

学 位 論 文 題 名

Analysis of Coulomb breakup reactions of
 ^{11}Be in a $^{10}\text{Be} + n$ coupled-channel model $(^{10}\text{Be} + n$ 模型を用いた ^{11}Be 核のクローン分解反応の解析)

学位論文内容の要旨

近年、RI ビームを用いた実験技術が発展し、ドリップライン近傍の原子核の知見を得ることが可能となった。その結果、ドリップライン近傍の原子核においては、これまで原子核において成り立っていると考えられていた密度の飽和性を破る原子核が存在すること、また、原子核における魔法数が消滅もしくは変化するなどが知られてきた。近年の原子核物理の一つの目的はドリップライン近傍の原子核を含めた核図表のより広い領域にわたり原子核を理解することである。

ドリップライン近傍の原子核の中で、 ^6He , ^{11}Li , ^{11}Be などの中性子過剰核は、中性子ハロー核と呼ばれる原子核であり、弱く束縛された中性子が空間的に非常に広がって存在する構造を持つ。これらの中性子ハロー核を鉛核標的に入射して行われるクーロン分解反応では低励起エネルギー領域にピークを持つことが知られているが、このようなピークは通常の原子核では見られなかったものであり、現在精力的にその理解のための研究が行われている。

中性子ハロー核である ^{11}Be 核は ^{10}Be 核に中性子が緩く束縛した構造を基底状態に持つと理解されており、これまでの研究から ^{10}Be 核の励起状態が強く結合し、混合していることが知られている。励起状態の混合の割合を正確に知ることは、 ^{11}Be 核において古くから問題とされている基底状態と第一励起状態のパリティが通常の殻模型から予測されるパリティの順番と異なっているというパリティ逆転問題を理解する上で重要である。

この基底状態の理解を目的に近年、理化学研究所や GSI などで ^{11}Be 核のクーロン分解反応の実験観測が行われた。 ^{11}Be 核のクーロン分解反応での低エネルギー領域に観測されるピークは基底状態から連続状態への遷移と理解され、このピークから基底状態の情報が得られると考えられている。

このように ^{11}Be 核の構造とクーロン分解反応は密接に関わりあっており、 ^{11}Be 核の構造を忠実に再現するような模型により分解反応を理解することが重要となっている。

中性子ハロー核を含むドリップライン近傍の原子核の特徴は基底状態がすでに粒子を放出するしきい値近傍に存在することであり、その励起状態のほとんどが共鳴状態として現れる点である。そのため、これらの原子核を扱うには非束縛状態を取り扱うことが必要不可欠となる。通常、散乱問題を解くためには遠方の散乱境界条件を課すことが必要であり、束縛状態とは異なる解き方が必要となるが、複素座標スケール法は共鳴状態のパラメータ (位置と幅) を通常の束縛状態を扱うのと同様に対角化により直接的に求めることができるため、ドリップライン近傍の原子核のような弱結合系での共鳴状態を扱うのに適した方法であることが示されてきた。

また、近年における複素座標スケール法の方法論研究により、得られる波動関数を用いた共鳴状態に関する物理量、さらに連続状態に関して調べられ、遷移強度関数のような物理量を計算することが可能となった。この新しい枠組みでは、拡張された完全系の適用により非束縛状態への遷移における共鳴状態、連続状態それぞれの寄与を調べることができると、また、連続状態の離散化が非常に良い近似になることが調べられており、このことが、 ^6He , ^{11}Li の 3 体系の分解反応の計算を可能にしている。

このようにドリップライン近傍の原子核を取り扱う上で複素座標スケールリング法が非常に有用であることが示されてきたが、この方法を用いて計算される遷移強度関数や複素座標スケールリング法による拡張された完全系の証明は1チャンネル系での2体問題についてのみ行われており、さらに複雑な系においての証明が必要である。また、最近チャンネル結合系においての解析的な証明が行われたが、実際の系での証明が必要とされている。

本研究ではチャンネル結合系であり典型的なハロー核である ^{11}Be 核に複素座標スケールリング法を適用し、チャンネル結合系での拡張された完全系の証明と、 ^{11}Be 核のクーロン分解反応の理解を行う。

本研究では、まず ^{11}Be 核の構造を $^{10}\text{Be} + n$ チャンネル結合モデルで取り扱い、その低励起エネルギー領域の理解を行った。 ^{10}Be 核をSU(3)殻モデルで表し、 ^{10}Be 核と外郭中性子間のポテンシャルは核子-核子間のポテンシャルから微視的に導いたものを用いる。このモデルを用いた解析では、正パリティ状態の基底状態および共鳴状態は、 ^{10}Be 核の変形を大きくするようなパラメータを用いることで再現できること、負パリティ状態については、 ^{10}Be 核の変形を小さくするようなパラメータを用いることで再現が可能であることが示された。

この研究での重要な発見は、複素座標スケールリング法により求められた共鳴状態のamplitudeが計算に用いられる基底やスケールリングパラメータによらない値として決定できることであり、amplitudeを用いて各共鳴状態の成分を見ることが可能となった。このamplitudeは3体系や3体を越えた多体系の共鳴状態の理解において重要な働きをすることが期待される。

本研究ではこのモデルで得られた共鳴状態、連続状態の波動関数を用いてクーロン分解反応の理解を行った。チャンネル結合系での複素座標スケールリング法を用いたクーロン分解反応の計算については、取り扱う枠組の証明はこれまで行われていない。そのためまず、通常の散乱問題を解いて得られる非束縛状態への遷移強度確率を求め、それを複素座標スケールリング法の枠組で計算されたものと比較を行った。この異なる2つの計算結果は一致することが示され、この枠組をチャンネル結合系でも利用できることと、拡張された完全系がチャンネル結合系においても成立することが証明がされた。

この複素座標スケールリング法の枠組を用いたクーロン分解反応の解析により共鳴状態の寄与と連続状態の寄与を分離して議論が行われ、 ^{11}Be 核の低励起エネルギー領域の共鳴状態の寄与と連続状態からの寄与が理解できた。この計算結果は最近理化学研究所、GSIにおいて行われた ^{11}Be 核の分解反応の結果と比較され、一致することが確認された。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 加 藤 幾 芳
副 査 教 授 河 本 昇
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

Analysis of Coulomb breakup reactions of ^{11}Be in a $^{10}\text{Be} + n$ coupled-channel model

($^{10}\text{Be} + n$ 模型を用いた ^{11}Be 核のクローン分解反応の解析)

近年、RI ビームを用いた実験技術の発展によりドリップライン近傍の原子核の知見が増大してきた。その結果、ドリップライン近傍の原子核において、これまで原子核において成り立っていると考えられていた密度の飽和性が破られていること、また、魔法数が消滅もしくは変化することが明らかになってきた。そこで、ドリップライン近傍の原子核を含めた核図表の広い領域にわたる原子核の基本法則を理解することが近年の原子核物理学研究における重要な課題の一つとなった。

ドリップライン近傍の原子核の中で、 ^6He , ^{11}Li , ^{11}Be などの中性子過剰核は、中性子ハロー核と呼ばれ、弱く束縛された中性子が空間的に異常に広がって存在する構造を持っていると考えられている。これらの中性子ハロー核を鉛核など電荷の大きな原子核に入射して行われるクーロン分解反応は大きな反応断面積を持ち、低励起エネルギー領域に通常の原子核では観測されない大きなピークを持つことが観測され、中性子ハロー核の核構造と関係して、現在、精力的に研究されている。

^{11}Be 核は典型的な一中性子ハロー核であり、これまでに多くの研究が行われてきた。それらの研究から、この原子核のクーロン分解反応において観測されるピークが基底状態から連続状態への遷移に依って生じることがわかってきた。そして、このピークの解析から基底状態の情報が得られると期待されている。 ^{11}Be 核の基底状態は、 ^{10}Be 核にひとつの中性子が緩く束縛した構造が主要で、 ^{10}Be 核の回転励起状態と中性子の運動が結合しているとする描像が広く受け入れられている。そこで、 ^{11}Be 核において古くから問題になってきた基底状態と第一励起状態のパリティが通常の殻模型から予測されるパリティの順番と異なっているというパリティ逆転問題を理解する上で、

励起状態の混合の割合を正確に知ることが求められている。そして、近年、理化学研究所やドイツの GSI など、高い精度の ^{11}Be 核のクーロン分解反応実験観測が精力的に行われてきた。このように ^{11}Be 核の構造とクーロン分解反応は密接に関わっており、 ^{11}Be 核の構造を忠実に再現する模型を用いて分解反応を分析することが重要な理論的課題となっている。

本研究はチャンネル結合 $^{10}\text{Be} + n$ 模型と複素座標スケーリング法を ^{11}Be 核に適用し、チャンネル結合系での拡張された完全系の証明と ^{11}Be 核のクーロン分解反応の分析を行ったものである。そのために、まず、 ^{11}Be 核の低励起エネルギー領域の核構造を $^{10}\text{Be} + n$ チャンネル結合模型でよく記述できることを示した。この ^{11}Be 核の構造の計算で、複素座標スケーリング法により求められた共鳴状態の各チャンネルの成分をスケーリングパラメータに依らずに決定できることが示され、各共鳴状態の構造分析がチャンネルの成分によって分析された。さらに、この複素座標スケーリング法により得られた ^{11}Be 核の共鳴状態、連続状態の波動関数を用いて、クーロン分解反応の計算を行い、観測された反応断面積との比較検討が行われた。その検討のため、これまで 1 チャンネル系でのみ証明されていた複素座標スケーリング法を用いたクーロン分解反応の計算の枠組がチャンネル結合系でも成立することを示した。これにより、この計算の枠組で本質的な役割を演じている複素座標スケーリング法における拡張された完全系がチャンネル結合系でも成立することが証明された。

このチャンネル結合系に対する複素座標スケーリング法の枠組を用いて ^{11}Be 核のクーロン分解反応の解析を行い、低励起エネルギー領域における共鳴状態の寄与と連続状態からの寄与が明らかにされた。この計算結果は、最近、理化学研究所、GSI で行われた ^{11}Be 核の分解反応の結果と比較され、実験データを説明する ^{11}Be 核の基底状態における ^{10}Be 核の励起成分の混じりに関する重要な情報を得ることができた。

これを要するに、申請者の研究は、中性子過剰核 ^{11}Be の構造、および ^{11}Be 核のクーロン分解反応について重要な知見を与えるものであり、原子核物理学の研究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あるもの、と認めるものである。