

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400269

研究課題名(和文)原子核構造の統一的モデルの構築と中性子過剰核への適用

研究課題名(英文)Unified description of nuclear structure and application to neutron-rich nuclei

研究代表者

板垣 直之 (Itagaki, Naoyuki)

京都大学・基礎物理学研究所・准教授

研究者番号：70322659

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：原子核は通常、シェル模型に代表されるように、陽子や中性子が独立に一体ポテンシャル中を運動しているが、 ^4He 原子核(alpha粒子)は特別に結合の強い原子核であり、軽い核では4核子相関(alphaクラスター相関)は重要な役割を果たす。しかし単純なクラスター模型では、原子核系において重要な非中心力の効果を取り入れることができない。この研究では、シェル模型とクラスター模型の競合を分析し、原子核系では非常に強いことが知られるスピン・軌道力と呼ばれる非中心力が、alphaクラスター相関を壊し核子の独立運動を促進する役割を果たすことを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：General description of shell and cluster structures is a dream of nuclear structure physics. Describing cluster states starting with shell models, including modern ab initio ones, is a big challenge of computational nuclear science. On the other hand, if we start with the cluster model, we can easily describe cluster states with much less computational efforts, but the contribution of non-central interactions, very important in nuclear structure, vanishes if we assume simple configuration at some localized point for each alpha cluster. The real systems have both natures of shell and cluster structures and quantum mechanical mixing of these two plays a crucial role in many cases. Thus we established a unified description for the nuclear structure. Our strategy is starting with the cluster model side, contrary to standard approaches starting with the shell model side, and try to extend the model space to include shell correlations especially for the contribution of the spin-orbit interaction.

研究分野：原子核理論

キーワード：原子核構造 中性子過剰核 非中心力 三体力 クラスター構造 シェル構造 原子核反応

1. 研究開始当初の背景

原子核は、有限の個数の陽子や中性子からなる量子多体系である。その構造を記述するために、これまでに様々なモデルが提案されてきた。これは、もともと原子核はさまざまな量子状態が混合した物体であり、原子核を構成する陽子や中性子の数や、あるいは原子核の励起エネルギーを変化させた時に、様々な異なった様相が顕著に顔を出すために、それぞれの特徴を捉えたモデルが個別に必要であったためである。

さまざまな原子核構造に対するモデルの中でも、最も一般的なものはシェル模型と呼ばれるものである(1963年ノーベル物理学賞を受賞)。このモデルの描像を一言で述べると、陽子や中性子は原子核の中心から力を受けて、結果的にある領域に閉じ込められており、それぞれが独立に中心の周りを運動する、というものである。これは、スケールこそ大きく異なるが、原子核の周りを運動する電子が、中心の小さな原子核から電気力(引力)を受け、中心から引っ張られながら周りを運動する現象に似ている。原子核内部の場合には実際にはこれとは異なり、まず第一に力の種類は核力であり、さらに、この力は原子核を構成する陽子や中性子の間に作用する二体間の相互作用であり、中心に何か引力を発生させる源(一体ポテンシャルと呼ぶ)が存在するわけではない。しかし、陽子や中性子の間に作用する核力の効果を積み上げると、陽子や中性子はあたかも自分たちである引力源を中心に形成し、その周りを独立に運動するという見方が良く成り立つ。これらの陽子や中性子は、エネルギー的に下の軌道から順番に詰まって行く。この時、ある特定の軌道まで完全に陽子や中性子が詰まった原子核は特に結合の強い安定したものとなる。このように、ある特定の軌道まですべて陽子や中性子が埋まることにより特に安定となった原子核を構成する陽子の数、あるいは中性子の数を、魔法数と呼ぶ。例えば 2(ヘリウム原子核)、20(カルシウム原子核)、82(鉛原子核)などが陽子の魔法数である。

これとある意味対極的な見方が、クラスター模型である。先ほどのシェル模型で「2」は魔法数である。このため、陽子2つ、かつ中性子2つからなるヘリウム原子核(${}^4\text{He}$)はダブルに魔法数を持つ特に安定な原子核であり、その実態が何であるかが明らかになる以前から粒子と呼ばれてきた。原子核の中には、このような粒子など、特に結合の強いいくつかの部分系(クラスター)に分けて考えられる状態が存在し、これらをクラスター状態と呼ぶ。クラスターと言うのももとは葡萄の房のことである。さらにこのような状態を記述するためのモデルをクラスター模型と呼ぶ。ある類の原子からは粒子が放出されている、という現象は、原子核そのものの発見より以前から知られてきたのである

し、そのことを考えれば、この「原子核は多数の粒子から成っている」とする見方は、一見あたりまえ、自明のように思える。しかし、前述のシェル模型が確立して以降、20世紀中ばには、それぞれの陽子や中性子は原子核中を独立に運動するものと考えられ、いくつかの陽子や中性子が強く固まって部分系を作るというクラスター模型は、原子核構造の標準的描像とは考えられなくなった。20世紀後半から、原子核のクラスター構造に対する関心が再び高まっていく。その原動力として、最も有名な例はいわゆるホイル状態の提案と発見である。この説明のためには、ここで宇宙における元素の合成について少々述べる必要がある。原子核なしには原子、さらにその集合体である元素は成り立たない。さらに原子核の生成は非常にエネルギースケールの大きな反応である。従って、我々の身の周りにおける元素の成り立ちを知る上で最も重要な要素は、個々の原子核が宇宙のどのような環境で作られたかを明らかにすることである。宇宙創成のビッグバンにおいて、水素(陽子数1)、ヘリウム(陽子数2、中性子数2)、リチウム(陽子数3、中性子数3ないし4)などが作られた後、それ以降の元素の大半は星の中で作られたと考えられている。星の内部には陽子(水素原子核)が存在し(中性子は単体では陽子に変化してしまうために原子核内部にしか存在しない)、それらがお互いに結びつき、あるいは既に合成された原子核と結合することで、さらに陽子数や中性子数の増えた多種多様な原子核が合成される。しかし、陽子と中性子の個数を合わせて5や、あるいは8の原子核は天然に安定に存在しない。このため、原子核が陽子をひとつずつ吸収していく方法では元素の合成は非常に初期段階でストップしてしまい、我々が良く知る、地上に存在する多種多様な元素は生まれようがないのである。そのため、元素合成の際にはこれらの壁を乗り越えて軽い原子核から重いものへと反応が進展する必要がある。ホイルは3つの粒子が同時に衝突して炭素原子核(陽子と中性子の数を足して12)を作るプロセスが、星の中での元素合成で決定的に重要であることを指摘した。現実問題として、実際に炭素は大量に存在している。ホイルは、この観測される炭素の存在割合を説明するには、炭素原子核が3つの粒子へと分裂するエネルギーのすぐ上に3つの粒子からなるクラスター構造が存在すると予言し、逆に星の中では、この状態を経由して3つの粒子が炭素へと合成されていると説明した。この状態は、炭素原子核の2番目励起状態としてすぐに発見され、今日ではホイル状態と呼ばれている。ホイル状態がまさにこのエネルギーに存在することが、炭素のみならず、それ以降の重い元素への合成過程を決め、我々の世界の物質構成に決定的な役割を果たしている。このように、原子核のクラスター構造は非常に一般的な原子核

でも容易に出現するのである。

本研究の最も中心的な課題は、ここで述べた原子核の構造を記述する2つの基本的な模型、すなわちシェル模型とクラスター模型を統一する模型の構築である。

2. 研究の目的

原子核の標準的な見方であるシェル模型から出発してクラスターの構造をも記述可能にしようという取り組みは、実は現在、世界各地でさかんに行われている。これには膨大な数値計算が必要となり、例えば現在、日本では京コンピュータなどのスーパーコンピュータを用いる研究プログラムが多数存在するが、その中心的な課題の一つにも選ばれており、精力的な研究が行われている。しかし、シェル模型から出発してホイル状態などのクラスター状態の記述するには、非常に高度で大規模な数値計算が必要であり、いまだに完全には成功していない。申請者の研究の方向性はこれとは逆である。ここでは、まずクラスター模型を用意し、それをシェル模型をも記述できるように拡張するのである。この方がはるかに小さな規模の数値計算でシェル模型とクラスター模型の統合が可能である。

クラスター模型から出発してシェル模型を記述し両者を統合する上で、最も重要な点は、クラスター模型をシェル模型に変換できるかどうかである。それでは、スタートラインとしてクラスター模型を用いた際に、何が不足しており、何を加えればシェル模型へと変換でき、両者を統合できるのか。実は、クラスター模型に取り入れるべき最も重要なファクターは、スピン・軌道力と呼ばれる原子核系において特別に強い核力の一つの成分の効果である。シェル模型によると、それぞれの陽子や中性子が原子核の中心から引力を受けて、その周りを運動しているが、この軌道の決定には、核力のスピン・軌道力成分が非常に重要な働きをしている。実際、シェル模型が原子核の魔法数の出現メカニズムを説明し、1963年にノーベル物理学賞を受賞した際にも、このスピン・軌道力が原子核中で非常に強いという仮定こそが最大のアイデアであり、受賞理由であった。つまり、スピン・軌道力はシェル模型の根幹にかかわる力である。しかし一方で、クラスター模型を用いると、例えばクラスター構造を仮定した際に、このスピン・軌道力の効果が陽子・中性子ごとに打ち消しあい、全体として全く作用しない。つまり、シェル模型とクラスター模型の統一のためには、いかにしてクラスター模型を拡張し、スピン・軌道力の効果を取り込めるように模型を変換するかが最大のポイントとなる。

3. 研究の方法

我々はこの問題を解決するための模型を導入した。前述したように、ミクロな物体は、量子力学に基づいて運動しており、波動関数と呼ばれる確率分布に関連した波によって記述される。申請者は、クラスター構造を表す波動関数の中にパラメータを持ち込み、これを連続的に変化させ、クラスター状態をシェル状態に変換する方法を考案し、クラスター構造とシェル構造の統一的な記述を可能とした。この時波動関数内に導入されたパラメータは、クラスター間の距離を表す R と、

クラスターの崩れを表す α の2つである。 $\alpha = 0$ で完全なクラスター構造が実現していた原子核は、 α の増加と共にシェル構造へと変化していき、この時にシェル構造で重要なスピン・軌道力の効果が取り込まれる。実際の現実世界で実現するのはエネルギーが最も低くなる状態であり、それは、これらのパラメータを変化させ、クラスター模型をシェル模型へと連続的に変化させていった途中に存在している。つまり、現実的な原子核は、そもそも両方の模型の要素を重ね合わせて持った、中間的な状態なのである。我々はこの模型を発展させ、さまざまな原子核のクラスター構造とシェル構造の競合を分析し、原子核構造の統一的な記述を目指した。

4. 研究成果

論文 においては、クラスター状態をシェル状態に変換する模型を一般論として確立し、シェル模型に特徴的な魔法数 2, 8, 20, 28, 50 を、本来逆のクラスター模型から出発して記述した。この手法により、シェル・クラスターの両方の模型を同じフレームで表現し、両者の競合関係を分析可能とした。

論文 においては、クラスター状態とシェル状態の競合が、実際にどのように実験観測量となって現れるかについて考察を行なった。ここでは E_0 遷移確率に注目し、この量がクラスター構造の発展や溶解に非常に依存していることを示した。

論文 においては、計算に用いる有効相互作用として、有限レンジ 3 体力項を持つ Tousaki 力を用いることで、微視的クラスター模型の長年の課題であった、 ^{12}C と ^{16}O のコンシステントな理解も得られることを示した。さらに、もうひとつの非中心力であるテンソル力がクラスター・シェル競合に与える影響について考察した。我々は既に、クラスター模型を拡張し、テンソル力の効果を取り入れることができる模型を提案しているが、従来の模型を上回る、効果的なテンソル力の効果の取り込みを開発した。

論文の 、 、 においては、原子核の標準的な模型である平均場理論を用いて、クラスター構造のようなエキゾチックな構造が記述される可能性について研究した。良く知られているように、通常の意味でのクラスター構造とは、クラスターへ分離される敷

居値エネルギー近傍に現れるガスの状態である。そこにおいては、それぞれのクラスターは比較的自由に運動している。しかし、これとは異なり、逆にいくつかのクラスターが幾何学的な配位を持った結晶構造的な状態を安定化させることも理論的には可能である。たとえば3つ、あるいは4つのクラスターが直線上にならんだりニア・チェーン構造は、1次元系としては安定である。しかし、これが折れ曲がる運動に対しては非常に不安定である。このような系を安定化させる方法として、研究対象を中性子過剰核へと拡張し、中性子を付加することが有効である。この場合、付加された中性子が系の变形軸方向の軌道を占有することで、棒状な变形が助長される。また、良く知られているように、高い角運動量を与えることによって、遠心力ポテンシャルの効果によっても、このような大きな1次元的な变形状態を安定化させることが可能である。この研究では、非相対論的な Skyrme Hartree-Fock, および相対論的な Covariant Density Functional Theory を用いて、炭素同位体や酸素、マグネシウムなどの幾何学的クラスター構造の安定性を示した。

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 7 件)

Effect of $^{12}\text{C}+\alpha$ clustering on E0 transition in ^{16}O , H. Matsuno, N. Itagaki, T. Ichikawa, Y. Yoshida, and Y. Kanada-En'yo, Prog. Theor. Exp. Phys. in press

Consistent description of ^{12}C and ^{16}O using a finite range three-body interaction, N. Itagaki, Phys. Rev. C **94**, 064324 (2016).

General transformation of alpha cluster model wave function to jj-coupling shell model in various 4N nuclei, N. Itagaki, H. Matsuno, and T. Suhara, Prog. Theor. Exp. Phys. **2016**, 093D01 (2016).

Examination of the stability of a rod-shaped structure in ^{24}Mg , Yoritaka Iwata, Takatoshi Ichikawa, Naoyuki Itagaki, Joachim A. Maruhn, and Takaharu Otsuka, Phys. Rev. C **92**, 011303(R) (2015).

Rod-shaped carbon isotopes at extreme spin and isopin, P. W. Zhao, N. Itagaki, and J. Meng, Phys. Rev. Lett. **115**, 022501 (2015).

Searching for 4 alpha linear-chain structure in excited states of ^{16}O with a covariant density functional theory, J. M. Yao, N. Itagaki, and J. Meng, Phys. Rev. C **90** 054307 (2014).

High-spin torus isomers and their precession motions, T. Ichikawa, K. Matsuyanagi, J.A. Maruhn, and N. Itagaki, Phys. Rev. C **90** 034314 (2014).

[学会発表](計 13 件)

1. N. Itagaki, ``Exotic structure in light n-rich nuclei” 韓国物理学会(10月23-26日、光州、招待講演)

2. N. Itagaki, ``Exotic structure and reactions of light nuclei” 国際モレキュール型研究会 Structure and reaction of light exotic nuclei (2015年1月6日-21日、京都大学基礎物理学研究所)

3. 板垣直之、``Rod-shaped nuclei at extreme spin and isopin in C isotopes” 日本物理学会 (2015年3月21-24日早稲田大学)

4. N. Itagaki, ``Exotic structure of light nuclei'', Nuclear structure and dynamics III, 14-19 June 2015, Portoroz, Slovenia (招待講演)

5. N. Itagaki, ``Exotic clustering in neutron-rich nuclei and connection to the shell structure'', ECT* APCTP Joint Workshop: From Rare Isotopes to Neutron Stars, 2015年9月14-18日, ECT*, Toronto, Italy (招待講演)

6. N. Itagaki, ``Exotic clustering in neutron-rich nuclei and connection to the shell structure'', The 14th CNS International Summer School (CNSS15), 2015年8月26日-9月1日, 理研仁科ホール・東大小柴ホール (講師)

7. 板垣直之、``クラスター構造とシェル構造の競合の一般的な取り扱いについて'', 日本物理学会第7回年次大会, 2016年3月19日, 東北学院大学

8. 板垣直之、東崎昭弘、``有限レンジ3体力を用いた軽い原子核の構造計算'', 日本物理学会2016年度秋季大会, 2016年9月23日, 宮崎大学

9. N. Itagaki ``Cluster-shell competition in light nuclei”, Workshop on Nuclear

Cluster Physics (WNCP2016), 2016 年 11 月 16 日 (招待講演), 関東学院大学

10. N. Itagaki ``Exotic states cluster model v.s. DFT'', First Tsukuba-CCS-RIKEN joint workshop on microscopic theories of nuclear structure and dynamics, 2016 年 12 月 14 日(招待講演), 筑波大学

11. N. Itagaki, Cluster, shell, and DFT'', Recent Progresses in Nuclear Structure Physics, 2016 (NSP2016), 2016 年 12 月 5 日, 京都大学基礎物理学研究所

12. 板垣直之、東崎昭弘、"クラスター・シェル競合における有効三体力とテンソル力の効果", 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017 年 3 月 17 日, 大阪大学

13. 板垣直之、"有限レンジ 3 体力を用いた核構造研究", 基研研究会「核力に基づく核構造、核反応物理の展開」, 2017 年 3 月 26-29 日, 京都大学基礎物理学研究所

〔図書〕(計 1 件)

"Linear chain structure in light nuclei", N. Itagaki, T. Ichikawa, Y. Iwata, and P.W. Zhao, a chapter in the ebook "Progress of time-dependent nuclear reaction theory" in the series: "Frontiers in nuclear and particle physics" by Bentham Science Publishers

〔産業財産権〕

出願状況(計 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 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

6 . 研究組織

(1)研究代表者

板垣直之 (ITAGAKI, Naoyuki)
京都大学・基礎物理学研究所・准教授
研究者番号：70322659

(2) 研究分担者

(3)連携研究者

古本猛憲 (FURUMOTO, Takenori)
横浜国立大学・教育学部学校 教育課程
理科教育・准教授
研究者番号：20581086

須原唯広 (SUHARA, Tadahiro)
松江工業高等専門学校・数理科学科・講師
研究者番号：10708407

(4)研究協力者