

学位論文題名

Three-body analysis of ^{11}Li
with the pairing correlation in ^9Li (^9Li 核の対相関を考慮した 3 体模型による ^{11}Li の構造解析)

学位論文内容の要旨

[背景・動向]

最近の短寿命原子核ビームを用いた実験の発展により、陽子または中性子が過剰である不安定原子核 (不安定核) の性質を調べることが可能になってきた。これまで安定原子核では見えなかった原子核の新たな側面が、不安定核の研究を通じて明らかになってきている。最も典型的な例が、同じ質量数の安定核よりも核半径が異常に大きい中性子ハロー構造の発見であり、 ^6He 、 ^{11}Li 、 ^{11}Be などの中性子ドリップ核 (中性子ハロー核と呼ぶ) で観測されている。中性子ハロー核には、他にも以下の様な共通した特徴がある。

- 1、2 個の中性子の束縛エネルギーが 1MeV 以下と小さい (安定核では約 8MeV)。これは中性子ハロー核が、「硬いコア核+緩く結合した外殻中性子群」構造から成ることを示唆する。
- 多くの状態が非束縛な共鳴・連続状態として存在している。これは束縛エネルギーが小さいため、小さい励起エネルギーでも粒子放出のシキイ値が開くためである。

これらの特徴に基づいて、例えばコア核と外殻中性子群が互いに逆位相で振動する特異な励起状態である、ソフト・ダイポール共鳴の予言がなされ、中性子ハロー核のなかでも特に雛型的存在である ^6He 、 ^{11}Li に関して実験・理論面から精力的な探求がなされてきた。

しかし、現在までの研究において、ソフト・ダイポール共鳴を含めた中性子ハロー核の励起構造は未だ十分に解明されていない。特に ^{11}Li については基底状態での弱結合機構さえも明らかになっていない。そこで本論文では、 ^6He の場合と比較しながら、不安定核の結合・励起機構に関する基本的な問題である、 ^{11}Li の弱結合機構の解明を行う。

[模型・手法]

^6He 、 ^{11}Li はそのハロー構造から、それぞれ $^4\text{He}+n+n$ 、 $^9\text{Li}+n+n$ の 3 粒子構造を主要に持つと考えられるが、それらの 3 粒子系は ^5He 、 ^{10}Li 、 $2n$ のどの部分系も束縛しない (共鳴、又は連続状態) 重要な特徴を持つ (ボローミン系と呼ばれる)。これは 2,3 体系の束縛状態と共に非束縛状態の正確な取扱いが必要であることを意味している。

上記の特徴を生かすため、我々は「コア核+2 外殻中性子」の 3 体模型を採用することで、2, 3 体系の束縛、共鳴状態を同時に記述すると共に、中性子ハロー核の構造を非束縛状態まで含めて議論するために、複素座標スケーリング法を用いる。この方法は、我々が 3 体系の励起状態を束縛状態と統一的に記述できるよう発展させてきたもので、例えば ^6He の励起状態や、その電気的遷移量の導出などに適用され、有効性が確認されてきた [1]。

3 体模型に基づく本研究でのもう一つの重要な特徴は、コア核について、これまで多くの研究でなされてきた単一配位構造を仮定せずに、多配位構造の自由度を取り入れることである。これによって ^6He 、 ^{11}Li の個々の中性子ハロー核の束縛機構について、より深く広い理解が可能になる。

[結果 - ${}^6\text{He}$ -]

${}^6\text{He}$ の場合、コア核である ${}^4\text{He}$ は構造が不活性で十分硬いとみなせる。このためコアの内部自由度を陽に考えない 3 体模型により ${}^6\text{He}$ の束縛、共鳴状態の性質はほぼ良く理解できる。また外殻中性子間に働く対相関が基底状態の弱結合の再現に重要であることが示された。しかし、束縛エネルギーが観測値に比べ 0.2MeV 不足する。我々はこのエネルギー不足の問題を、単純な 3 体模型では、 ${}^4\text{He}$ コアが ${}^6\text{He}$ 中で励起している成分を無視しているためであると考え、この成分を ${}^4\text{He}-n-n$ 間に働く 3 体力の形でくり込むことによって解決することを試みた。その結果、束縛エネルギーと同時に核半径、励起状態の位置について実験値を良く再現することができた。つまりコア核が十分に硬い場合は、コアの内部自由度に伴う効果については、有効的な取扱いをした 3 体模型の範囲で中性子ハロー核の構造はよく理解できることが分かった [1]。

[結果 - ${}^{11}\text{Li}$ -]

${}^{11}\text{Li}$ については、まず ${}^9\text{Li}$ コアを単一配位で記述すると、束縛エネルギーの観測値が 0.3MeV に対して、理論値は 1MeV 不足することが示されている。この不足量は、 ${}^6\text{He}$ の場合のような有効的な取扱いではなく、 ${}^{11}\text{Li}$ において ${}^9\text{Li}$ コアの内部自由度を陽に導入してその影響を議論する必要があることを示唆している。我々は更に ${}^{11}\text{Li}$ だけでなく ${}^{10}\text{Li}$ の非束縛状態の構造においても、同様にコアの内部自由度の影響を議論し、 ${}^{10}\text{Li}$ 、及び ${}^{11}\text{Li}$ について系統的に理解することを行った。

コア核の内部自由度として、我々は中性子対相関 ($J^\pi = 0^+$) に注目する。 ${}^{11}\text{Li}$ においてその重要性が示されている、外殻中性子間の対相関だけでなく、 ${}^9\text{Li}$ 内の中性子の対相関の自由度を入れた解析を行う。

まず ${}^{10}\text{Li}$ については、最近の実験から、外殻中性子の $1s$ 波は非束縛状態であるが、散乱長などの解析から、反束縛状態を持つ程度に ${}^9\text{Li}$ 中性子間の引力が強いことが示唆されている。我々は、この $1s$ 波への強い引力の導出の機構として ${}^9\text{Li}$ 内の対相関励起が重要であると考えた。 ${}^9\text{Li}$ の波動関数において、対相関励起した中性子対が $0p$ 波を占拠している成分が、パウリ原理を満たすために $0p$ 波の外殻中性子にはブロッキング、つまり斥力として働く。一方 $1s$ 波にはこの効果が無いため、結果的に $1s$ 波と $0p$ 波のエネルギー差が縮まる。対相関励起の強さによっては、この二つの軌道がエネルギー的に縮退することも可能であり、実験の状況と合致している。つまり ${}^{10}\text{Li}$ の構造を理解する上で、 ${}^9\text{Li}$ 内の対相関の自由度と外殻中性子の運動との結合を考慮することが必要であると示された。

次に、 ${}^{11}\text{Li}$ について、 ${}^9\text{Li}$ コアの対相関自由度を考慮しただけでは、3 体の束縛エネルギーが 2MeV 程度大きすぎることが示された。これは、外殻中性子対と ${}^9\text{Li}$ 内の中性子対とが対相関による結合を起こすことにより、系全体でエネルギーを得しているのだが、その結合が強すぎることの意味している。また、 ${}^{11}\text{Li}$ のハロー構造も説明できてはいない。このとき ${}^9\text{Li}$ 内の対相関が励起している成分はかなり小さい。これは外殻中性子対の自由度が二つあるために、 ${}^9\text{Li}$ コア内の対相関励起する成分が抑制されるからである。つまり本模型による結果、対相関の働きは ${}^{10}\text{Li}$ と ${}^{11}\text{Li}$ では異なることが判明した。これには中性子の自由度が関与しており、中性子が奇数系と偶数系のときの構造の違いを表している。

次に、本模型で ${}^{11}\text{Li}$ のハロー構造が再現できない理由を考察してみる。まず原因として、 ${}^9\text{Li}$ 内の中性子対と外殻中性子対の運動が十分に取扱われていない事が考えられる。パウリ原理と対相関による結合を考慮すると、外殻中性子対の波動関数が弱結合のため空間的に広がっているとき、その性質が、中性子対が交換することで ${}^9\text{Li}$ 内の中性子対にも反映し、互いに弱結合の状態に寄与する事ができる。そこで我々は、 ${}^{11}\text{Li}$ 内での ${}^9\text{Li}$ の表面の密度分布が、単体の ${}^9\text{Li}$ よりも外側に薄く伸びている効果を有効的に取り入れてみた。結果、 ${}^{11}\text{Li}$ の弱結合とハロー構造を再現することが出来た。これは、 ${}^{11}\text{Li}$ の構造には、外殻中性子との結合による ${}^9\text{Li}$ コアの構造の変化が効いている可能性があることを示唆している。

[まとめ]

我々は、雛型的な中性子ハロー核である ${}^{11}\text{Li}$ の構造を、 ${}^{10}\text{Li}$ と共に外殻中性子間、及び ${}^9\text{Li}$ 内の中性子の対相関自由度に注目した 3 体模型により解析した。その結果として、 ${}^9\text{Li}$ コアの対相関の自由度が、 ${}^{10}\text{Li}$ の場合は、外殻中性子が $0p$ 波のときには外殻中性子の運動と結合して斥力効

果として働くが、 ^{11}Li の場合は、外殻中性子対の自由度のため、コア内の対相関が抑制されることが判明した。これは対相関の働きが ^{10}Li と ^{11}Li では異なる事を示しており、対相関を考慮した $^{10,11}\text{Li}$ の系統的な解析で得られた新しい見解である。但し、本模型では ^{11}Li のハロー構造を再現できていない。そこで、改善の可能性として、我々は外殻中性子対との対相関結合による、 ^9Li コアの構造変化の影響について議論した。

[参考文献]

[1] Takayuki Myo, Shigeyoshi Aoyama, Kiyoshi Katō, Kiyohi Ikeda, Phys. Rev. C**63**(2001)054313.

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 加 藤 幾 芳

副 査 教 授 和 田 宏

副 査 助 教 授 大 西 明

副 査 教 授 フィリポフ, ゲナーディ
(ウクライナ, ボゴリューボフ理論物理学研究所)

副 査 教 授 岡 部 茂 玄
(情報メディア教育研究総合センター)

学 位 論 文 題 名

Three-body analysis of ^{11}Li with the pairing correlation in ^9Li

(^9Li 核の対相関を考慮した3体模型による ^{11}Li の構造解析)

近年、二次不安定核ビームを用いた原子核実験研究が進展し、中性子・陽子放出に関して不安定なドリップ・ライン近傍の不安定原子核の性質について理解が進んできた。安定核が共通に持つ質量密度の飽和性、結合エネルギーの飽和性などの原子核の基本的性質と考えられてきたことが、不安定核では成り立たないことが明らかになり、原子核の理解を基本に戻って再検討することが求められている。そのような不安定核の中で、二中性子ハロー核 ^{11}Li は不安定核の典型と考えられているが、まだその性質についても十分理解されていない。

本論文は、このような状況にある二中性子ハロー核 ^{11}Li について、 ^9Li コア・クラスター核内の中性子対相関を考慮した拡張された $^9\text{Li}+n+n$ 模型を用いて、 ^{11}Li 核の結合機構、および ^{10}Li 核のスペクトロスコピーを同時に研究したものである。そして、 ^{11}Li 核のハロー構造について最も基本的な理論的理解を与える結果を得た。

これまでの二中性子ハロー核 ^{11}Li に関する研究も、 $^9\text{Li}+n+n$ 模型を用いて行われてきた。しかし、 ^9Li コア・クラスターは中性子について $(0p_{3/2})^4$ の単一殻模型型配位で記述できると仮定された。また、この模型研究を進める上で、 $n-n$ 間相互作用と共に $^9\text{Li}-n$ 間相互作用についての理解が必要となるが、 $n-n$ 間相互作用は不安定核の核内相互作用としての性質についての理解は必ずしも十分

でないだけでなく、 ${}^9\text{Li}-n$ 間相互作用は ${}^{10}\text{Li}$ 核の性質がわかっていないことに原因して大きな不定性がある。また、 ${}^9\text{Li}+n+n$ 模型では、 ${}^{11}\text{Li}$ 核の結合エネルギーをはじめとして、基本的問題が説明できないことがわかってきた。

そこで、著者は、過剰中性子群の間に働く対相関に注目し、外殻中性子間の相関を拡張された変分関数基底であるハイブリッド TV 模型で厳密に扱い、 ${}^9\text{Li}$ コア・クラスター内の対相関を二粒子—二空孔配位の配位混合で扱う新たな模型、すなわち拡張された ${}^9\text{Li}+n+n$ 模型を提案した。そして、外殻中性子間の相関と ${}^9\text{Li}$ コア・クラスター内の対相関の間の結合を、チャンネル結合直交模型の枠組みで解きあげた。学位論文は、この模型を中性子過剰核である ${}^6\text{He}$, ${}^{11}\text{Li}$ 核に適用して分析した結果に基づいている。以下に、その内容を簡単に示し、導かれる結論とその意義を述べるものである。

${}^6\text{He}$ の結果は、コア・クラスターの内部自由度について、単純な陽子・中性子共に $(0s_{1/2})$ 軌道配位を仮定した ${}^4\text{He}+n+n$ 模型によって、ハロー構造を持つ基底状態と同時に励起共鳴状態、連続状態をよく説明することを示した。この模型で、わずかな結合エネルギー (0.2 MeV) が観測値に比べて不足する。この問題について、著者は、 ${}^4\text{He}$ コアの配位混合の効果を摂動論の立場から調べ、有効 ${}^4\text{He}-n-n$ 三体力を用いて解決できることを示した。

一方、 ${}^{11}\text{Li}$ に対する ${}^9\text{Li}$ コア・クラスターの配位混合の効果は、外殻二中性子の対相関エネルギーと同程度の 1~2 MeV の結合エネルギーに相当し、摂動的な取り扱いができないことが示された。そこで、 ${}^9\text{Li}$ コア・クラスターの対相関配位混合と外殻中性子の運動の結合を解き、 ${}^{10}\text{Li}$ の非束縛準位構造を調べて、また観測データと比べることによって、 ${}^9\text{Li}-n$ 間相互作用を決定した。そこで ${}^9\text{Li}-n$ 間相互作用の基本的理解は、 ${}^9\text{Li}$ コアの対相関に対するパウリ・ブロッキング効果に基づいて理解される。

得られた ${}^9\text{Li}-n$ 相互作用を用いて行われた拡張された ${}^9\text{Li}+n+n$ 模型の結果は、外殻中性子が 2 個になるため、 ${}^9\text{Li}-n$ 相互作用の引力効果が 2 倍働くことになり、 ${}^{11}\text{Li}$ 核では ${}^{10}\text{Li}$ に対するパウリ・ブロッキング効果が相殺されて逆に結合エネルギーが 2 MeV 程度大きすぎることを明らかにした。この問題を解決し、ハロー構造をもたらす大きな s-波の成分を説明するために、 ${}^9\text{Li}$ コア・クラスター内の中性子対相関に対するパウリ・ブロッキング効果に加えて、 ${}^9\text{Li}-n$ 相互作用の長距離性が重要であることを論じた。

これを要するに、著者は、不安定核 ${}^{11}\text{Li}$ の二中性子ハロー構造、弱結合機構、 ${}^9\text{Li}-n$ 相互作用の性質、 ${}^{10}\text{Li}$ 核のスペクトロスコピーについて、中性子対相関を取り入れて拡張されたコア・プラス・中性子模型で統一的に説明できることを示した。このことは不安定核の理解にとって、重要な成果であり、他の不安定核の研究に貢献するところきわめて大きいものである。

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。