

学 位 論 文 題 名

Properties of Few-Cluster Nuclear Systems in the Fock-Bargmann Space

(フォック・バーグマン空間における原子核少数クラスター系の性質)

学位論文内容の要旨

Properties of operators and functions defined in the Fock--Bargmann space are analyzed with the purpose of application in microscopic calculations of light nuclear systems. The modified Brink--Bloch orbital is the kernel of integral transformation to and from the Fock--Bargmann space. The density matrix and probability distributions are analyzed for simple few-body systems.

The trajectories of wave packets moving in the phase space, obtained by solving the classical equations are compared with the quantum probability distributions to determine the limits of applicability of the former method. Quantum corrections to the equations due to the antisymmetrization lead to the appearance of an effective potential, but the results do not necessarily approximate the quantum solutions in the case of low energy and momenta. Other effects, such as the spreading of the wave packets with time, are needed to be taken into account. It is shown that misleading results may appear in the case of weakly bound systems.

Application of the Algebraic Version of the Resonating-Group Method (AV RGM) to the systems with an open p-shell is considered. The non-sphericity of clusters is described with the use of labels of irreducible representations of the $SU(3)$ group as quantum numbers. The nuclei ${}^9\text{Li}$ and ${}^{10}\text{Be}$ are described within the leading $SU(3)$ representation. Correct ordering of spectral levels is obtained.

A method of analytical $SU(3)$ projection of the norm and Hamiltonian generating matrix elements is developed and applied to core+n systems. The method effectively resolves the problem of $SU(3)$ multiplicity and does not use the coupling coefficients. The Pauli-allowed basis functions for these systems are constructed and normalized. They are obtained in the compact vector representation with the use of an original code for computer algebra calculations.

The Algebraic Version of the Resonating Group Method make the phase space variables follow the quantum mechanical equations of motion. It has been applied to the two- and three-cluster systems where all the constituent clusters exhibit the $SU(3)$ symmetry $(0,0)$, such as the alpha-clusters or separate nucleons. However, due to the new experimental results of the last decade, the interest is shifted towards more exotic nuclei, where the clusters are p-shell nuclei. In this work, the theoretical framework of

the AV RGM is extended to the case of binary systems where one of the clusters, or both of them, have their p-shell partially filled. It required the introduction of additional degrees of freedom (internal cluster vectors) and classification of basis states according to the indices of irreducible representations of the $SU(3)$ group. The method of calculation the norm and interaction overlaps (kernels) and the forthcoming $SU(3)$ projection is completely analytical and does not require the knowledge of the $SU(3)$ Clebsch--Gordan coefficients. It uses the explicit form of the Casimir operator expressed in terms of the variables of the Fock--Bargmann space.

For a range of nuclear systems, the norm overlaps, Pauli-allowed basis functions and matrix elements were found and presented in an analytical form, setting a background for future systematic numerical calculations.

The analytical derivations were in part produced using an original code developed by the author for computer-algebraic calculations in the Fock--Bargmann space.

The proposed algorithm is applicable to microscopic studies of few-cluster systems, including the unstable nuclei.

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 加 藤 幾 芳

副 査 教 授 石 川 健 三

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 成 玄

(情報メディア教育研究総合センター)

学 位 論 文 題 名

Properties of Few-Cluster Nuclear Systems in the Fock-Bargmann Space

(フォック・バークマン空間における原子核少数クラスター系の性質)

近年、短寿命原子核ビームを用いた原子核実験の発展により、陽子または中性子が過剰な不安定核の研究が著しく進展してきた。そして、不安定核の理論的研究において、クラスター模型が大きな役割を果たしてきた。さらに、今後の実験観測の蓄積のもとで、不安定核の理論的研究を一層進めるために、少数クラスター理論の発展が不可欠である。

本論文は、このような現況にある少数クラスター系の理論的研究を、解析的フォック・バークマン空間を用いて行ったものである。その目的は、パウリ原理の役割、クラスター間相互作用、さまざまな演算子の性質などを微視的に解明することである。そのために、実空間からフォック・バークマン空間への変換をもたらす変形ブリンクープロッホ軌道関数を用いてカーネルの計算を行って、密度行列、確率分布の少数クラスター系の分析を行った。

位相空間における波束の軌道を、波束に対するシュレディンガー方程式から得られる古典運動方程式解くことによって求め、これまで議論されてきた反対称化分子動力学の結果や量子確率分布と比較して、近似の程度を議論した。核子間の反対称化による効果は、古典近似の方程式に有効ポテンシャルの付加として現れるが、低エネルギー・低運動量衝突の場合、あるいは不安定核のような弱結合状態の場合、量子論的解の近似として必ずしもよくないことが明らか

にした。その理由は、空間的に広がった波動関数を 1 つの波束で近似するところにあると考えられ、たとえば、波束の広がりを時間依存させて解くことによって、近似の悪さが改善されることを指摘した。

クラスター内の核子間の反対称化を正確に実行してクラスター間相対運動を記述する共鳴群の方程式を、調和振動子基底を用いて、変分的に解く方法を代数的共鳴群法 (AVRGM) と呼ぶ。その行列要素をフォック・バーグマン空間で求める一般的手法が、Filippov 博士を中心とするキエフ・グループによって開発されてきた。著者は、それを、p 軌道クラスターを含む系に適用できるように発展させた。そこでは、p-軌道非閉殻核は SU(3)群のひとつの既約表現で表現される。その方法が、不安定核 ^9Li 、 ^{10}Be に適用され、エネルギー準位が計算され実験データと矛盾しない結果を得た。

本論文のもう一つの重要な結果は、ノルム・カーネルの固有状態や、その行列要素を SU(3)群射影法で解析的に求める新たな方法を開発して、コアプラス中性子系に適用したことである。この方法の利点は、SU(3)既約表現の多重度を容易に求めることを可能にし、SU(3)群や O(3)群のクレブシュ・ゴルダン係数や再結合係数を必要としないことである。カーネルの計算は計算機による数式処理のコードを作成して、計算機を用いて行った。

本論文で展開されたことは、不安定核の少数クラスター系について、共鳴群ノルム・カーネル計算、パウリ許容状態による基底関数系の構成、行列要素の計算を解析的に行う方法の開発であり、今後の数値計算の基礎を与えたことになる。このことは、この分野の進展に大きく寄与するものとなる。

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。