

学 位 論 文 題 名

The 4α Orthogonality Condition Model for Low Energy States of ^{16}O (^{16}O の低エネルギー状態に対する 4α 直交条件模型)

学位論文内容の要旨

<序> クラスタモデルは、軽い核の領域で発展してきた。それは、簡単な殻模型の描像では理解が困難な "anomalous state" を分子的構造をもつ状態として、殻構造をもつ基底状態と同時に説明することができる。

^{16}O に対して半微視的な $^{12}\text{C} + \alpha$ クラスタモデル (直交条件模型) を用いると、基底状態が殻構造、下から2番目の 0^+ 状態 (anomalous state) が $^{12}\text{C} + \alpha$ 分子的構造をもつものとして理解できる。この2つの構造が共存する機構を理解するためには、パウリ原理の効果が重要である。直交条件模型は、この効果を有効に取り入れた優れた模型である。この半微視的な $^{12}\text{C} + \alpha$ 模型は、 ^{16}O の状態を ^{12}C と α の相対運動で記述できることを仮定している。

しかし、 ^{16}O の中で 3α が ^{12}C を構成しない可能性もあるため、 ^{16}O を4個の α の相対運動で記述する 4α クラスタモデルは、より基本的な模型であるといえる。今まで、すべての微視的な $^{12}\text{C} + \alpha$ クラスタモデルは、 $^{12}\text{C} + \alpha$ 敷居値エネルギーからの ^{16}O の結合エネルギーが、実験値に較べて大きすぎるという共通の欠点を示している。最近、Descouvemont は3個の α を正三角形に配位させることで、 ^{12}C 内部のクラスタ化の効果を取り入れた微視的な $^{12}\text{C} + \alpha$ クラスタモデルによって、この欠点は改善される傾向があることを示したがそれでも、結合エネルギーの絶対値は、実験に較べて小さすぎる。また、計算は、正三角形配位に制限されている。我々の 4α 直交条件模型では、そのような制限はない。

<本研究の目的> ^{16}O の原子核には、上に述べた殻構造、 $^{12}\text{C} + \alpha$ 構造の他にさらに 4α 的な構造が予想される。我々の興味は、これらの構造変化の機構にある。 4α 直交条件模型は、パウリ原理を有効に取り入れることで、これらの構造変化を力学的

に扱いうる方法である。本研究では、この 4α 直交条件模型を用いて、 2α 系、 3α 系と consistent に 4α 系を扱い、殻構造と $^{12}\text{C} + \alpha$ クラスター構造の共存について議論する。これは、理論的により基本的な立場から半微視的 $^{12}\text{C} + \alpha$ クラスターモデルの正当性を調べることになると同時に、殻構造から $^{12}\text{C} + \alpha$ 構造へ、さらに 4α 的な構造への構造変化の機構を探る第一歩として重要である。

< 方法 > $n\alpha$ 直交条件模型は、パウリ原理で禁止される状態 (Pauli forbidden state: 以下 PFS と略す) に直交する空間 (Pauli allowed state: 以下 PAS と略す) で n 個の α の相対運動を解く方法である。 α の数が増えるにしたがって、この PAS を得ることは複雑になる。そこで、我々は、systematic に PAS を作る方法を確立し、 4α 系の扱いを可能にした。 $(k-1)\alpha$ 系の PAS から $k-1$ 番目の α と k 番目の α の PFS を作り、それと直交するように $k\alpha$ 系の PAS を作る。以上の手続きを繰り返して、 $n\alpha$ 系の PAS を求めることができる。 $\alpha - \alpha$ 間の相互作用は、有効核子間相互作用を基に足し上げて求めた folding potential に、 $\alpha - \alpha$ 間の角運動量依存性 (模型に含まれない反対称化の効果からくる小さな補正) を導入して phase shift を最もよく再現するように求めた。こうして得られた $\alpha - \alpha$ 間相互作用を用いて 3α 系を計算すると、結合エネルギーが実験値に較べ、大きすぎるということが知られている (overbinding の問題)。我々の以前の研究では、 4α 系でこの傾向は顕著になり、この問題を解決するため $\alpha - \alpha$ 散乱で含まれなかった効果 (3 番目の α の存在でパウリ原理によってテンソル力が抑制される効果) を有効 3α 間力として導入した。有効 3α 間力は、 3α 、 4α 系の結合エネルギーを再現するように決めた。これによって、 3α の励起状態がよく再現される。我々はこの有効 3α 間力を 4α 系に適用する。

< 結果と考察 >

エネルギーレベル: 低エネルギー 0^+ 状態に実験とよく対応したエネルギーレベルが得られた。特に下から 2 番目の 0^+ 状態 (0_2^+) が $^{12}\text{C} + \alpha$ の数居値エネルギー近くにあり、これは Descouvemont の微視的な $^{12}\text{C} + \alpha$ クラスターモデル比べ、実験を良く再現し、半微視的な $^{12}\text{C} + \alpha$ 直交条件模型とよく一致している。これは、我々が 3α 系、 4α 系の結合エネルギーを考慮した扱いをしているのに対し、Descouvemont の扱いにはそれが欠けていたためであろう。また、半微視的な $^{12}\text{C} + \alpha$ 直交条件模型では、 ^{12}C の実験値を内部エネルギーとして取り込み、 $^{12}\text{C} - \alpha$ 間の相互作用を ^{16}O の結合

エネルギーに合わせることで、effectiveに考慮していると考えられる。

殻構造： 殻模型の配位の成分でみると、基底状態は閉殻の成分が80%を占めており、殻構造をもっていることが分かる。

$^{12}\text{C} + \alpha$ 構造： $^{12}\text{C} + \alpha$ 構造について調べるため、我々は ^{16}O の各状態について ^{12}C の 0_1^+ 、 1_1^- 、 2_1^+ 、 3_1^+ 、 4_1^+ 状態に対する $^{12}\text{C} + \alpha$ reduced width amplitudes (以下r.w.a.と略す)と $^{12}\text{C} + \alpha$ spectroscopic factors(以下S-factorsと略す)を求めた。 $^{12}\text{C} + \alpha$ r.w.a.は ^{12}C と α がどれだけ離れているかを示す相対波動関数であり、 $^{12}\text{C} + \alpha$ S-factorはその $^{12}\text{C} + \alpha$ の成分がどれだけ存在するかを示す。 $^{12}\text{C} + \alpha$ S-factorは、 0_2^+ 状態が $^{12}\text{C}(0_1^+) + \alpha$ 構造を、また、 0_3^+ 状態が $^{12}\text{C}(2_1^+) + \alpha$ 構造を主に持つことを示す。これは大きさの違いはあるが、半微視的な $^{12}\text{C} + \alpha$ 直交条件模型の結果と良い一致を示す。 $^{12}\text{C}(0_1^+) + \alpha$ r.w.a.は、基底状態が $^{12}\text{C}(0_1^+)$ と α が近づいたcompactな殻構造を持ち、 0_2^+ 状態が $^{12}\text{C}(0_1^+)$ と α が離れた $^{12}\text{C} + \alpha$ 構造を持つことを示す。 $^{12}\text{C}(2_1^+) + \alpha$ r.w.a.は、 0_3^+ 状態が $^{12}\text{C}(2_1^+)$ と α が離れた $^{12}\text{C} + \alpha$ 構造を持つことを示す。これらの4 α 直交条件模型で得られたr.w.a.の特徴は、半微視的な $^{12}\text{C} + \alpha$ 直交条件模型の結果と一致を示す。

<まとめ>

1. $n\alpha$ 系のPASをsystematicに作ることで、4 α 直交条件模型が計算可能となった。
2. 有効3 α 間力によって、3 α 、4 α 系のoverbindingの問題が解決された。
3. 実験に対応するエネルギーレベルが、得られた。
4. 基底状態の殻構造と 0_2^+ 、 0_3^+ 状態の $^{12}\text{C} + \alpha$ 構造の共存が示され、半微視的な $^{12}\text{C} + \alpha$ 直交条件模型の結果と定性的な一致を示した。

<結論> 4 α 直交条件模型を用いて、2 α 系、3 α 系とconsistentに4 α 系を扱い、殻構造と $^{12}\text{C} + \alpha$ クラスター構造の共存を示し、理論的により基本的な立場から $^{12}\text{C} + \alpha$ クラスターモデルの正当性を示した。これは、我々が殻構造から $^{12}\text{C} + \alpha$ 構造へ、さらに4 α 的な構造への構造変化の機構を探る第一歩に成功した意味で重要である。

学 位 論 文 審 査 の 要 旨

主 査	教 授	石 川 健 三
副 査	教 授	坂 下 志 郎
副 査	助 教 授	赤 石 義 紀
副 査	助 教 授	和 田 宏
副 査	講 師	加 藤 幾 芳

^{16}O 核は核子魔法数8に対応する原子核で、その基底状態は閉殻配位を持ち、殻模型に於ける典型的状態である。一方、基底状態と同じスピン・パリティ(0^+)を持つ第一励起状態が6.05 MeV(励起エネルギー)に存在し、その状態は殻模型では説明できない状態として古くから知られており、ミステリアスな状態と呼ばれてきた。この問題に対して、1975年鈴木らは半微視的 $^{12}\text{C}+\alpha$ クラスター模型を用いて、基底状態に於ける般的構造と同時に第一励起状態を $^{12}\text{C}+\alpha$ 分子的構造を持った状態として説明することに成功した。

その後、半微視的 $^{12}\text{C}+\alpha$ クラスター模型の正当性を確かめるために全微視的模型を用いた研究が行われたが、基底状態の結合エネルギーが大きすぎる結果となり、第一励起状態の励起エネルギーは再現出来なかった。この結合エネルギーの問題を解決するため、Descouvemontらは ^{12}C クラスターが三つの α クラスターから構成されることに注目し、 ^{12}C クラスターの3 α 構造を $^{12}\text{C}+\alpha$ 模型に取り入れることによって、基底状態からの第一励起状態のエネルギーが再現されることを示した。このことは、 ^{16}O 核の構造を明らかにする上で四つの α の運動を正しく解くことが必要であることを示唆している。しかしながら、Descouvemontらの模型は ^{12}C クラスターの3 α 構造を一つの幾何学的配位(正三角形)に固定したために、4 α 数居値(threshold energy)からの ^{16}O 核の基底状態の結合エネルギー、及び $^{12}\text{C}-\alpha$ 数居値が正しく再現されていないと言う問題を抱えていた。

申請者は、 ^{16}O 核の基底状態及び第一励起状態を含む低エネルギー状態の構造を調べるためには、結合エネルギーの問題の解決と ^{12}C クラスターの3 α 構造の正しい取

り扱いが不可欠であるという立場から、半微視的 4α クラスタ模型を用いた研究を行った。ここでクラスタにまたがる核子間に働くパウリ原理は、クラスタ間の相対運動がパウリの排他律で禁止される状態に対して直交すべしという条件として、考慮された。これをクラスタ相対運動に対する直交条件模型と言う。

一般に、クラスタの数が増えるとともに微視的模型は複雑になり、取り扱いが困難になる。申請者は半微視的 4α クラスタ模型を実行するために、まず方法上の開発を行った。そして、 ^{16}O 核だけでなく、 ^9Be 、 ^{12}C 核についても同じ α クラスタ模型を用いて計算出来る枠組みを作った。すなわち、 ^9Be 核については、その結合エネルギーと α - α 散乱で観測される位相差を正しく再現するように α - α 相互作用を決めた。そして、そのような α - α 相互作用を用いた場合、 3α 、 4α 模型は同時に ^{12}C 、 ^{16}O の結合エネルギーが再現できないことを示した。この問題を解決するため、申請者は 3α 系になって初めて働く 3α 間力を導入し、それによって ^{12}C と ^{16}O の結合エネルギーを同時に再現出来ることを論じた。ここで導入された現象論的 3α 間力は、短距離力・斥力で、 ^{12}C と ^{16}O の結合エネルギーだけでなく ^{12}C 核の励起準位エネルギーをも良く再現する。申請者はこのような 3α 間力の起源を核子間有効相互作用における大きな状態依存性を示す所のテンソル力にあると考えた。

α - α 散乱の実験データを再現する α - α 間相互作用と ^{12}C 、 ^{16}O の結合エネルギーを再現する現象論的 3α 間力を用いた 4α 模型を解いて得られた ^{16}O の低励起 0^+ 準位については、観測される励起エネルギーを良く再現した。さらにそれらの構造についても波動関数の分析を通じて調べられた結果、鈴木らの $^{12}\text{C}+\alpha$ 模型の特徴を再現し、 ^{16}O 核に於ける殻的構造と $^{12}\text{C}+\alpha$ 分子的構造の共存をよく説明するものであった。

以上の研究から、申請者は ^{16}O 核の基底状態に於ける殻的構造から第一励起状態に於ける $^{12}\text{C}+\alpha$ 分子的構造への構造変化を 4α クラスタの運動を解いて再現し、 $^{12}\text{C}+\alpha$ クラスタ模型の一つの根拠を与えた。このことは、さらに ^{16}O 核の 4α 的構造への構造変化や、より重い原子核に於ける α 模型研究の重要な足掛かりと与えるものである。従って、申請者の研究は、この分野の今後の発展に重要な寄与をなすものと評価される。本論文の主要な内容は、まもなく学術誌に掲載公表される予定である。

以上の研究業績により、審査員一同は、申請者が博士(理学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。