

A hybrid-VTY model for the $T=0, 1$ states of $A=6$ nuclei(A = 6 の原子核における $T = 0, 1$ 状態に対する

ハイブリッド VTY 模型)

学位論文内容の要旨

This thesis presents a three-body model of the $T=0, 1$ states of $A=6$ nuclei (${}^6\text{He}$, ${}^6\text{Li}$ and ${}^6\text{Be}$) constructed based on the so-called hybrid-VT model which was sufficiently employed previously for treating the ${}^6\text{He}$ system. The author extends the model space of the hybrid-VT model for the ${}^4\text{He}+N+N$ three-cluster system by incorporating the Y-type basis representation in addition to the existing V- and T-type bases. The Y-type basis plays an important role in calculations of matrix elements of momentum-dependent interaction between ${}^4\text{He}-N$ in the V-type bases. In order to simulate the $\alpha+d$ correlations in ${}^6\text{Li}$, the T-type basis of the previous model is also expanded to include the coupled ${}^3\text{S}_1$ - ${}^3\text{D}_1$ states of deuteron. The GPT force which contains the central, tensor and spin-orbit components is used to describe the N-N interactions, while the so-called KKNN potential is employed to represent the ${}^4\text{He}$ -core interactions. The realistic N-N interactions simulating $T=0$ and 1 scattering properties of NN systems are shown to reproduce successfully the $T=0$ and 1 energy levels observed in ${}^6\text{Li}$.

All the low-lying states belonging to the negative- and positive-energy spectra of $A=6$ nuclei have been searched using the Complex Scaling Method (CSM) within a wide-range of scaling angle θ . The positive-energy states are solved as two-body (${}^4\text{He}+d$) and three-body (${}^4\text{He}+N+N$) resonant states in the CSM framework. In the case of ${}^6\text{He}$, it is found the $0^+(T=1)$ ground state and the $2^+_{1,2}(T=1)$ resonance states have good correspondence with the results of the previous studies. For the ${}^6\text{Li}$ system, the $1^+_1(T=0)$ ground state, $0^+(T=1)$ and $3^+(T=0)$ excited states, and $2^+(T=1)$ and $1^+_2(T=0)$ resonance states are obtained correspondingly to the observations. The previous studies based on the effective interaction between N-N have failed in reproducing these $T=0$ and 1 states in ${}^6\text{Li}$. On the other hand, for ${}^6\text{Be}$, the calculation predicts the $0^+(T=1)$ ground state, which is a resonance, and the $2^+(T=1)$ resonance state due to the Coulomb interaction.

The calculated binding energies, resonance energies and widths of these states are in good agreement with those of the experimental values. The predicted root-mean-square (r.m.s.) matter radii for the ground state of ${}^6\text{He}$ and ${}^6\text{Li}$ are also in accordance with the observed values. Using the present model, the author also searches the well-estimated $1^-(T=1)$ resonance state of ${}^6\text{He}$ which has been associated with the presence of the soft-dipole resonance in this ${}^6\text{He}$ nucleus. There is found no $1^-(T=1)$ resonance state with the width smaller than the value limited by the scaling angle θ . The role of the tensor force in the ground state of ${}^6\text{He}$ is assessed by considering the relative contributions from different term configurations of the NN interaction to the binding energy. It is found that inclusion of the tensor force reduces the gain of the binding energy, which is understood as the weakening of the neutron-neutron correlations in ${}^6\text{He}$. The tensor force also plays a significant role in the ground state of ${}^6\text{Li}$ due to the presence of the deuteron cluster.

In conclusion, this thesis presented that the low-lying energy levels including bound and resonant states of $A=6$ nuclear systems are well predicted by the ${}^4\text{He}+N+N$ three-cluster model using the realistic NN interaction and the developed VTY-basis framework. In this study, CSM was also shown to be very useful in solving the resonant states of the three-body system.

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 助 教 授 大 西 明

副 査 教 授 岡 部 成 玄 (情報基盤センター)

学 位 論 文 題 名

A hybrid-VTY model for the $T = 0, 1$ states of $A=6$ nuclei

($A = 6$ の原子核における $T = 0, 1$ 状態に対する

ハイブリッド VTY 模型)

近年、RI ビームを用いた原子核実験技術・研究の発展によりドリップ・ライン近傍の原子核の情報・理解が増大してきた。その結果、ドリップ・ライン近傍の原子核において、異常に大きい核半径をもつ原子核の存在や、それに伴って原子核の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などこれまでの安定核には見られない新たな知見が得られてきた。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に関する基本法則を見直して、新たな理解を構築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ている。

ドリップ・ライン近傍の原子核の中で、 ${}^6\text{He}$, ${}^{11}\text{Li}$, ${}^{11}\text{Be}$ などのいわゆる中性子過剰核は中性子ハロー核と呼ばれ、緩く束縛された中性子が空間的に広がった構造をもっていると考えられている。これらの中性子ハロー核の中で、 ${}^6\text{He}$ は多くの実験データをもち、理論的にもよく研究されてきた原子核である。それらの結果から、 ${}^6\text{He}$ は核子数 (A) が 6 で、原子核の中で最も安定な核である ${}^4\text{He}$ の周りに中性子が 2 つ緩く束縛した構造を持っていると理解される。この ${}^4\text{He}+2n$ 模型による ${}^6\text{He}$ 核の理解の有効性は他の $A = 6$ の原子核、すなわち、 ${}^6\text{Li}$ (${}^4\text{He}+p+n$)、 ${}^6\text{Be}$ (${}^4\text{He}+2p$) に原子核の研究によって深められ、安定核である ${}^6\text{Li}$ と同時に不安定核 ${}^6\text{He}$ や非束縛系である ${}^6\text{Be}$ を含んだ研究が基本的理解への第一歩となると期待される。

本研究は、その目的のため、 ${}^4\text{He}+N+N$ ($N=p$ or n) 模型を用いて現実的核子間相互作用をバレンス核子間の相互作用に採用し、3 体弱束縛状態および共鳴状態を解き上げ、 $A=6$ の原子核におけるアイソスピン $T = 0$ および 1 の状態における対相関や重陽子相関の重要性を論じたものである。

${}^4\text{He}+N+N$ ($N=p$ or n) 模型を用いた $A = 6$ の原子核の研究はこれまでもなされてきて

いるが、本研究でこれまでの研究から大きく進展したところは、以下の点である。まず、複数の現実的核子間相互作用を用いて計算し、相互作用によらず共通にあらわれる相関に注目した点であり、また、重要な相関に注目した物理的座標系であるV型およびT型のハイブリッド模型に加え、行列要素の計算においてY型の座標系への変換を導入して、量子力学的3体問題をより精確に解いた点である。さらに、3体共鳴状態を、複素座標スケールリング法を用いて解くことによって、束縛状態、共鳴状態の性質・特徴を同じ枠組みで調べた点が、これまでの研究より一層進んだものになっているところである。ここでの模型計算のもう一つの特徴は、 ${}^4\text{He}$ コアとバレンス核子間の反対称化の効果を直交条件模型で取り入れている点である。

得られた結果は、 $A=6$ の3つ原子核(${}^6\text{He}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^6\text{Be}$)の10MeV以下の励起エネルギー準位とその波動関数であり、その結果から各準位の物理的性質が調べられ、実験・観測データとの比較・検討が行なわれた。 ${}^6\text{He}$, ${}^6\text{Be}$ では $T=1$ 状態だけが存在し、計算された $T=1$ 状態として、基底状態 $J^\pi=0^+$, 励起状態 $J^\pi=2^+$ は観測データとよく一致することが示された。一方、 ${}^6\text{Li}$ では $T=0$ と1の状態が存在し、 $T=0$ では基底状態 $J^\pi=1^+$ に加え、 3^+ 準位が束縛状態として得られた。また、 $T=1$ では、 ${}^6\text{He}$, ${}^6\text{Be}$ と対応して ${}^6\text{Li}$ において観測される $J^\pi=0^+$, 2^+ が求められた。このエネルギー準位についての結果は、全くパラメータがない計算であるにもかかわらず、これまでの研究と比べ、最もよく実験データを説明することを示した。とりわけ、 ${}^6\text{Li}$ の $T=1$ の状態を $T=0$ と同時に再現した初めての計算結果であり、 $T=0$, 1の散乱実験データをよく再現する現実的核子間相互作用を用いたことによる結果であると考えられる。また、テンソル力を正確に取り入れたことがこの結果を得る上で重要であったと考えられる。これらの成果は、模型空間を大きく取った ${}^4\text{He}+N+N$ 模型計算を実行して初めて得られたものであり、本研究の優れた成果の一つである。この計算におけるもう一つの優れた成果は、3体共鳴状態が精密に計算されて、準位エネルギーだけでなく共鳴幅も得られ、観測データとよく対応していることが確かめられたことである。唯一観測データを説明しない結果は、 ${}^6\text{Li}$ の $T=0$, $J^\pi=2^+$ 状態である。理由は共鳴エネルギーより大きな共鳴幅を持つため、複素座標スケールリング法では求めることが困難な状態であることによる。さらに、波動関数の分析を通じて、同種粒子(nn, pp)間の対相関とpn間の重陽子相関について興味深い結果が得られた。すなわち、 ${}^6\text{He}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^6\text{Be}$ の $T=1$ 状態では $J^\pi=0^+$ 対相関が重要であり、 ${}^6\text{Li}$ の $T=0$ ではpn間の重陽子相関が重要で、テンソル力を考慮しなければ全く重陽子相関の重要性を説明できないことが示された。この模型では、 ${}^4\text{He}$ コアが $(0s)^4$ の単一配位が仮定されており、コアの励起配位を含む2バレンス核子間の相関が考慮されていない。著者は、その効果を ${}^4\text{He}-n-n$ 有効三体力として考慮した計算を行なった。その結果、わずかに不足する ${}^6\text{He}$ の結合エネルギーを ${}^4\text{He}-n-n$ 有効三体力で説明できることを示した。

これを要するに、申請者の研究は、 $A=6$ の原子核 ${}^6\text{He}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^6\text{Be}$ のエネルギー準位構造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。