

学 位 論 文 題 名

Cluster-Particle Correlations in Light Nuclei

(軽い核におけるクラスター・粒子相関)

学位論文内容の要旨

1 軽い核を統一的に記述するモデルの導入

原子核物理の世界は、物理のさまざまな階層の中でも最も典型的な量子系のひとつであるにもかかわらず、核物理学は、原子核が古典的なある「形」を持った系として理解される面をもつことを教えてきた。すなわち、原子核は回転や振動といった励起モードを持ち、それらに対応したエネルギースペクトルを分析することから原子核の存在形態が議論されてきた。最近では、通常の変形を越え、2:1の比をもつような超変形状態が広い質量領域にわたって観測され、原子核の形の多様性はさらに注目を集めている。

さらに、本研究の対象とする軽い原子核においては、原子核の形を特徴づける存在として、クラスター構造の存在が知られている。 α 粒子や ^{16}O 核など、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うことによってさまざまな原子核の構造を説明する。たとえば、 ^{12}C 原子核のいくつかの励起状態には、3つの α クラスターが緩く束縛した状態が存在し、また ^{16}O 核や ^{20}Ne 核には、それぞれ $^{12}\text{C}+\alpha$ や $^{16}\text{O}+\alpha$ といった、2体クラスターの配位をもった状態が存在する。

しかし一方で、原子核物理にはもうひとつの側面、すなわち核子の量子的な軌道という概念が存在する。有限量子多体系である原子核の世界では、核子が自分達の核力によってある一体場を形成し、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。その運動は一粒子軌道 j によって現され、軌道は、原子核系における強いスピン・軌道相互作用の存在によって、スピン部分と空間部分が結びついた形式で分類される。このような軌道を粒子がパウリ原理を満たしながら占有することによって、原子核にもシェル構造が出現し、このことが原子核の魔法数等を説明することが知られてきた。さらに最近では、特に中性子過剰な原子核の分析において、核子の一粒子軌道の特殊な振舞いが注目を集めている。特に、束縛エネルギーが極端に小さい中性子が異常に大きな半径を持つ中性子ハロー構造など、これまでの原子核物理の常識を覆す現象が報告されている。

本論文では、このような未知の領域である中性子過剰核を含めた軽い核全体の核構造分析を行なうには、原子核物理におけるこれまでの2つの有力な模型、すなわちクラスター模型とシェル模型の両方の特徴を取り入れることが本質的に重要であり、それにより、新しい現象の理解や長年にわたる問題の解決が大幅に進展するとを示す。我々の興味は、軽い核におけるクラスター構造と、その周りを回る核子の一粒子軌道の相関に着目し、新たなクラスター構造の存在メカニズムを探索することである。コアとなるクラスターの原子核の周りを一粒子軌道をもった核子が運動した場合、一般には、核子からもたらされる引力によってコア核のクラスター構造は押し縮められると考えられる。しかし、もし逆に核子がコア核のクラスター構造を発達させる現象が存在すれば、それは、中性子過剰核などの広大な未知の領域において、原子核のクラスター構造が系統的に存在する可能性を示唆することになる。

研究の出発点として、まず2つの α クラスターをコア核とする系を対象にし、Be同位体と ^{12}C 核を分析する。2つの局在した α クラスターのコアの周りを回る核子の一粒子軌道は、分子軌道法を応用することによって導入する。この α - α のクラスター構造が、周りを回る核子の配位の違いによってどのような影響を受け、クラスター構造が発達、あるいは収縮するのかをBe同位体において分析する。さらに、周りを回る核子がもうひとつの α クラスターを生成する場合を ^{12}C 核において議論する。すなわち、2つの α クラスターとその周りの4つの独立な核子からなる模型空間に、さらに 3α クラスターの模型空間を加え、これらの結合を解くことによって異なる内部状態の混在・共存を示す。これにより、元素生成などのこれまでの長年の問題を解決し、さらにクラスター構造の存在の一般性を議論する。

2 Be同位体をめぐる状況と我々の分析

Be 同位体においては、中性子の $1/2^+$ 軌道が $1/2^-$ 軌道と逆転する準位の異常 (^9Be 、 ^{11}Be) や、 $1/2^+$ 軌道のおりなす中性子ハロー構造 (^{11}Be) など、過剰核子の特徴的な一粒子の性質に関心が集まっている。これまで、 ^9Be に対しては微視的 $\alpha+\alpha+n$ クラスタモデル、 ^{11}Be 核には変分的シェル模型が導入され、 $1/2^+$ 軌道の定量的な再現のためにコア核の変形の自由度を扱う重要性が指摘されてきた。一方、Be 同位体の偶偶核の励起状態に対する実験からも、クラスタ的変形状態の存在が示唆されつつある。最近、 ^{10}Be や ^{12}Be の励起状態から、 α 、 ^6He などの He 同位体破砕片が相次いで観測され、これらの核において He 同位体からなるクラスタ構造を反映した回転帯やクラスタ敷居値則の存在が議論されている。我々はこの 2 つの物理現象、すなわちコア核のクラスタ的変形による中性子の一粒子準位の異常と、励起状態におけるクラスタ構造の存在を、ひとつのロジックで結びつけることに成功した。

まず、我々の模型を ^{10}Be に適用し、この核においても ^9Be や ^{11}Be 同様、コア核のクラスタ的変形のために $1/2^+$ 軌道 (分子軌道法における σ 軌道) が $1/2^-$ 軌道よりも低いエネルギーに現れることを示した。さらに、このコア核のクラスタ的変形によって低励起化する軌道に 2 つの中性子が占有した場合、異常に発達したクラスタ状態が現れることを示した。すなわち、 $1/2^+$ 軌道という高いノードをもった状態に 2 つの中性子が占有した場合、このノードから来る運動エネルギーを開放するために、コア核の 2 つの α クラスタは、相互の距離が約 4fm にも成長する。これは、新しいクラスタ構造の発達メカニズムである。 ^{10}Be では、この状態は 0_2^+ 状態からの回転帯を形成する。この回転帯間の電磁遷移確率は発達した $\alpha-\alpha$ 構造を反映するために非常に大きく、例えば $2_3^+ \rightarrow 0_2^+$ の $B(E2)$ は基底状態の $B(E2)$ の 3 倍以上であることを予言した。もしこの電磁遷移が実験的に測定されれば、クラスタ回転帯の大きな確証になり、かつ新しいクラスタ構造の存在理由を示すことになる。

このような、コア核のクラスタ構造の発達による $1/2^+$ 軌道の低励起状態への貢献は、 ^9Be 、 ^{10}Be 、 ^{11}Be のみならず、 ^{12}Be 核においても重要であることを同じ枠組によって示した。 ^{12}Be 核は本来シェル模型の中性子数 $N=8$ の閉殻に対応するが、 ^{12}B への β 崩壊が遅いことから、基底状態により高いシェルの成分が混じることが示唆されてきた。我々のモデルでは ^{12}Be の基底状態には $1/2^+$ 軌道に 2 つ中性子が入った配位が強く結合する。我々は、このことが ^{12}B への β 崩壊を説明することを示し、かつ基底状態からクラスタ状態の回転帯が形成されることを予言した。

コア核のクラスタ的変形による過剰な中性子の一粒子準位の異常と、クラスタ構造による回転帯の存在は密接に結び付いており、このことが Be 同位体をめぐるさまざまな興味深い現象を系統的に理解する上で非常に本質的な物理であることが理解された。他の元素においても同様のメカニズムを検証する必要がある。

3 ^{12}C 核の諸問題の解決と異なった状態の混合

次に ^{12}C 原子核において、クラスタ的状態、およびシェル模型的な状態がある場合に混在し、またある場合に分離することを示す。双方の模型を複合する必然性を生み出した発端は、これまで長きにわたり微視的なクラスタ理論における大きな問題であった、 ^{12}C 核と ^{16}O 核の結合エネルギーが共通の核子間有効相互作用を用いて同時には再現できない事実である。

本研究では、まずクラスタモデルの立場に立ち、 ^{16}O に対して従来の $^{12}\text{C}+\alpha$ クラスタモデルの模型空間を拡張し、 4α クラスタの自由度をフルに生かして種々の核子間有効相互作用を比較検討した。その結果、たとえ密度依存力 (有限レンジを含む) を用いても問題の根本的な解決には至らない事を示し、問題の本質が ^{16}O の過大結合よりも、むしろ ^{12}C の過小結合 (約 10MeV) にあることを指摘した。問題の抜本的な解決のために、 α クラスタモデルでは扱うことのできない、 α クラスタの崩れによって作用するスピン・軌道力の効果を採り入れる重要性を示唆した。

すなわち、クラスタの模型空間である 3α に加え、シェル模型の特徴であるスピン・軌道力を繰り込むために、2 つの α クラスタとその周りを 4 つの独立な核子が運動する模型空間を導入し、これらの間の結合を評価した。これにより、 ^{12}C のそれぞれの状態における 2 つの異なった内部状態、すなわち 3α クラスタ的な状態と、クラスタ構造の崩れたシェルの状態の混在の度合いが明らかになった。 ^{12}C の基底状態には $2\alpha+4N$ の成分が強く混合し、スピン・軌道力の大きな貢献によって上記の過小結合問題の半分以上が解決する。これにより、 3α クラスタモデルにおいては半分程度に見積もられていた基底状態からの回転帯のレベル間隔も大幅に改善され、実験値に対応した回転の慣性率を与える。一方、 0_2^+ や 3^- といったこれまでクラスタモデルが記述に成功した状態は 3α の成分が支配的であり、池田図に代表されるクラスタの敷居値則が、今の広い模型空間の中でもやはり成り立つことを示した。このことは、クラスタ構造がクラスタの崩れを導入した空間の中でも存在する一般性を示したことになる。

また、従来からの大きな問題として ^{12}C の元素生成がある。この反応は、もっとも基本的かつ重要な軽い元素の合成であるにもかかわらず、どの理論も実験値を満足できなかった。すなわち、3 つの α 粒子が結合し、クラスタ的共鳴状態を作った場合の寿命 (^{12}C の 0_2^+ 状態の α 崩壊幅) と、ここからシェルの基底状態への電磁遷移確率 ($0_2^+ \rightarrow 2_1^+$, $2_1^+ \rightarrow 0_1^+$ の $B(E2)$) である。今の模型によってこれらは定量的に再現され、今の模型が ^{12}C の 3 つの α 粒子からの元素生成を初めてコンシステントに記述できる模型であることを示した。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	石 川 健 三
副 査	教 授	大 川 房 義
副 査	助教授	加 藤 幾 芳
副 査	講 師	大 西 明
副 査	助教授	岡 部 成 玄

学 位 論 文 題 名

Cluster-Particle Correlations in Light Nuclei

(軽い核におけるクラスター・粒子相関)

原子核は、核子からなる量子力学的な多体系であり、それぞれの励起状態は決まった角運動量やパリティをもっている。ところが、多くの低励起状態が古典的な「形」をもつ原子核の回転や振動といった集団的な運動であることが、これまでの研究から明らかになってきた。最近では、通常の変形の程度を越える 2:1 の比をもつような超変形回転帯が広い質量領域にわたって観測され、原子核の形の多様性に対する関心が高まってきている。

軽い原子核では、 α 粒子 (${}^4_2\text{He}$ 原子核) や酸素原子核 ${}^{16}_8\text{O}$ の際だった安定性により、これらの強く束縛した部分系(クラスター)がゆるやかに結合した状態に基づいて様々な原子核の構造を説明する「クラスター模型」が、上述のような「形」を記述する模型として成功してきた。例えば、 ${}^{12}_6\text{C}$ 原子核の多くの低励起状態は、3つの α クラスターがゆるく束縛した状態として記述でき、また ${}^{20}_{10}\text{Ne}$ 核には、 ${}^{16}_8\text{O} + \alpha$ という 2 体クラスターの配位をもった状態が存在する。しかし、一方で、核子を平均場中を運動する独立粒子として記述する平均場描像が原子核の広範な領域における記述に成功しており、この描像に立脚して、球形の平均場中を運動する核子の間に働く残留相互作用を取り入れた「殻(シェル)模型」は原子核の標準模型として幅広く用いられて来た。

本学位論文で、申請者は上記のふたつの描像の長所を融合した模型 — クラスター・粒子相関模型 — を提案し、軽い原子核の構造の統一的記述を目指している。具体的には、(i) クラスター構造をもつコアのもとで最適化された核子の一粒子波動関数を求め、(ii) その組み合わせから多体波動関数を構成し、(iii) 純粋なクラスター波動関数との結合を考える、という手法を用いることにより、核子間の 2 体力からなる多体系のハミルトニアンから出発して、精度の良い多体波動関数を有効に与える方法を開発した。

本学位論文ではこうした手法に基づき、次のような成果が示されている。第一に、中性子過剰な Be アイソトープにおいて、バレンス核子の一粒子エネルギーの減少によってクラスター構造が発達するという新たな機構を提案している。この一粒子軌道は sd 混成軌道であり、通常の殻模型描像ではエネルギー的に非常に高いが、クラスター変形方向に波動関数が広がることにより運動エネルギーが減少し、低エネルギー領域に現われ得るのである。近年の研究で Be アイソトープを含むいくつかの中性子過剰核では、 s 軌道が異常に低いエネルギーに現われることが知られており、この研究でその発現機構が示されたといえる。また、これは、クラスター構造が発達する場合には通常の変形の場合と異なり、変形によるエネルギー損失が少ないため、一粒子エネルギーの増減が低エネルギー状態に現われる多体波動関数を支配するという新たな描像の提案ともなっている。第二に、 ${}^{12}_6\text{C}$ 原子核に関して長い間未解決であった α, β, γ の 3 つの崩壊様式の定量的かつ統一的理解を可能にし

た。これまでは、 α 崩壊がクラスター模型で、 β 崩壊が殻模型で別々に記述されており、 γ 崩壊についてはどちらの模型でも記述が不可能であったが、励起状態のそれぞれにおいて、クラスター的な波動関数と殻模型的波動関数との共存を取り入れることにより初めて統一的記述が可能になったのである。

これを要するに、著者は、中性子過剰核をふくむいくつかの軽い原子核において、これまで提案されてきた二つの描像 — 「クラスター描像」と「殻描像」 — を統一した模型を提案することにより、中性子過剰 Be アイソトープについての新しい描像を得、また長い間解けなかった ${}^{12}_6\text{C}_6$ 原子核の構造の問題を解決したものであり、原子核物理学の研究に対して貢献するところ大なるものである。

よって審査員一同は、著者が北海道大学博士(理学)の学位を授与される資格あるものと認める。