

学 位 論 文 題 名

Analyses of Nuclei near the Drip-Line by Using the
Complex Scaling Method

(複素座標スケーリング法を用いたドリップ線近傍の原子核の分析)

学位論文内容の要旨

近年、短寿命核ビームを用いた実験技術の進展によって中性子ドリップ線近傍の原子核の興味深い発見が行われてきている。その中でも、中性子の放出に対して不安定になる中性子ドリップ線の近傍核 ^6He 、 ^{11}Li 、 ^{11}Be 等が異常に大きな平均2乗半径を持っているということが実験的に明らかになった。この大きな平均2乗半径は、コア核+過剰中性子模型によっていわゆる「ハロー構造」で説明される。このハロー構造というのは、中性子ドリップ線の近傍で中性子の結合エネルギーが極端に小さくなってきたとき(安定核の1/10程度)にあらわれる中性子過剰核に特有の構造で安定なコア核のまわりに過剰な中性子が雲のように広がったものである。しかしながら、コア核+過剰中性子模型では中性子の結合エネルギーが不足するという問題が依然として残っている。さらに、中性子過剰核にはいくつかの励起モードが期待されるが、その一つとして期待されるコアに対して中性子の雲が往復振動するという「ソフトE1励起モード」が共鳴状態としては求まっていないという問題も残っている。最近の興味深いトピックスとしては、理化学研究所における中性子数の比が最大の原子核 ^{10}He の発見とハロー構造を持つと期待される ^{11}Be のミラー核 ^{11}N の発見を挙げることが出来る。これら二つの原子核(^{10}He 、 ^{11}N)は、核子の放出に対して不安定になるドリップ線の外側の原子核であり、基底状態でさえ非常に短寿命な「共鳴原子核」である(10^{-20} 秒程度)。しかしながら、多体的な構造を持つ共鳴原子核を系統的かつ定量性をもって分析する枠組みはこれまでは存在していなかった。

本研究では、特徴的な枠組みとして「コア核+過剰中性子模型」に「複素座標スケーリング法」を組み合わせたものを採用する。その定式化は本論文の2章と3章で与えられているが、「コア核+過剰中性子模型」は平均2乗半径等の実験データを最もよく説明するモデルで新潟大の鈴木氏と池田氏によって提案されたモデルである。また、「複素座標スケーリング法」は多体系の共鳴状態を実際的に解く方法でいわゆる「ABC定理」に基づいている。本研究で議論する主な物理的な内容は、まずハロー構造を持つと期待される最も基本的な中性子過剰核 ^6He を第4章で取り上げ、1)基底状態のハロー構造と結合エネルギーの詳細な分析を行うこと2)観測されている励起状態 2^+ の説明を行うこと3)励起状態で期待されているソフトE1共鳴の分析を行うこと4)実験で見つかっていない励起状態の理論的予言を行うことである。次に中性子が最も過剰な ^{10}He を第5章で取り上げ、5)その基底状態の寿命について理論的研究を行うこと6)励起状態としてどのようなものが可能であるか議論することである。

更に、陽子過剰核の典型例として ^{11}Be と ^{10}Li のミラー核 ^{11}N と ^{10}N を第6章で取り上げ、7) s波状態の寿命についての議論を行うこと 8) 実験で見つかっていない ^{10}N の共鳴エネルギーと寿命の理論的予言を行うことである。

得られた結果と議論について以下で簡単に述べる。1) の ^6He の基底状態のハロー構造と結合エネルギーについては、 $^4\text{He}-n$ の高い部分波まで実験のphase shiftを再現するような $^4\text{He}-n$ 間相互作用をつくり $n-n$ 間のペアリング相関を取り入れるような広い模型空間で $^4\text{He}+n+n$ の3体計算を行った所、結合エネルギーの不足の問題をほぼ解決し、実験の平均2乗半径を再現するようなハロー構造も持っていることを明らかにした。2) の観測されている励起状態 2^+ については、複素座標スケールリング法の適用を行い、実験データを矛盾なく説明できることを示し、枠組みの有効性が確認された。3) 励起状態で期待されているソフトE1共鳴については、2の課題で成功を収めた複素座標スケールリング法を同様に適用し、 ^6He 核の低エネルギー領域に安定な3体的状態としては存在しないことを示した。4) 実験で見つかっていない ^6He の励起状態の理論的予言については、p殻に過剰中性子があるような状態として $2^+_{\frac{1}{2}}$ 、 1^+ 、 $0^+_{\frac{1}{2}}$ の非常に寿命の短い状態が存在可能であることを初めて示した。最近、これらの状態はJaneckeのグループによって観測され、「コア核+過剰中性子模型」と「複素座標スケールリング法」を組み合わせたこの枠組みの有効性が再確認された。5) ^{10}He の基底状態の寿命については、 ^9He の基底状態の共鳴エネルギー($E_r=1.16\text{ MeV}$)を再現するような $^8\text{He}-n$ ポテンシャルを用いて $^8\text{He}+n+n$ の3体計算を行った。まずは、シェル模型の描像からみてドミナントな二個の過剰中性子が $p_{1/2}$ 殻にあるような $[(p_{1/2})(p_{1/2})]_{0+}$ チャンネルをいれた模型空間で計算を行った。その結果は、共鳴エネルギー $E_r=2.07\text{ MeV}$ で崩壊巾 $\Gamma=1.85\text{ MeV}$ である。この結果は、 ^{10}He の基底状態の実験データの共鳴エネルギー $E_r=1.2\pm 0.3\text{ MeV}$ と崩壊巾 $\Gamma\leq 1.2\pm\text{ MeV}$ に対応しているが、若干エネルギーが高くて崩壊巾が大きい。そこでs, d殻を含むようなより広い模型空間で計算を行った。得られた値は、共鳴エネルギーが $E_r=1.8\text{ MeV}$ で崩壊巾が $\Gamma=1.4\text{ MeV}$ と実験値により近いものであり(理研の最新データ、 $E_r=1.7\text{ MeV}$)、 ^{10}He のようなドリップ線の外側にある原子核の分析が可能な初めての枠組みであることを示した。また、6) の ^{10}He の $^8\text{He}+n+n$ 三体的な励起状態についても計算を行い、例えば、 3^- 状態に対しては $E_r=8.5\text{ MeV}$ で崩壊巾が $\Gamma=11\text{ MeV}$ と言う結果を得た。しかしながら、この状態は基底状態よりも更に短寿命な状態であり実験的に観測できるかどうかという問題が依然として残っている。更に、本研究では陽子過剰核等でこの枠組みが適用能力がどの程度あるかどうか調べるために陽子過剰核の典型例として ^{11}Be と ^{10}Li のミラー核 ^{11}N と ^{10}N を調べた。7) の ^{11}N のs波状態の寿命については、ハロー構造をもつ ^{11}Be のs波基底状態を再現するような相互作用を用い、ミラー核の ^{11}N の共鳴エネルギーと寿命の分析を行った。その状態は、いわゆるThomas-Ehrman効果が ^{11}Be でハロー構造を持つ影響で増大されることを明らかにした。この結果については、最近の実験で確認された。8) 実験で見つかっていない ^{10}N の共鳴エネルギーと寿命の理論的予言については、 ^{11}Li の3体計算に用いられている $^9\text{Li}-n$ 相互作用の正当性を ^{10}N で確かめる可能性の示唆をした。この $^9\text{Li}-n$ 相互作用は ^{11}Li の束縛機構を理解する上で必要不可欠であるが、依然として任意性が残っているものであり、より定量的な理解が要求されている。

以上のように、本研究ではドリップ線近傍の原子核の中でいくつかの特徴的な原子核を取り上げその結合機構を調べた。特に共鳴状態にある原子核に対しては複素座標スケールリング法の適用を行い、従来不可能であった多体共鳴状態の分析を可能にしかつ理論的な予言を行った。その幾つかの予言は実験的に既に確かめられつつあり、更に新しい実験計画も予

定されている。この枠組みは、本論文で議論した原子核に対してのみ適用できるだけではなく、多くのドリップ線近傍の原子核で適用できる。例えば、実験的な探索が予定されている超重々水素 ${}^7\text{H}$ の理論的予言が出来る現状では唯一の枠組みとして期待されている。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	石 川 健 三
副 査	教 授	和 田 宏
副 査	教 授	藤 本 正 行
副 査	助教授	加 藤 幾 芳
副 査	講 師	大 西 明

学 位 論 文 題 名

Analyses of Nuclei near the Drip-Line by Using the Complex Scaling Method

(複素座標スケールリング法を用いたドリップ線近傍の原子核の分析)

最近の原子核研究において、不安定核の構造と反応についての研究が著しく進展し、新たな分野として多くの注目を集めている。これは、原子核反応で作られる寿命の短い不安定な原子核を2次ビームとして用いる実験観測が可能となり、短寿命不安定核の性質が調べられるようになったことによる。1985年、Tanihata等は軽い不安定核の核半径の測定を行ない、その中で ^{11}Li 核が異常に大きな核半径を持つことを発見した。さらに、Kobayashi等は、 ^{11}Li と重い核との衝突実験を行ない、 ^{11}Li からの破砕片が持つ運動量分布を測定し、 ^{11}Li 核が密度の濃い部分と薄い部分を持つことを明らかにした。これらの実験事実は、原子核の最も基本的な性質である密度の飽和性について、ドリップ線近傍の不安定核が安定核と際立って異なる性質を持つことを示しており、核物質に対するこれまでに理解を大きく変えることを示唆するものである。とりわけ、 ^{11}Li の原子核において典型的に見られる密度の二重構造、あるいは「中性子ハロー構造」と呼ばれる特異な構造の出現する原因とその機構を明らかにすることが、基本的な問題として取り上げられ、研究されてきている。

本論文は、中性子ドリップ線近傍核の「中性子ハロー構造」を理論的に解明するために、He-, Li-アイソトープを中心に広い領域にわたる不安定核の構造を研究したものである。その基本的な考え方は、「中性子ハロー構造」を密度が相対的に濃い安定核のコア核と、その周りをゆるく結合して密度が薄いハローを構成する中性子からなるとする考えである。この考え方に基づいて、 ^{11}Li 核を「 $^9\text{Li}+n+n$ 」の三体クラスター模型で記述する研究が多数行なわれてきた。しかしながら、いままで、この三体クラスター模型は、 ^{11}Li の「ハロー構造」の説明で最も重要な量である結合エネルギーを説明することに成功していない。そこで、著者は、「コア核+ $n+n$ 」三体模型の有効性を明らかにするため、 ^6He 核を取り上げ、 $^4\text{He}+n+n$ 模型を用いて詳細な分析を行なった。その結果、核子間相互作用および $^4\text{He}-n$ 相互作用に関する知識が持つ不定性の範囲で、観測される ^6He の結合エネルギーを説明することに成功した。その成果に基づき、ドリップ線の外側のHe-アイソトープである ^{10}He 核に $^8\text{He}+n+n$ 模型を適用し、世界で最初に ^{10}He 核の結合エネルギーと寿命に関する観測データを説明することに成功した。この ^{10}He の研究が、本学位論文の中心課題となっている。さらに、著者は中性子過剰核とその鏡映核である陽子過剰核における共鳴状態のエネルギーと崩壊巾の関連を論じ、 ^{11}Li 核の「ハロー構造」を理解する上で重要な問題となっている $^9\text{Li}-n$ 間相互作用と ^{10}Li 核の sd -軌道の観測可能性を鏡映核である $^9\text{C}-p$ 間相互作用で記述される ^{10}N 核について議論した。すなわち、本学位論文として提出された研究内容は、1) ^6He 核の研究、2) ^{10}He 核の研究、3) 鏡映核($^{11}\text{Be}-^{11}\text{N}$), ($^{10}\text{Li}-^{10}\text{N}$)の研究、の3つの課題からなる。それらの成果は投稿中のものを含め7編の学術論文に発表、あるいはその予定となっている。

本研究において、粒子放出に対して不安定な原子核の多体共鳴状態を理論的に解き上げるために、複素座標スケールリング法が広く用いられた。この複素座標スケールリング法は、共鳴エネルギーと共鳴幅を求める直接法と呼ばれる計算法で、原子分子の分野で広く用いられて来た方法である。しかしながら、原子核分野では特異性の強い相互作用のためあまり用いられてこなかった。不安定核の研究、とりわけ「コア核+n+n」モデルによる三体共鳴状態の研究に本格的に用いたのは著者が Cs6t6 と共に世界で初めてであった。その結果、著者は⁶He 核の三体励起共鳴状態の理論的予言を行ない、その予言された状態が最近の Janecke 等の実験で発見された。また、現在まで発見されている原子核の中で最も中性子数と陽子数の比 (8:2) が大きな核である¹⁰He の三体共鳴状態の性質も複素座標スケールリング法を用いることによって解明できた。

これを要するに、著者の研究はドリップ線近傍の原子核を「コア核+n+n」三体モデルとして記述することの有効性とその限界を明らかにし、複素座標スケールリング法を不安定核の研究に先駆的に適用してその有効性を広く示したものであり、新しい研究分野の発展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があるものと認める。