

氏 名	柳瀬 宏太
博士の専攻分野の名称	博士（理学）
学位記番号	博理工甲第 1118 号
学位授与年月日	平成 31 年 3 月 20 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	Nuclear shell-model study around $^{208}\text{Pb}$ and the nuclear Schiff moment of $^{199}\text{Hg}$ (鉛 208 周辺の原子核の殻模型計算および水銀 199 の Schiff モーメントの評価)
論文審査委員	委員長 教 授 吉永 尚孝 委 員 教 授 鈴木 健 委 員 准教授 山口 貴之 委 員 教 授 谷井 義彰

## 論文の内容の要旨

Structure of heavy nuclei around  $^{208}\text{Pb}$  has not been studied enough compared to that of light nuclei both in theory and in experiment. In this study, large-scale shell-model calculations are performed for even-even, odd-mass, and doubly odd nuclei around the doubly magic core of  $^{208}\text{Pb}$ . Nuclei in this region are classified in four regions with different shell-model spaces (southwest:  $Z < 82$  and  $N < 126$ , southeast:  $Z < 82$  and  $N > 126$ , northwest:  $Z > 82$  and  $N < 126$ , and northeast:  $Z > 82$  and  $N > 126$ ). We performed a systematic shell-model calculation with only one optimized parameter set of effective two-body interactions for each region. The results for energy spectra,  $B(E2)$  values, and electromagnetic moments had been presented in the northwest and in the northeast regions.

In this thesis, we present a large-scale shell-model calculation in the southwest ( $Z < 82$  and  $N < 126$ ) region. We establish one parameter set of effective interactions which can reproduce the experimental values of energy spectra, electromagnetic transition probabilities, and electromagnetic moments. Using the effective interactions, we suggest the mechanisms of long half-life excited states (isomers), the spins and parities of experimentally ambiguous states.

The atomic electric dipole moment (EDM) has long been expected to be measured in laboratory. In particular the experimental limit on the atomic EDM of  $^{199}\text{Hg}$  gives the strictest constraints on some CP-violating couplings in hadronic sector. In this thesis, we calculate the nuclear Schiff moments (NSMs), which dominantly contribute to EDMs of diamagnetic atoms such as  $^{199}\text{Hg}$  and  $^{129}\text{Xe}$ . The NSMs of the heavy nuclei have been evaluated in some nuclear models, but the model dependence is very large. We calculate the NSMs of  $^{199}\text{Hg}$ ,  $^{129}\text{Xe}$ , and a paramagnetic atom of  $^{210}\text{Fr}$  in the nuclear shell model. The nuclear effective interactions are determined to systematically reproduce the nuclear structure of 20-30 nuclei in each region of the nuclear chart. Thus, reliable effective interactions are now available. In this study, the NSMs and EDMs of heavy nuclei are calculated in the nuclear shell model for the first time.

## 論文の審査結果の要旨

中重核および重い原子核の構造を理解することは、R プロセスにおける元素合成のメカニズムを理解する上で重要である。特に中性子過剰核でもある重い原子核領域は、近年研究が精力的に行われている領域の一つである。実験的には、理化学研究所の RI ビームファクトリーにおいて重い不安定原子核の生成が近年精力的に行われ、原子核構造の解析が積極的に行われている。また理論的には、様々な原子核構造模型を用いて研究がなされている。例えば核子の集団的な運動を取り扱う集団模型や、核中の核子の動きを平均化して取り扱う平均場模型による解析などがある。原子核はそれを構成する核子（中性子と陽子）の集団的な動きにより、様々な特徴的な構造や様相を示す。よってこれらの集団模型や平均場近似に基づいた模型を用いることにより、原子核の多くの性質を記述し、原子核構造の解析を行う事が出来る。

一方、原子核の性質をより詳細に記述するためには、核子の集団的な動きに加え、個々の核子の微視的な運動を考慮することも重要である。例えば奇核や奇奇核では、最後の核子の運動が原子核全体の運動を大きく左右することが知られており、これらの原子核の記述のためには個々の核子の動きを独立に取り扱うことが不可欠となる。

核子の微視的な動きを考慮した代表的な模型が殻模型である。殻模型では核子の独立粒子運動を完全に取り扱うことにより、遷移領域の偶偶核に見られるエネルギー準位の不規則なパターンや、記述の難しい奇核・奇奇核の構造まで微視的に記述することができ、集団模型や平均場模型を超えた解析を行う事が可能となる。しかし殻模型には、扱う粒子数が増えると計算に必要な次元が莫大になり数値計算が不可能になるという欠点がある。このため重い原子核では、殻模型を用いた本格的な解析はあまり行われてこなかった。特に質量数が 200 を超える領域において、閉殻（核子数が魔法数の原子核）から離れた原子核や、奇核・奇奇核を殻模型を用いて解析している例はほとんどない。また原子核の性質を真に理解するためには、個々の原子核を個別に解析するだけでなく、一つの統一されたフレームワークで、ある程度の幅広い領域の原子核を系統的に解析することが必要になるが、重い領域において統一されたフレームワークで、系統的な解析を行っている例はほとんどない。

殻模型を用いるにあたって、計算次元が莫大になり計算が不可能になるという問題を回避するため、我々は低励起状態に影響しないエネルギー的に高い状態をうまく排除し、計算に必要な次元を適切にカットすることにより、殻模型計算に必要な次元を減らす手法を確立した。この計算次元のカットオフを用いることにより、取扱いの難しい重い原子核領域でも大規模殻模型による解析を行うことが可能となった。

本研究の目的は、殻模型による系統的な解析がほとんど行われてこなかった  $^{208}\text{Pb}$ （中性子数 126、陽子数 82）周辺の原子核について大規模殻模型を用いて解析し、この領域の原子核の個々の構造および系統的な性質を明らかにすることである。本研究では、 $^{208}\text{Pb}$  をコアとした殻模型を用い、中性子数 126 以上、陽子数 82 以上の原子核（質量数 220 領域；23 核種）および中性子数 126 以下、陽子数 82 以下の原子核（質量数 200 領域；23 核種）の 2 つの質量数領域の計 46 核種に対して系統的解析を実施した。一粒子軌道として魔法数 82 から魔法数 126 の shell にある全 6 軌道 ( $0h_{9/2}$ ,  $1f_{7/2}$ ,  $0i_{13/2}$ ,  $2p_{3/2}$ ,  $1f_{5/2}$ ,  $2p_{1/2}$ ) および魔法数 126 以上の 7 軌道 ( $1g_{9/2}$ ,  $0i_{11/2}$ ,  $0j_{15/2}$ ,  $2d_{5/2}$ ,  $3s_{1/2}$ ,  $2g_{7/2}$ ,  $2d_{3/2}$ ) を用いた。原子核の相互作用として、現象論的に決められた、対相互作用 + 四重極相互作用 + 多重極相互作用を使用した。これらの二体相互作用の強さは、一つの質量数領域においてただ一つのパラメータセットに固定し、その強さは対象原子核のエネルギーレベルの実験値を系統的に再現するように決定した。

質量数 220 および 200 領域の Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Po, At, Rn, Fr アイソトープの偶偶核、奇核、奇奇核のエネルギーレベル、電磁遷移確率を系統的に計算し、実験結果との比較を行い、相互作用の妥当性を議論した。また個々の原子核において、特徴的な性質に対して解析を行い、実験で確認されていない状態については提言を与えた。さらにこの領域の原子核に多く存在する、原子核の励起状態にもかかわらず数ナノセカンド以上の半減期を持つ原子核のアイソマー状態について解析を行い、その出現機構を明らかにした。また、この領域で現象論的に八重極振動を扱うために、殻模型に八重極励起状態をあらわすボソンを導入した。この模型は非常に現象論的な模型であるが、 $^{208}\text{Pb}$  領域での八重極励起を良く記述できることがわかった。

第 2 のテーマとして、 $^{199}\text{Hg}$  のシッフモーメントの計算を行った。現在の宇宙は、宇宙初期において生成されたバリオンによって構成されており、反バリオンはほとんど存在しないことが知られている。そのようなバリオンと反バリオンの非対称性が実現するためには、バリオン数の破れに加えて素粒子の基本理論における CP 対称性の破れなどが必要である。電子や中性子、原子の電気双極子モーメントは CP 対称性が破れることで有限値を持つことができる物理量であり、それらを観測することができれば、CP 対称性がどのような機構でどのくらい破れているのかを知ることができる。 $^{199}\text{Hg}$  原子の電気双極子モーメントは、すべての粒子の中で現在までに最も精度よく測定されており、 $^{199}\text{Hg}$  原子核のシッフモーメントは、 $^{199}\text{Hg}$  原子の電気双極子モーメントに大きく寄与すると考えられる物理量である。この論文では殻模型によって  $^{199}\text{Hg}$  原子核の波動関数を用いし、シッフモーメントの計算を行った。これまでの  $^{199}\text{Hg}$  原子核のシッフモーメントの計算はすべて平均場近似によるものであり、本研究により配位混合を考慮した殻模型による計算が世界で初めて行われた。さらに、エネルギー準位や電磁モーメントなどを系統的に再現する有効相互作用を用いることで、有効相互作用の不定性によるシッフモーメントの精度を評価した。

本学位論文での最も有意義な研究は、いままで理論的にほとんど手つかずであった  $^{208}\text{Pb}$  周辺の偶々核、奇核、奇々核に対して殻模型計算を系統的に行い、エネルギー準位、電磁遷移およびモーメント等の実験値との詳細な比較検討を行ったことである。この領域では殻模型はその配位数の多さから、この研究以前には現実的な計算ができなかったが、重要な配位のみに制限する工夫により魔法数からの陽子数と中性子数がそれぞれ 5 粒子までの理論計算を行うことに成功した。魔法数からの中性子数が 7 粒子である  $^{199}\text{Hg}$  原子核についても、6 つの中性子軌道のうち 4 つだけを用いることで殻模型計算を行った。このとき、エネルギー準位や電磁モーメントの実験値をより良く再現するように有効相互作用の補正を行うことで、計算されたシッフモーメントの精度を評価した。

本論文の研究内容、および関連する研究内容は査読制度のある国際学術雑誌 8 編（プロシーディングス 4 編を含む）に掲載されている。また本人自身による国際会議での口頭発表が 5 件、ポスター発表が 4 件、また日本物理学会での口頭発表が 7 件ある。以上より、本論文は十分に学位論文に値すると判断し、学位論文審査委員会は全員一致で合格と判定した。