

論文の内容の要旨

論文題目

Properties of the many-nucleon system in the unitary-model-operator approach

(ユニタリ模型演算子法による核子多体系の性質)

氏名 宮城 宇志

原子核は陽子と中性子（まとめて核子と呼ぶ）からなる自己束縛な有限量子多体系である。19世紀末における放射性元素の発見に端を発したこの分野は主に天然に存在する原子核の性質を調べることで発展してきた。しかし、近年では主に加速器に関連する技術が大きく進展し、天然には存在しない非常に短寿命の原子核が生成され、それらの性質を調べることで、原子核の新たな面が明らかになりつつある。このような発展に伴って、予言力を保持する理論的なアプローチが求められている。

一方理論側では、計算機技術や方法論における進展が目覚しく、上記の要望に応えるべく核子間に働く相互作用に基づいた研究が着実に進められている。これらの研究では、核子間の相互作用自体の問題とそれに基づく多体問題という2つの大きな問題がある。この分野における最近の研究から、定量的な理解を得るためには、核子-核子相互作用に加えて、3核子相互作用の導入が必要であることがわかっている。本論文では、核子-核子相互作用における近年の発展を紹介し、多体問題の計算手法について議論する。核子間相互作用に基づく計算手法はいくつか存在するが、本研究では、ユニタリ模型演算子法（UMOA）を用いる。UMOAでは相似変換によって、粒子-空孔励起から分離されたハミルトニアンを構築する。分離する粒子-空孔励起の数に適切な制限を加えることで、通常の第一原理計算では計算不可能な質量数の原子核の計算が可能となる。

本論文では、核子-核子相互作用を用いて、広い質量領域にわたる原子核の基底状態エネルギーとその半径に焦点をあてて議論する。用いるのは核子-核子相互作用のみであるが、各図表全域にわたる第一原理的な計算が行われた例はなく、核子-核子相互作

用のみでは記述できない多核子相互作用の影響を探るという意味でも本研究は重要である。また、本研究による系統的な数値計算の結果は、本研究は無限系における研究(核子系の状態方程式など)の手がかりになると考えられ、天体物理学への応用についても重要となり得る。

本論文ではまず、CDBonn 相互作用を用いて ${}^4\text{He}$, ${}^{16}\text{O}$, ${}^{40}\text{Ca}$, ${}^{56}\text{Ni}$ の基底状態エネルギーと半径について議論する。得られた結果から、近年の研究でも示唆されているように、定量的な理解のためには核子-核子相互作用だけでなく 3 核子相互作用の効果が必要であることが確認できる。ただし、ここで得られた計算結果は一粒子波動関数に含まれるパラメータである $\hbar\omega$ に依存する問題を残している。この問題を解決するために我々は一体相関演算子を初めて UMOA に導入した。それによって $\hbar\omega$ 依存性は無視できるほどに軽減され、より信頼性の高い UMOA による数値計算を行うことができるようになった。次に、この新しい UMOA と他の第一原理的な計算手法を比較するために、近年この分野でよく使われている(カイラル有効場理論に基づく相互作用を similarity renormalization group (SRG) 変換した)核子-核子相互作用等を用いて、 ${}^4\text{He}$ と酸素同位体の基底状態エネルギーを計算した。比較の結果、UMOA が他の第一原理的な計算手法と同様に、基底状態の計算が可能であることがわかった。次に SRG 変換した核子-核子相互作用を用いて、 ${}^4\text{He}$ から ${}^{218}\text{Pb}$ までのいくつかの閉殻な原子核に対して系統的に基底状態エネルギーと半径を計算した。CDBonn 相互作用を用いた時と同様、基底状態エネルギーについては実験値よりも過大評価し、半径は実験値よりも過小評価であり 3 核子相互作用を導入する必要がある。しかし、結果を注視すると、陽子数-中性子数の非対称性に起因する物理量が SRG 変換のスケールに対して不変であると推測できる。これによって、特に、中性子半径と陽子半径の差で定義される中性子スキン厚 Δr_{np} を使用する核子-核子相互作用に依存せずに一意に決定することができる。さらに、核子-核子相互作用のみであっても、 Δr_{np} の計算値は実験値の経験的な傾向と一致することが分かった。

上で述べられている様に、基底状態エネルギーやその半径の定量的な理解のためには少なくとも 3 核子相互作用を導入することが必要である。3 核子相互作用を導入するためには UMOA の枠組みを拡張する必要があることがわかっている。本論文では、3 核子相互作用の導入に向けて UMOA の枠組みを拡張し、核子-核子相互作用を用いて ${}^4\text{He}$ の基底状態エネルギーを計算した。UMOA の結果と第一原理計算の結果が非常によく一致し、3 核子相互作用導入の準備を整えることができた。今後、核子-核子相互作用と 3 核子相互作用を出発点とした UMOA 計算を通じて、原子核のより定量的な理解へむけた進展が期待できる。