

# 論文審査の結果の要旨

氏名 内藤 智也

本論文は5章から構成される。第1章はイントロダクションであり、本論文のテーマである荷電スピンの定義が、原子核構造に関する説明とともに紹介される。荷電スピンは、陽子と中性子を同一粒子として扱い、各々を区別する物理量である。核力は荷電スピン対称性が近似的には保たれていることが知られている。しかし、実際にはクーロン力が存在するために、原子核全体の荷電スピン対称性は破れている。また、核力自身にも荷電スピン対称性を破る項が存在する。素粒子物理でのCKM行列のユニタリー性の検証実験や、有限密度原子核の性質を用いた天体中の元素合成に関する研究、中性子星などの無限系での核物質の状態方程式へ外挿する研究では、荷電スピン対称性の破れに起因する物理量の不定性を0.1 MeV程度に抑える必要があることが議論される。

第2章では、本研究に用いる理論的枠組みである密度汎関数理論について一般的な形式として電子系に関する内容を含む密度汎関数理論全般を紹介した後に、原子核密度汎関数理論に関する先行研究が紹介される。

第3章では、荷電スピン対称性を破るクーロン力を原子核密度汎関数理論に高精度で取り込む方法について議論されている。まず、物性物理における密度汎関数理論で広く使われている一般化密度勾配近似を用いることで、密度勾配の効果を取り込んだクーロン交換エネルギーを定式化した。その結果、エネルギー密度汎関数を用いた計算において、厳密なクーロン交換エネルギーを100 keV程度の誤差で計算することを可能にした。次に3つの補正項を評価した。一つは、核子の荷電分布である。これにより、例えば $^{208}\text{Pb}$ では、陽子、中性子の電荷分布の全エネルギーに対する効果それぞれ $-8.2\text{MeV}$ 、 $+1.2\text{MeV}$ であることを明らかにした。二つ目に、陽子間を媒介する光子が電子・陽電子対生成を行うことにより生じる効果である真空偏極が $^{208}\text{Pb}$ では、 $+3.7\text{MeV}$ に達することを示した。最後に、核子の電磁気力に由来するスピン軌道相互作用の効果を検討し、 $+0.06\text{MeV}$ 程度であることを評価した。

第4章では、高精度化したクーロン力とともに、アイソスピン非対称成分の核力を原子核密度汎関数理論に導入し、荷電スピン対称性の破れに関係し、実験で観測可能な物理量である、中性子スキン厚、鏡映核の質量差を計算した。核力の荷電スピン対称性を破る2成分、荷電対称性と荷電独立性の2種類について荷電対称性を破る核力の強度は、

これらすべての物理量に対して感度がある一方、荷電独立性を破る核力の強度は、 $N \neq Z$  核 ( $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{48}\text{Ni}$ ,  $^{208}\text{Pb}$ ) の中性子スキン厚のみに感度があることを明らかにした。さらに、従来の原子核密度汎関数理論でのクーロン力の取り扱いと本研究で提唱した取り扱いの違いによって生じるこれらの物理量の変化は、荷電独立性を破る項の寄与より大きいと同程度であることを明らかにした。また、核力の荷電スピン非対称項と、本研究での高精度なクーロン力の取り扱いを合わせることで、鏡映核の質量差の計算結果の、実験値に対する誤差を 0.3 MeV まで減らすことに成功した。さらに、真空中の核力を出発点とする計算手法 (ab initio 法) と組み合わせることで、荷電対称性を破る核力のエネルギー密度汎関数における強度を決定する手法を提案した。

第 5 章では、本論文の要旨と今後の展望を述べている。本研究では、研究の第 1 段階として、球形となる 2 重魔法数原子核に研究対象を絞ったが、殆どの原子核は変形しており、変形の効果を取り込む必要がある。今後は、ペアリングの効果を考慮できる Bogoliubov 変換を入れて変形した原子核まで適用範囲を広げる。また、本研究では基底状態の性質のみ議論したが、励起状態の波動関数を得るには、精確なクーロン力を基に有効相互作用を再フィットして定義しなおす必要がある。再定義した有効相互作用を用いることで、CKM 行列に対する荷電スピン対称性の破れの効果を議論できる。

尚、本論文第 3, 4 章は、明石遼介博士、Xavier Roca-Maza 博士、Gianluca Colo 博士、Haozhao Liang 博士、佐川弘幸博士との共同研究であるが、論文提出者が主体となって研究を進めたものであり、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士(理学)の学位を授与できると認める。