

論文の内容の要旨

On isospin symmetry breaking in nuclear density functional theory
(原子核密度汎関数理論におけるアイソスピン対称性の破れ)

氏名 内藤 智也

原子核は、陽子と中性子 (まとめて核子とよぶ) が核力とクーロン力により相互作用することで形成される。核子の多体問題である原子核の構造を計算する手法のひとつとして、原子核密度汎関数理論が知られている。本論文では、原子核密度汎関数理論におけるクーロン力の取り扱いの高精度化に取り組み、核力のアイソスピン非対称項とあわせ、原子核構造におけるアイソスピン対称性の破れに関して議論を行った。

陽子と中性子は、それらの電荷が異なることを除き、非常によく似た性質を持つことが知られている。そのため、これらを「核子」の異なる量子状態とみなすことが都合が良い場合がある。「核子」の異なる2状態としての陽子と中性子を弁別するために導入されたスピン様の物理量として「アイソスピン T 」があり、核子はアイソスピンの大きさが $1/2$ の粒子として記述される。合成アイソスピンが $T=1$ の2核子間に働く核力は、陽子・陽子間、陽子・中性子間、中性子・中性子間に関わらずほぼ同一であることが知られている。この事実を「核力のアイソスピン対称性」、特に、陽子・陽子間核力が中性子・中性子間核力と等しい事実を「荷電対称性」、陽子・中性子間核力が同一核子間の核力と等しい事実を「荷電独立性」とよぶ。核力のアイソスピン対称性が厳密になりたつ場合は、クーロン力が存在しないと仮定すると、原子核全体としてもアイソスピン対称性がなりたつ。しかしながら、クーロン力の存在、および、核力のアイソスピン対称性が僅かに破れている効果により、原子核全体としてはアイソスピン対称性が破れている。

例えば、鏡像核 (陽子数 Z , 中性子数 N の原子核と、陽子数 N , 中性子数 Z の原子核の組) の性質の違いは、アイソスピン対称性の破れと密接に関連している。鏡像核の質量差がクーロン力の寄与だけでは説明できない事実は Okamoto-Nohlen-Schiffer アノマリーとして50年以上研究されているだけでなく、近年の理化学研究所やミシガン州立大学における実験において鏡像核の形状や励起スペクトルの違いなども指摘されている。核力のアイソスピン対称性の破れは、素粒子の標準模型の検証、特に Cabibbo-Kobayashi-Maskawa 行列のユニタリ性にも関連しており、注目を浴びている。

しかしながら、ほぼすべての核種を計算可能な現時点で唯一の手法である原子核密度汎関数理論では、核子を点粒子として扱い、電荷の空間分布を無視しているだけでなく、クーロン交換エネルギーを局所密度近似を用いて計算するなど、精度良くクーロン力が取り扱われているとはいえない。また、核力のアイソスピン非対称項は、ほとんどの原子核密度汎関数理論には取り入れられてこなかった。

本論文では、まず、陽子を点電荷とみなす近似のもとでクーロン力の計算精度を向上させるため、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 0.1 MeV 程度の誤差で計算することを可能にした。その上で、電荷形状因子で記述される核子の電荷の空間分布をクーロンエネルギーに考慮した。その結果、陽子、中性子の電荷分布の全エネルギーに対する効果 (有限サイズ効果) が ^{40}Ca ではそれぞれ -1.8 MeV , $+0.2\text{ MeV}$, ^{208}Pb ではそれぞれ -8.2 MeV , $+1.2\text{ MeV}$ であることがわかった。さらに、陽子間における光子が電子・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も考慮した。この効果は、全エネルギーに対し、 ^{40}Ca , ^{208}Pb ではそれぞれ $+0.4\text{ MeV}$, $+3.7\text{ MeV}$ の寄与をすることがわかった。全エネルギー計算における目標精度は 0.1 MeV 程度であるため、これらの効果はすべて無視できない。また、核子の電磁気力に由来するスピン軌道相互作用の効果も調べた。この効果の大きさは、原子核の殻構造に強く依存するが、 ^{208}Pb の全エネルギーには $+0.06\text{ MeV}$ 、鏡像核の質量差には 0.3 MeV 程度の寄与をすることがわかった。また、クーロン力の高精度化の異なる方向性として、光速が有限であることによる補正項 (Breit 補正) の効果も検討したが、この効果は、真空偏極より小さいことが判明したため、以下では考慮していない。

その上で、Roca-Maza らの 2018 年の先行研究により提唱された、アイソスピン非対称成分を含む核力のエネルギー密度汎関数とともに、 ^{16}O , ^{40}Ca , ^{48}Ca , ^{48}Ni , ^{208}Pb の中性子スキン厚および、鏡像核 ^{48}Ca - ^{48}Ni の質量差について計算を行った。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}Ca , ^{48}Ni , ^{208}Pb) の中性子スキン厚のみに感度があることが判明した。さらに、既存のクーロン力の取り扱い (局所密度近似) 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が判明した。また、核力のアイソスピン非対称項と、本研究で提唱した高精度なクーロン力の取り扱いを合わせることで、鏡像核の質量差の計算結果の、実験値に対するずれを 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。

クーロン力、核力の荷電対称性を破る項、核力の荷電独立性を破る項という 3 種類の異なる起源をもつ相互作用により、原子核のアイソスピン対称性は破られる。本研究では、クーロン力の高精度化に取り組むことで、各成分がどの程度物理量に寄与するかを定量的に議論した。本研究では二重魔法核のみを議論したが、本手法をペアリングおよび変形を考慮した計算へ適用することで、その他の核種も計算が可能となり、アイソスピン対称性の破れに関する、より定量的な理解が可能になると思われる。

本論文は、Chapter 1 において、本研究の背景となる原子核構造とアイソスピン対称性の破れ、および本研究の目的を述べた。Chapter 2 において、本研究に用いる理論的枠組みである、電子系に関する内容を含む密度汎関数理論全般、原子核密度汎関数理論に関する先行研究を紹介した。Chapter 3 において、クーロン力の高精度化に関する研究がまとめてある。Chapter 4 において、高精度な取り扱いを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、上述した物理量に対して計算を行った。Chapter 5 では、本論文の要旨と今後の展望を述べた。