

# 学 位 審 査 報 告 書

（ふりがな） 氏 名	すはら ただひろ 須原唯広
学位（専攻分野）	博 士 （ 理 学 ）
学 位 記 番 号	理 博 第 号
学位授与の日付	平成 年 月 日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研 究 科 ・ 専 攻	理学研究科 物理学・宇宙物理学 専攻
（学位論文題目）  The coexistence of cluster and shell-model structures in light nuclei studied with antisymmetrized molecular dynamics and generator coordinate method (反対称化分子動力学と生成座標法を用いた軽い核における クラスター構造とシェルモデル構造の共存の研究)	
論 文 調 査 委 員	（主査） 延與佳子 准教授 國廣悌二 教授 川畑貴裕 准教授

京都大学	博士 ( 理 学 )	氏名	須原唯広
論文題目	The coexistence of cluster and shell-model structures in light nuclei studied with antisymmetrized molecular dynamics and generator coordinate method		
(論文内容の要旨)			
<p>軽い原子核においては、いくつかの核子が空間的に強く相関したクラスター構造をもつ状態がしばしば現れる。一つの原子核において、シェルモデル構造とクラスター構造が共存し、多様な励起状態が現れることがあり、その典型例が<math>^{12}\text{C}</math>である。<math>^{12}\text{C}</math>の基底状態は<math>p_{3/2}</math>殻の閉殻構造を主成分としたシェルモデル構造であるのに対し、励起状態においては<math>3\alpha</math>クラスター構造の発達した様々な状態が現れることが知られている。近年、実験・理論の両面で研究が進む中で、陽子と中性子数のアンバランスな不安定原子核においてもクラスター構造が予想されており、不安定原子核の構造を解明するうえで、シェルモデル構造とクラスター構造の共存を調べることは注目された課題の一つである。</p> <p>シェルモデル構造とクラスター構造の共存した系に関して基底状態と励起状態を統一的に記述するためには、その双方の性質を記述できる理論的手法が必要となる。本研究では、この問題を解決できる手法として反対称化分子動力学 (AMD) を応用し、<math>^{10}\text{Be}</math>, <math>^{12}\text{C}</math>, <math>^{14}\text{C}</math>, <math>^{11}\text{B}</math>などの原子核の基底および励起状態の構造研究を行った。AMD法では、一粒子波動関数を空間的に局在したガウス波束で表され、系全体はそのスレーター行列式で記述される。このように記述されたAMD波動関数の模型空間ではガウス波束の空間的な配置によって多様なクラスター構造が記述できる。励起状態を求めるには、AMDモデル空間において拘束条件を課して変分計算を行い、拘束の各点での変分計算で得られた波動関数を重ね合わせる手法 (AMD+GCM) がしばしば用いられる。<math>^{12}\text{C}</math>, <math>^{14}\text{C}</math>, <math>^{11}\text{B}</math>などの原子核では、励起状態に3体的なクラスター構造の発達が予想されており、そのような3体クラスター構造を含む励起状態を系統的に記述するため、本研究では四重極変形度のパラメータ (<math>\beta</math>, <math>\gamma</math>) を拘束条件として採用した。変形度に拘束をかけた変分を行なうことにより変形度の小さい領域ではクラスターの壊れたシェルモデル構造が記述されると同時に、変形度の大きな領域では系の好むクラスター構造が発達した波動関数を得ることができる期待される。3体クラスターの発達しやすい系では、非軸対称の変形パラメータ <math>\gamma</math> に応じて様々な空間配位を記述できると考えられる。</p> <p>このように <math>\beta</math>-<math>\gamma</math> 拘束のAMD法と生成座標法 (GCM) を組み合わせた手法を開発し、まず、<math>^{10}\text{Be}</math> と <math>^{12}\text{C}</math> に適用し、模型の有用性をチェックした。本研究の結果は実験データをよく再現することに成功し、この模型の有用性を確認した。</p> <p>この手法を<math>^{14}\text{C}</math>原子核に適用し、基底・励起状態の構造研究をおこなった。上述のように<math>^{12}\text{C}</math>では<math>3\alpha</math>クラスターの発達した状態が励起状態に現れることが知られており、その類推から、中性子の2つ多い<math>^{14}\text{C}</math>においても、クラスター構造とシェルモデル構造の共存によって様々な構造が現れると期待される。実際、計算で得られた結果から、<math>^{14}\text{C}</math>の基底状態がシェルモデル構造を持つ一方で、励起状態には発達した<math>3\alpha</math>クラスター芯を持つクラスター構造が現れることを明らかにした。励起状態の特徴的なクラスター構造の一つは、正三角形配位を持つ<math>3\alpha</math>クラスターの周りで余剰中性子が分布した構造である。系全体が非軸対称変形をもつために、<math>K=0</math> と <math>K=2</math> の回転帯が形成しうることを指摘した。さらに高い励起状態として、<math>^{10}\text{Be}+\alpha</math> 構造を持つリニアチェーン構造 (<math>3\alpha</math> が一直線に並んだ構造) が出現し、大きな変形状態の回転帯を構成することを発見した。このことは、<math>3\alpha</math> のリニアチェーン構造が安定でない<math>^{12}\text{C}</math>とは対比的な結果である。<math>^{12}\text{C}</math> と <math>^{14}\text{C}</math> を比較した解析により、<math>^{14}\text{C}</math> におけるリニアチェーン構造の安定化メカニズムには、余剰中性子が重要な役割を果たしていることを明らかにした。さらに直線 <math>3\alpha</math> の系において、<math>2\alpha + \alpha</math> の相関が生じる機構および余剰中性子の振舞いを簡単な模型解析で議論した。</p> <p>さらに、<math>^{11}\text{B}</math>原子核の基底および励起状態の構造も研究し、基底状態のシェルモデル構造や励起状態の3体クラスター構造の発達など、シェルモデル構造とクラスター構造の共存の様相が<math>^{12}\text{C}</math>に良く対応していることを指摘した。</p> <p>このように、軽い原子核の多くでクラスター構造とシェルモデル構造の共存が生じることを</p>			

(続紙 2)

示し、その共存によって多彩な構造が生じることを明らかにした。

(論文審査の結果の要旨)

軽い安定原子核には励起状態にクラスター構造が現れることが知られていたが、近年、不安定原子核においてもクラスター構造が出現する可能性が示唆され、注目された課題の一つとなっている。もちろん原子核の低励起状態の多くはシェルモデル構造を持っており、基底および励起状態の構造を系統的に解明するためにはシェルモデル構造とクラスター構造の両方を一つの枠組みで記述することが必要不可欠である。さらに中性子過剰核のクラスター現象の解明には、クラスター芯の形成と壊れ、および、余剰中性子の振舞いを記述することが重要であり、情報量の少ない未知原子核で予言力のある理論研究のために、クラスターの存在を仮定しない理論研究が重要となる。本論文では、AMD法を拡張して、 $\beta$ - $\gamma$ 拘束AMD+GCMという枠組みを構築し、種々のクラスター構造やシェルモデル構造を統一的に記述することに成功した。この手法は何らクラスターの存在を仮定しない枠組みであり、 $\beta$ - $\gamma$ 拘束を課した変分の結果として、拘束パラメータに依存して、シェルモデル構造から2体、3体クラスターの発達した構造が得られる。変分計算の中で、多体系におけるクラスターの形成や壊れが自動的に取り込まれており、その有効性は本論文中で $^{10}\text{Be}$ と $^{12}\text{C}$ などへの適用例として示されている。これらの研究において、基底および励起状態にはシェルモデル構造や2体および3体クラスター構造をもつ多彩な状態が入り混じって現れる様子を示した。これらの結果から開発された理論模型の有用性と発展性が認められる。

$^{14}\text{C}$ の構造研究においては、いくつかの特徴的な構造が出現し、それらから回転帯が形成される可能性を理論的に示唆している。特に $3\alpha$ リニアチェーン状態の存在を示唆したことは独創性の高い成果であり評価できる。 $3\alpha$ リニアチェーンの存在の有無は長年注目されてきた課題である。近年の理論研究の多くが、 $^{12}\text{C}$ における理想的な直線配位の $3\alpha$ リニアチェーン構造の存在に否定的であった。本論文では、余剰中性子のない $3\alpha$ 系で不安定であったリニアチェーン構造が、 $^{14}\text{C}$ においては余剰中性子の存在によって不安定性が解消され、さらに、低励起状態との直交性により直線配位の安定性が保たれることを指摘した。この結果は、未知のクラスター状態に対する理論的予言というだけでなく、原子核の新しい存在様式としても重要な意義をもつ。また、クラスター芯の存在を仮定した先行研究で予言されていた正三角形構造をもつ状態に関して、正三角形よりもむしろ、中性子分布によって非軸対称変形をもつ構造と解釈できることを指摘し、その特徴として $K=0$ に加えて $K=2$ の回転帯が形成される可能性を示唆した。

本研究は、クラスターの存在を仮定しない枠組みに基づいて $^{14}\text{C}$ のクラスター構造の記述に成功しており、 $^{14}\text{C}$ における $3\alpha$ 芯の出現を確かめた初めての研究である。このことは、 $3\alpha$ の形成や余剰中性子の役割を解明する上で重要な意義をもち、さらに、波動関数の重ね合わせによって、多様なクラスター構造をもつ励起状態を詳細に記述できたことは、重要な研究成果である。

$^{10}\text{Be}$ 、 $^{12}\text{C}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、 $^{11}\text{B}$ に関する系統的な構造研究によって、不安定核を含む多くの軽い原子核においてシェルモデル構造とクラスター構造の共存する様相を明らかにし、余剰中性子の存在する系におけるクラスター現象に新しい知見を与えた。

よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成23年1月17日に論文内容とそれに関連した口頭試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公開可能日： 年 月 日以降