンテカルロ計算では磁気量子数に関する縮退を取り除くことが必ずしも容易でないため状態密度を計算するのが通常であった。その場合、準位密度の実験データを状態密度に変換するため角運動量依存性を与えるモデルが必要となる。これに対し、 J_z に関する量子数射影を用いることにより、磁気量子数に関する縮退を除去し準位密度を直接計算する方法を新たに開発した。この方法ではより高いエネルギーまで実験データとの直接的な比較が行える。実際に Fe-Ni 領域核及び希土類の ^{162}Dy に応用し、実験値とのよい一致を確認した。

平均場近似の benchmark

同一の模型空間と Hamiltonian を用いて、殻模型モンテカルロ法により求めた厳密解と有限温度平均場理論の結果を比較し、希土類核を例としてエネルギー期待値、エントロピー、準位密度について平均場近似の精度と限界を明らかにすると共に、平均場理論に基づく取扱いの改良法を提案した。基底状態エネルギーがずれるにも拘らず、粒子数保存の効果や回転の効果等を部分的に補正することにより、相転移点近傍などの限られた領域を除き有限温度平均場近似の結果から殻模型モンテカルロ法の結果がほぼ再現できる。数値計算が殻模型モンテカルロ法に比べ遥かに簡便であるため、有限温度平均場近似が有効な範囲において、多数の核に亘る系統的な計算を高速に実行できる可能性が開け、またその基礎付けが得られたと言える。

BCS に対する粒子数射影と vibrational enhancement

有限温度 BCS 理論と粒子数射影を組み合わせ、Nd-Sm 領域の偶々核に応用し、振動状態による核準位密度の collective enhancement factor の温度依存性を調べた。その結果、従来振動状態の影響は低温で速やかに消えると考えられてきたが、この理解は通常平均場近似が持ち込む粒子数非保存に依拠している可能性があり、粒子数保存の成り立つ実際の系では、振動状態の影響がより高温まで残ることを示唆する結果を得た。しかし、粒子数射影に伴い負エントロピーが生じるといった新たな問題が発生し得ることが分かり、今後の課題として残った。この影響を慎重に見積もる必要がある。

(2) 原子核の殻構造

Magic number の分布

自己無撞着平均場計算に基づき、対相関の強さを指標として、核図表のほぼ全体に亘り magic number の分布を調べた。現実的なテンソル力等を含んだ適切な有効相互作用（特に M3Y-P6 相互作用）を用いることにより、今まで知られている実験データとほぼ矛盾の

ない結果を得た他、実験データの乏しい中質量核以上の不安定核領域での magic number の予言も行った。この結果は今後の殻模型計算において模型空間を定めるための基礎として大変有用である。

実験との不一致が見られたのは、 ^{32}Mg 及び N=60 以上の Zr 核において N=20, Z=40 の magic number が残るといった点のみである。これらに対しては四重極変形の影響を考慮すべきと考えられる。

Isotope shift

Pb 核の isotope shift に対する 3 核子間 LS 力の効果を調べ、20 年来の問題であった Pb 核の isotope shift の N=126 での kink が、中性子軌道の縮退を無理に仮定することなしに 3 核子間 LS 力により説明できることを示した。これにより、原子核の殻構造に本質的な役割を果たしているスピン・軌道ポテンシャルに対して、3 核子間力の影響が重要であることが明らかになった。さらに、Pb 核の場合と同じ 3 核子間 LS 力により、半世紀近くに亘る難問であった ^{40}Ca と ^{48}Ca の荷電半径がほぼ等しいという実験データが説明できること、また Sn の isotope shift もよく再現することを示し、同時に ^{132}Sn において Pb の場合と同様の kink を予言した。これにより、原子核の殻構造に本質的な役割を果たしているスピン・軌道ポテンシャルに対する 3 核子間力の影響が重要であることが一層明確になった。 ^{132}Sn における kink の実験的検証が待たれる。

N=20, 28 核の変形

半微視的有効相互作用を用いた軸対称 Hartree-Fock 計算を実行し、N=20, 28 核の四重極変形及びその変形に対するテンソル力の効果を調べた。その結果、jj 閉殻である N=28 と 1s 閉殻である N=20 ではテンソル力の変形に対する影響が全く異なり、N=20 では変形を妨げ N=28 では促進することが分かった。 ^{32}Mg では、M3Y-P6 相互作用により球形解に近いエネルギーを持つ変形解が現れ、実験的に示唆されている変形共存を支持する結果が得られた。今後、対相関及び回転相関を取り入れることにより、2 つの解のエネルギーの大小関係についてよりよい評価を与えることが望まれる。

Zr 核の変形

半微視的有効相互作用を用いた軸対称 Hartree-Fock 計算を実行し、Zr 核の四重極変形及びその変形に対するテンソル力の効果を調べた。M3Y-P6 相互作用により N=40 近辺と N=60 以上での変形が同時に再現されることが確かめられた。これにより、実験データと一致しなかった核についても、四重極変形により解決する見込みが立ったと言える。

(3) 原子核の低エネルギー E1 強度の性質

原子核の低エネルギー E1 強度の性質及びそのエネルギー依存性を明らかにするため、

様々な有効相互作用を使って RPA 計算を実行し、遷移密度を分析してそれらの性質を調べた。その結果、低エネルギーで E1 遷移は中性子 skin と core の振動と解釈できるがエネルギーの上昇と共に徐々に陽子・中性子の振動に性質が移っていくこと、また 2 つのモードの比がエネルギーについて変化する様子は質量数や核種にあまり依存しないことが分かった。

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 17 件)

- 1 Y. Alhassid, G.F. Bertsch, C.N. Gilbreth, H. Nakada and C. Ozen, "Level densities of heavy nuclei in the shell model Monte Carlo approach", to be published in EPJ Web of Conferences "CNR'15 The 5th International Workshop on Compound Nuclear Reactions and Related Topics", 査読有
- 2 H. Nakada, E. Matsuyama and C. Ozen, "Persistence of Vibrational Collectivity in Nuclear Level Densities", to be published in EPJ Web of Conferences "CNR'15 The 5th International Workshop on Compound Nuclear Reactions and Related Topics", 査読有
- 3 Y. Alhassid, G.F. Bertsch, C.N. Gilbreth and H. Nakada, "Benchmarking mean-field approximations to level densities", Physical Review C 93, 044320-1 - 044320-16 (2016), 査読有, DOI:10.1103/PhysRevC.93.044320
- 4 Y. Alhassid, G.F. Bertsch, C.N. Gilbreth, H. Nakada and C. Ozen, "Microscopic nuclear level densities by the shell model Monte Carlo method", CERN Proceedings 2015-001 "Proceedings of 14th International Conference on Nuclear Reaction Mechanisms", edited by F. Cerutti, M. Chadwick, A. Ferrari, T. Kawano and P. Schoofs, pp. 41 - 48 (2015), 査読無
- 5 H. Nakada, "Nuclear mean fields produced from semi-realistic nucleonic interaction", Acta Physica Polonica B Proceedings Supplement 8, No. 3 "XXII Nuclear Physics Workshop 'Marie & Pierre Curie' Essential Problems in Nuclear Physics", pp. 629 - 636 (2015), 査読有, DOI:10.5506/APhysPolBSupp.8.629
- 6 H. Nakada, "Further evidence for three-nucleon spin-orbit interaction in isotope shifts of nuclei with magic proton numbers", Physical Review C 92, 044307-1 - 044307-6 (2015), 査読有, DOI:10.1103/PhysRevC.92.044307
- 7 Y. Alhassid, M. Bonett-Matiz, S. Liu and H. Nakada, "Direct microscopic calculation of nuclear level densities in the shell model Monte Carlo approach", Physical Review C 92, 024307-1 - 024307-5 (2015), 査読有, DOI:10.1103/PhysRevC.92.024307
- 8 H. Nakada and K. Sugiura, "Magic numbers predicted with semi-realistic NN interaction", JPS Conference Proceedings 6 "Proceedings of Conference on Advances in Radioactive Isotope Science (ARIS2014)", 030042-1 - 030042-4 (2015), 査読有, DOI:10.7566/JPSCP.6.030042
- 9 C. Ozen, Y. Alhassid and H. Nakada, "Collective enhancement of nuclear state densities by the shell model Monte Carlo approach", Journal of Physics: Conference Series 590 "NUBA Conference Series-1: Nuclear Physics and Astrophysics", 012025-1 - 012025-4 (2015), 査読無, DOI:10.1088/1742-6596/590/1/012025
- 10 C. Ozen, Y. Alhassid and H. Nakada, "Nuclear state densities of odd-mass heavy nuclei in the shell model Monte Carlo approach", Physical Review C 91, 034329-1 - 034329-4 (2015), 査読有, DOI:10.1103/PhysRevC.91.034329
- 11 Y. Alhassid, M. Bonett-Matiz, A. Mukherjee, H. Nakada and C. Ozen, "Recent Advances in the Application of the Shell Model Monte Carlo Approach to Nuclei", Journal of Physics: Conference Series 580 "11th International Spring Seminar on Nuclear Physics: Shell Model and Nuclear Structure achievements of the past two decades", 012009-1 - 012009-6 (2015), 査読有, DOI:10.1088/1742-6596/580/1/012009
- 12 H. Nakada and T. Inakura, "Effects of three-nucleon spin-orbit interaction on isotope shifts of Pb nuclei", Physical Review C 91, 021302(R)-1 - 021302(R)-5 (2015), 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevC.91.021302
- 13 Y. Alhassid, C. Ozen and H. Nakada, "Calculating Level Densities of Heavy Nuclei by the Shell Model Monte Carlo Method", Nuclear Data Sheets 118, pp. 233 - 236 (2014), 査読有, DOI:10.1016/j.nds.2014.04.045
- 14 Y. Alhassid, M. Bonett-Matiz, S. Liu, A. Mukherjee and H. Nakada, "Recent Advances in the Microscopic

- Calculations of Level Densities by the Shell Model Monte Carlo Method”, EPJ Web of Conferences 69 “CNR’13 - Fourth International Workshop on Compound Nuclear Reactions and Related Topics”, 00010-1 - 00010-10 (2014), 査読有, DOI:10.1051/epjconf/20146900010
- 15 C. Ozen, Y. Alhassid and H. Nakada, “Collectivity in Heavy Nuclei in the Shell Model Monte Carlo Approach”, EPJ Web of Conferences 69 “CNR’13 - Fourth International Workshop on Compound Nuclear Reactions and Related Topics”, 00011-1 - 00011-6 (2014), 査読有, DOI:10.1051/epjconf/20146900011
- 16 H. Nakada, T. Inakura and H. Sawai, “Crossover from skin-mode to proton-neutron-mode in E1 excitations of neutron-rich nuclei”, JPS Conference Proceedings 1 “Proceedings of the 12th Asia Pacific Physics Conference (APPC12)”, 013047-1 - 013047-4 (2014), 査読有, DOI:10.7566/JPSCP.1.013047
- 17 H. Nakada and K. Sugiura, “Predicting magic numbers of nuclei with semi-realistic nucleon-nucleon interactions”, Progress of Theoretical and Experimental Physics 2014, 033D02-1 - 033D02-17 (2014), 査読有, DOI:10.1093/ptep/ptu027
- [学会発表](計 2 件)
- 1 宮原聡, 中田仁, “半微視的有効相互作用を用いた Hartree-Fock 計算による Zr 核の四重極変形の研究”, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年 3 月 19 - 22 日, 東北学院大学(宮城県仙台市)
- 2 H. Nakada, “Topics on structure of spherical nuclei and effective nucleonic interaction”, 日本物理学会第 71 回年次大会 実験核物理・理論核物理領域合同シンポジウム “Current Activities and Future Prospects on Unstable Nuclei: Japan-Korea Exchange Program”, 2016 年 3 月 21 日, 東北学院大学(宮城県仙台市)
- 3 H. Nakada, “Can Realistic Interaction be useful for Nuclear Mean-Field Approaches?”, First Gogny Conference, December 8 - 11, 2015, Bruyeres-le-Chatel (France)
- 4 H. Nakada, E. Matsuyama and C. Ozen, “Persistence of Vibrational Collectivity in Nuclear Level Densities”, The 5th International Workshop on Compound-Nuclear Reactions and Related Topics, October 19 - 23, 2015, 東京工業大学(東京都目黒区)
- 5 H. Nakada, “Nuclear mean fields produced from semi-realistic nucleonic interaction”, XXII Nuclear Physics Workshop “Marie & Pierre Curie”, September 22 - 27, 2015, Kazimierz-Dolny (Poland)
- 6 鈴木優香, 中田仁, “N=20,28 原子核に対する半微視的有効相互作用を用いた変形平均場計算”, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 21 - 24 日, 早稲田大学(東京都新宿区)
- 7 中田仁, 杉浦桂介, “半微視的有効相互作用によるマジック・ナンバーの予言”, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 21 - 24 日, 早稲田大学(東京都新宿区)
- 8 H. Nakada, “Magic numbers from light to heavy stable and unstable nuclei predicted with semi-realistic NN interactions”, The International Symposium on Physics of Unstable Nuclei 2014, November 3 - 8, 2014, Ho Chi Minh City (Vietnam)
- 9 H. Nakada, T. Inakura and H. Sawai, “Energy-dependence of skin-mode fraction in E1 excitations of neutron-rich nuclei”, 15th International Symposium on Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics (CGS15), August 25 - 29, 2014, Dresden (Germany)
- 10 H. Nakada and T. Inakura, “Interaction-dependence and independence in low-energy E1 excitations of neutron-rich nuclei”, 4th International Symposium on the Nuclear Symmetry Energy (NuSYM14), July 7 - 9, 2014, Liverpool (U. K.)
- 11 H. Nakada and K. Sugiura, “Magic numbers predicted with semi-realistic NN interaction”, International Conference on Advances in Radioactive Isotope Science (ARIS2014), June 1-6, 2014, 東京大学(東京都文京区)
- 12 H. Nakada, “Mean-Field Approximation and Effective Interactions for Atomic Nuclei”, International School on Neutron Star Matter, March 4 - 7, 2014, 京都大学基礎物理学研究所(京都府京都市)
- [図書](計 0 件)
- [産業財産権]
出願状況(計 0 件)
- 名称:
発明者:
権利者:

種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況（計0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

M3Y-P6 相互作用による Magic number の予
言

[http://physics.s.chiba-u.ac.jp/nuclear/
nakada/chart_magic%28M3Yp6%29.pdf](http://physics.s.chiba-u.ac.jp/nuclear/nakada/chart_magic%28M3Yp6%29.pdf)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中田 仁 (Hitoshi Nakada)
千葉大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：80221448

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし