

学位論文題名

Antisymmetrized Molecular Dynamics with Coherent
State Pion and Its Application to Light Nuclei

(コヒーレント状態の π 中間子場を取り入れた
反対称化分子動力学と軽い核への適用)

学位論文内容の要旨

1935年 Yukawa により核子間相互作用を媒介するものとして中間子の存在が予言された。その後 π 中間子が発見され、他の中間子等の交換も取り入れた模型の構築を通じて核力の理解は進展してきた。これらの現実的核力は中心力の他に、スピン・軌道力 (LS 力)、テンソル力等の成分を含み、強い状態依存性を持つ。また、2核子のスピン・パリティの状態ごとに phase shift を合わせるように中心力、LS 力、テンソル力を決めた現実的核力を再構成し、それをを用いて核構造の研究がなされてきた。現実的核力を直接的に取り扱う構造研究は主に少数系において行われ、 α 粒子内部では強いテンソル力の寄与が中心力と同等かそれ以上であることが、すでに 1970 年代に ATMS (Amalgamation of Two-body correlations into Multiple Scattering process) によって示されている。

一方重い核においては、パリティの異なる軌道角運動量の状態を結合させるようなテンソル力を用いた多体系の計算は困難であるため、テンソル力を中心力と LS 力に練り込んだ有効相互作用や現象論的な平均場により核構造の研究が行われてきた。Mayer と Jensen が中心力と LS 力からなる一体場で shell 内の最も大きい全角運動量をもつ一粒子軌道が下がることにより原子核の魔法数を説明したことがその代表として挙げられる。

テンソル力の重要な性質は、全角運動量は同じで軌道角運動量の異なる状態を結合させることである。例えば重陽子においては 3S_1 のみでは固有状態にはならず、 ${}^3S_1 + {}^3D_1$ で固有状態となる。こうした結合を一粒子軌道でみると、例えば2核子が s -軌道から p -軌道に上がって相対的に D -wave に組むという2粒子2空孔 ($2p-2h$) 状態に対応する。このようにテンソル力はパリティの異なる軌道を結合させる相互作用であり、LS 力と同じように一粒子軌道を変え得る。しかし、こうした非対角要素を持つ相互作用の取り扱いが多体問題を解く上で非常に困難であり、中心力と LS 力に練り込まれる下地となっていた。

しかし、最近になってテンソル力を顕に取り入れた模型による評価、あるいは強いテンソル力をもたらす π 中間子を取り入れた模型によって原子核の構造を研究しようという動きがでてきた。Toki らは、 π 中間子を考慮した相対論的平均場理論によって、平均場の段階で π 中間子が核構造に大きな影響を与えうることを、Ogawa らは chiral sigma model で LS 力の効果とされている一粒子軌道の splitting の半分程度が π 中間子によってもたらされることを示した。しかし、こうした議論は基底状態に留まっており、励起状態の議論はほとんどなされていない。

本研究で我々は原子核の基底状態及び、励起状態をよく記述する反対称化分子動力学 (Antisymmetrized Molecular Dynamics; AMD) に π^0 中間子をコヒーレント状態に取り入れたモデルを構築し、軽い核の構造研究に適用した。

AMD は A 核子系の波動関数をガウス波束のスレーター行列式で記述し、核子の自由度で多体系を解く変分模型である。位相空間上にガウス波束を置き、反対称化させたまま相互作用を働かせ、エネルギー表面の微分を求めその方向に波束を動かすことによって、エネルギー極小の原

子核の状態を得る。さらに、この手法は形やクラスタリングの仮定を必要としないので、様々な原子核を扱うことが可能である。これまでも中性子過剰核や分子軌道にも適用され成功を納めているが、やはり対象とする原子核によって相互作用を変える必要がある。一般に、核子は π 中間子との相互作用あるいはテンソル力によってパリティの異なった一粒子軌道へと遷移する。励起状態の記述にはこれらの遷移演算子の異なる状態間での Matrix Element を計算する必要がある。我々は π 中間子をコヒーレント状態で用意し、AMD の波動関数と π 中間子の波動関数の直積で全系の波動関数を記述することにより、 π 中間子と核子の相互作用を π 中間子の演算子と核子の演算子に分離して評価できることを用いて AMD に適用した。

一つの適用例として ^{12}C 原子核を取り上げた。中性 π 中間子のみを取り扱うこのモデルの適用にあたり、中性 π 中間子と核子の結合定数を約 $\sqrt{3}$ 倍して評価している。これは Sugimoto らの荷電・パリティ射影ハートリーフックにより α 粒子を計算した結果と矛盾しない。その結果、中性 π 中間子が核内で期待値をもちうることを示した。これにより、 ^{12}C の 0^- 状態が、核子の 0^- 状態と核子の基底状態 (0^+) に中性 π 中間子 (量子数 0^-) が一つ結合した状態が結合することによりエネルギー的に下がることを定性的に示した。また、基底状態 (0^+) と 2^+ の間隔が π 中間子と核子の相互作用により、広がることを示唆した。これは Ogawa らの π 中間子によって一粒子軌道を変える効果を励起状態でみたものである。

現在の枠組では荷電 π 中間子の取り扱い、 π 中間子と核子の結合によってあらわれる Δ 粒子との $\pi N\Delta$ 結合、short range correlation、 1π 中間子交換相互作用の交換項である Fock term、 π 中間子の効果を取り除いた有効相互作用の構築など解決すべき点は多いが、異なるパリティを持つ一粒子軌道の結合を取り入れて原子核の励起状態をも記述できる数少ないモデルであると位置づけられ、ハドロン物理と核子多体系の物理をつなぐ架け橋の一つとなりうるであろう。

学位論文審査の要旨

主査	助教授	大西	明
副査	教授	加藤	幾芳
副査	教授	和田	宏
副査	教授	岡部	成玄 (情報基盤センター)
副査	助教授	布施	泉 (情報基盤センター)

学位論文題名

Antisymmetrized Molecular Dynamics with Coherent State Pion and Its Application to Light Nuclei

(コヒーレント状態の π 中間子場を取り入れた
反対称化分子動力学と軽い核への適用)

核子間に働く強い力(核力)から原子核の構造を解明することは、Yukawa の中間子論以来、原子核物理学における基本課題である。 π 中間子によりもたらされるテンソル力は、北大グループの先駆的な研究以来、少数核子系において中心力と同等以上の寄与を持つことが直接的に示されてきた。一方で質量数のより大きな原子核では、核子間の異なる軌道角運動量を結合する膨大な波動関数の空間が必要となり、テンソル力は間接的にしか取り扱われてこなかった。最近になって π 中間子、あるいはテンソル力の効果をあらわに取り入れた核構造研究の試みが始まっているが、これらの多くは基底状態、あるいは少数核子系にその適用が限られている。

著者は本論文において、 π^0 中間子をコヒーレント状態の形であらわに取り扱い、反対称化分子動力学(AMD)と組み合わせることにより原子核の基底状態・励起状態を記述する新たな理論的枠組を開発し、軽い核の構造研究に適用した結果を示した。コヒーレント状態の導入により、 π^0 中間子場演算子の行列要素を異なる状態間でも求めることが可能となり、AMD と組み合わせることで多くの原子核の励起状態に対する π^0 中間子の直接的な役割を研究する道を拓いた。また、これまで示されていた一粒子状態のスピン・軌道力的な splitting に対する π^0 中間子の寄与が観測可能な軽い核の励起スペクトルに反映されることが示された。

これを要するに、著者は多くの原子核の基底状態・励起状態における π 中間子の直接的な役割を研究する可能性を拓き、軽い原子核における π 粒子の役割について新知見を得たものであり、分野の研究に対して貢献するところ大なるものである。

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があるものと認める。