

学 位 論 文 題 名

Three-Alpha Resonance States in ^{12}C (^{12}C における 3α 共鳴状態)

学位論文内容の要旨

有限量子多体系である原子核の世界では、核子がお互いの間の核力によって一体場を形成し、各々の核子はその平均場の中を独立に運動するという描像がよく成り立つ。このようにして核子軌道が成り立ち、シェル構造や魔法数が出現するという見方に基づいた理論的枠組 (平均場模型) として、シェル模型やハートリー・フォック模型などが発展してきた。一方、軽い原子核では、核子相関の効果が非常に重要となるため、平均場という枠組では理解できない現象が数多く観測されている。そのような現象を理解する上で重要となる性質としてクラスター構造がある。クラスター構造とは、 ^4He 原子核である α 粒子や、 ^{16}O 核などの強く束縛された原子核が部分系となり、これらが緩く結合しあった構造である。クラスター構造の描像は、各々のクラスター内の核子間の結合が比較的強く、クラスター間の相関が比較的弱い場合に初めて意味を持つ。簡約して述べると、“内部相関が強く、外部相関が弱い”ということができる。そのため、クラスター構造を持つ状態は、系のエネルギーが構成要素となるクラスターに分解するシキイ値の近傍にあるときに現れ、その多くは多体の共鳴状態となる。これまでの安定核の研究では、共鳴エネルギー領域に多様なクラスター構造が現れると期待されている。たとえば、本研究で対象とする ^{12}C 原子核の場合は、励起状態の構造に3つの α クラスターが正三角形を作る配位や、一直線上に並んだような配位が予言されている。しかしながら、こういった多体の共鳴状態として現れる構造を、現在までの理論分析のほとんどは束縛状態として、もしくは2体の散乱状態として扱うに留まっていた。こういった枠組は、共鳴エネルギーが小さく、幅が狭い状態には有効であるが、幅の広い共鳴状態を扱うには限界があることが知られている。

そこで本研究は、3体系である ^{12}C における 3α 共鳴状態に注目して、これを多体の共鳴状態として扱い、多体の非束縛エネルギー領域におけるスペクトロスコピーを始めて本格的に分析したものである。そこで、採用した方法は以下の2つである：1) 複素座標スケリング法、2) 解析接続法。どちらも、多体の非束縛状態を扱う上で優れた方法であり、共鳴状態のエネルギーのみならず、崩壊幅を同時に求めることが可能である。

得られた結果に基づいて、 ^{12}C 原子核の構造について詳しく見ていきたい。 ^{12}C 原子核は基底状態とそれに伴う回転帯は平均場的な要素が重要であることが指摘される一方、 3α に解離するしきい値近傍の状態は、シェル模型では記述が難しく、 3α クラスター模型が再現に成功している。その典型的な例が 0_2^+ 状態である。 0_2^+ 状態の存在は、最初に天体核物理分野で Hoyle が予言し、それに基づいて実験で観測された。 ^{12}C は赤色巨星中で He 燃焼によって作られるが、Hoyle は観測される宇宙での炭素の組成比を説明するには、 $E_x = 0.4 \text{ MeV}$ の所に、 0^+ 状態が必要であると予言した。1970 年代から盛んに行われた 3α 模型の解析によると、 0_2^+ 構造は3つの α クラスターがゆるく相互作用している状態として解釈されている。さらに、ごく最近では 3α の凝縮状態であるという新しい解釈が提案され、新しいクラスター構造の可能性が指摘されてきている。

これまでの 3α 模型に基づく理論計算では、 0_2^+ 状態の励起状態として 2_2^+ の存在が予言されていた。しかしながら、この状態の候補とされる共鳴状態は実験的にスピンが確定されず、 (0^+) という解釈にとどまっていた。 3α クラスター模型の正当性を示すためには、このエネルギー領域の状態のスピンを決定することは大変重要である。これに対して、2003 年に大阪大学の実験グループが、励起エネルギー $E_x = 9 \sim 11 \text{ MeV}$ の領域に 0^+ と 2^+ 状態の2つの状態が存在していること

を確認した。見つかった 2^+ 状態に関しては、 0_2^+ 状態の励起状態である可能性が極めて高い。さらに、観測された 0^+ 状態は 3α のしきい値より 3 MeV ほど上に存在しているにも関わらず、崩壊幅が約 2.7 MeV と異常に大きい。この状態も 3α クラスター構造をしていると考えられているため、異常に大きな幅を作り出すメカニズムを解明することは ^{12}C のクラスター構造を統一的に理解する上で非常に重要となる。このように、幅の広い共鳴状態に関するクリアな実験データが得られつつあるが、冒頭でも記述したように、幅の広い状態を従来の束縛状態近似の枠組で記述することは極めて難しい。

そこで、まず、 ^{12}C の 3α 共鳴状態の構造を半微視的 (OCM) な 3 体模型に複素座標スケーリング法 (CSM) を適用して調べた (1. 参照)。本模型では、 α クラスター間の相互作用には、有効核子間力と α クラスターの内部波動関数から微視的に計算されたものを用いる。この相互作用は、 2α 系の散乱位相差を広いエネルギー範囲で再現する。また、 ^{12}C の基底状態とそれに伴う回転帯は、 3α ではなく、それらが崩れ、一中心的配位になったシェル模型的要素が重要である。本研究では、この点を 3α 模型空間の枠組の中で補うために、基底回転帯のエネルギー間隔を合わせるような 3 体力を現象論的に取り入れている。次に、実験で確認された幅の広い 0^+ 状態の存在の可能性を調べるため、解析接続法を採用した (2. 参照)。

1 複素座標スケーリング法による解析

観測された 2^+ 状態のエネルギー・幅を非常に良く再現する 2_2^+ 状態が理論的に求まり、この状態が、連続状態: $[^8\text{Be}(0^+) + \alpha]$ との結合が強く、計算を収束させるには高い角運動量の配位が必要であることがわかった。そして、従来の 3α 模型の解析結果とコンシステントな描像、すなわち、 2_2^+ 状態は ^8Be 核が 0^+ 状態を持ちその周りを残りの α 粒子が D 状態で運動していることから、 0_2^+ 状態 (^8Be が 0^+ で、残りの α が S 状態で運動) の励起状態であると考えられる。

一方、 ^{12}C の長年の問題として、3つの α クラスターが正三角形配位をしている 3^- 状態の励起状態 (4^- 、 5^-) が実験で確認されていないことが指摘されていた。我々は、求まった共鳴状態のエネルギーと崩壊幅から、実験でスピンの確定されていない状態の中に、 4^- 状態とみなせるものが存在することを示唆した。この結果は従来の 3α 模型でも示されているが、今回は崩壊幅も評価することによって、正三角形配位が ^{12}C に存在する可能性をさらに後押しする結論を得た。

2 より幅の広い状態を得るために -解析接続の方法-

複素座標スケーリング法 (CSM) を用いた解析により、実験を再現する形で多くの 3α 共鳴状態を得ることができた。しかしながら、 2_2^+ 状態近傍に観測された幅の広い 0^+ 状態 ($E_r \sim 3$ MeV、 $\Gamma \sim 3$ MeV) のスピン及び構造に関しては、言及できなかった。それは、現在の枠組の中での CSM では、幅の広い状態まで精度良く追えなかったためである。そこで、幅の広い 0^+ 状態の存在の可能性を追求するため、解析接続の方法 (ACCC) と CSM を組み合わせた、ACCC+CSM を用いた。ACCC は、束縛状態のエネルギー領域で、ポテンシャルの強さの関数としてエネルギーの 2 乗根を求め、それを非束縛状態の領域へ解析接続することにより共鳴パラメータを特定する方法である。また、ポテンシャルの強さの関数として求めるエネルギーの 2 乗根を共鳴状態まで広げることにより、さらに精度良く状態を特定できるのが、ACCC+CSM である。ただし、元来 ACCC は 2 体系の共鳴パラメータを探す方法として発展してきたため、強さを変えるポテンシャルは 2 体の相互作用が用いられて来た。しかしながら、これを 3 体系に適用した場合、サブシステムである 2 体系 (^8Be 核) の性質を変えてしまうことになる。そこで我々は、強さを変えるポテンシャルとして 3 体力を用い、この問題を回避した。

上記の ACCC+CSM の方法を用いた結果、 3α のしきい値より 1.66 MeV 上に、幅 1.48 MeV を持つ 0^+ 状態を得た。今後、この状態と観測された 0^+ 状態との対応関係や、大きな幅を作り出すメカニズムを調べることは非常に重要な課題である。また、導入した 3 体力の強さに対する 0^+ 状態のエネルギーの依存性を調べたところ、共鳴エネルギー $E_r = 4.6$ MeV に存在する 0^+ 状態の 3 体力に対する依存性が非常に小さいことがわかった。この状態の構造は、いくつかの理論解析から、3つの α クラスターが直鎖状に並ぶ配位が多く含まれている可能性が指摘されている。今

回の3体力に対する振舞いと合わせて、今後詳細な分析が必要であると考える。

本論文では、 ^{12}C における 3α 共鳴状態のスペクトロスコピーの分析を、3体の非束縛状態という観点から行った。この分析は、今後、 $N\alpha$ 原子核(N :整数)の多クラスター構造を持つ状態を、多体の非束縛状態の枠組で解析していくことへの足掛かりとなると考える。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 加 藤 幾 芳
副 査 教 授 藤 本 正 行
副 査 教 授 岡 部 成 玄 (情報基盤センター)
副 査 助教授 大 西 明
副 査 助教授 升 井 洋 志
(北見工業大学情報処理センター)

学 位 論 文 題 名

Three-Alpha Resonance States in ^{12}C

(^{12}C における 3 α 共鳴状態)

有限量子多体系である原子核は、原子核を構成する核子間に働く核力によって一体場を形成し、その平均場の中を各々の核子が独立に運動し、シェル構造や魔法数を出現するという描像に基づいた理論的枠組、すなわち、シェル模型やハートリー・フォック模型などでよく記述されると考えられている。一方、軽い原子核では、平均場という枠組では理解できない現象が数多く観測されており、そのような現象を理解するためにシェル模型やハートリー・フォック模型とは異なるクラスター構造の考えに基づいた研究が行われてきた。クラスター構造とは、 ^4He 原子核である α 粒子や、 ^{16}O 核などの強く束縛された原子核が部分系となり、これらが緩く結合しあった構造である。クラスター構造の描像は、"内部相関が強く、外部相関が弱い"ということによって表現される。従って、クラスター構造を持つ状態は、系のエネルギーが構成要素となるクラスターに分解するシキイ値の近傍にあるときに現れると考えられ、その多くは多体の共鳴状態となると考えられる。この観点から、軽い核における共鳴エネルギー領域に多様なクラスター構造の存在について研究されてきた。例えば、本研究で対象とする ^{12}C 原子核の場合は、励起状態の構造に 3 つの α クラスターが正三角形を作る配位や、一直線上に並んだ配位を持つ状態の存在が予言された。しかし、これまでの多くの理論研究では、3 つの α の共鳴状態として現れる構造を束縛状態として、あるいは 2 体の散乱状態として扱うに留まっている。従って、これまで研究は、共鳴エネルギーが小さく、幅が狭い状態には有効であるが、幅の広い共鳴状態を扱うには限界があると指摘されてきた。

本研究は、 ^{12}C における 3 α 共鳴状態を多体の共鳴状態として扱い、共鳴幅が狭い状態だけでなく、幅の広い共鳴状態まで含めた多体の非束縛エネルギー領域における

スペクトロスコピーを始めて系統的に分析したものである。ここで、共鳴状態を解くために採用した方法は、1)複素座標スケーリング法と2)解析接続法で、どちらも、多体の非束縛状態を扱う上で優れた方法であり、共鳴状態のエネルギーのみならず、崩壊幅を同時に求めることができる。本論文は、この方法を用いて得られた結果について、 ^{12}C 原子核の励起構造を詳しく論じたものである。

Hoyle は観測される宇宙での炭素の組成比を説明するには、共鳴エネルギー $E_r=0.4$ MeV 領域に、 0^+_{21} 状態が必要であると予言し、その後の実験で実際に観測され、理論的にもその 0^+_{21} 構造は3つの α クラスターがゆるく相互作用している状態として解釈されてきた。最近、この 0^+_{21} が 3α の凝縮状態であるという新しい解釈が提案され、新しいクラスター構造の可能性を示すものとして注目されている。一方、2003 年に大阪大学の実験グループが、励起エネルギー $E_x=9 \sim 11$ MeV の領域に 0^+ と 2^+ 状態の2つの状態が存在していることを観測した。観測された 2^+ 状態に関しては、 0^+_{21} 状態の励起状態であると考えられ、これまでの理論予測とも一致するが、同時に観測された 0^+ 状態は 3α のしきい値より 3 MeV ほど上に存在しているにも関わらず、崩壊幅が約 2.7 MeV と異常に大きく、これまでの理論研究には全くない新たな状態であった。

これらの問題に対して本研究では、 3α のシキイ値より上に、従来の 0^+_{21} , 2^+_{21} 状態の存在を3体共鳴状態として再現し、さらに、1.66 MeV のエネルギーに、幅 1.48 MeV を持つ新たな 0^+ 状態の存在を予言した。この新たな幅の広い 0^+ 状態は、大阪大学で観測された 0^+ 状態に対応するものと考えられ、問題解決の1つとなるものと考えられる。

また、 ^{12}C の励起構造に関する長年の問題として、3つの α クラスターが正三角形配位をしている 3^- 状態からの励起状態 (4^- , 5^-) が実験で確認されておらず、 3α 模型の問題点と指摘されていた。これに対し、本研究は、 3α 模型から予言される共鳴状態のエネルギーと崩壊幅から、実験でスピンの確定されていない状態の中に、 4^- 状態とみなせるものが存在することを論じた。この解釈は従来の 3α 模型でも論じられてきたが、本研究で3体共鳴状態としてその崩壊幅も評価することを新たに加えて、正三角形配位が ^{12}C に存在することを結論したものである。

これを要するに、申請者の研究は、 ^{12}C における励起スペクトロスコピーの分析を 3α 共鳴状態の境界条件を正しく取り扱って行ない、従来の理論的研究をはるかに超えた信頼性のある結論を得ることに成功したものであり、原子核の構造の解明に貢献するところ大なるものがある。

よって、著者は北海道大学博士(理学)の学位を授与される資格あるもの、と認めるものである。