

相似繰り込み群法による原子核第一原理計算
Nuclear ab initio calculations with in-medium similarity
renormalization group

宮城 宇志

筑波大学計算科学研究センター

1. 研究目的

本プロジェクトの目的は、相似繰り込み群 (in-medium similarity renormalization group, IMSRG) 法を用いて、原子核の性質を第一原理的に理解し、未知の原子核や元素合成過程に対する信頼性の高い理論的予言を与えることである。近年発展してきたカイラル有効場理論 (ChEFT) と量子多体理論を組み合わせることで、計算結果の不定性を定量的に評価可能な第一原理原子核計算が実現しつつある。本研究では、ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊の核行列要素や、暗黒物質と原子核の散乱に現れる核構造因子の計算を通じて、標準模型を超える新物理の探索に理論的制約を与えることを目指す。また、中性子過剰核の結合エネルギーやベータ崩壊の寿命を精度良く計算することで、宇宙における元素合成過程の理解にも貢献する。IMSRG 法は、近似的なユニタリ変換により本質的に重要と思われる valence 軌道の自由度を分離し、実現不可能な大規模な量子多体問題を実現可能な計算へとマップする手法である。本プロジェクトでは、13 または 15 主殻の調和振動子基底で構築したハミルトニアンおよび各種演算子に IMSRG 法を適用し、重い原子核や中性子過剰核に対する第一原理計算を実行する。これらの計算には大規模並列計算が不可欠であり、スーパーコンピュータを活用して研究を推進する。

2. 研究成果の内容

本年度は、暗黒物質直接探索実験の解析に不可欠な原子核構造入力に焦点を当て、 ^{129}Xe に対する核構造因子の第一原理計算を完了した。Xe 同位体は主要な暗黒物質検出器で用いられており、信頼性の高い核構造因子の理論的決定は実験結果の解釈において極めて重要である。このような背景から、 ^{131}Xe に対する計算にも着手し、valence 空間の設定および IMSRG 変換の準備段階を完了した。また、本研究では第一原理計算により ^{48}Ca および ^{208}Pb の電荷密度を解析し、四次モーメントが電荷半径および中性子半径と強い相関を持つことを明らかにするとともに、中性子スキンとの相関は弱く、高精度電子散乱によるモデル非依存なスキン決定には限界があることを示した。これらの研究では、重い原子核における相関効果および演算子・核構造入力の一貫性が観測量に与える影響を定量的に示し、第一原理原子核計算の天体核物理および素粒子物理への応用可能性を大きく拡張する成果が得られた。

3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

本研究で必要とされる IMSRG 計算, 演算子行列要素の生成, および valence 空間での大規模対角化は, いずれも膨大な計算資源を要する. 学際共同利用プログラムによるスーパーコンピュータの利用がなければ, これらの計算は事実上実行不可能であり, 本プログラムは研究遂行にとって本質的に重要な役割を果たした. 特に, ^{129}Xe の構造因子計算および arXiv:2509.19131 に対応する研究では, 大規模並列計算を集中的に行う必要があり, 本プログラムによる計算資源提供が成果創出の決定的要因となった. 原子核理論と素粒子物理・宇宙物理を結びつける学際的研究を進める上で, 本プログラムの意義は極めて大きい.

4. 今後の展望

今後は, ^{131}Xe に対する IMSRG 計算を完遂し, 暗黒物質散乱に関する核構造因子を含む形で論文投稿・掲載を目指す. また, ベータ崩壊過程において重要となる禁制遷移の効果を第一原理的に評価し, 原子核弱相互作用の理解をさらに深化させる予定である. これらの研究を通じて, 実験研究と密接に連携した理論的予言を継続的に発信していきたい.

5. 成果発表

(1) 学術論文

C. Brase, T. Miyagi, J. Menéndez, and A. Schwenk, Phys. Rev. C **113**, 014317 (2026).

T. Miyagi, M. Heinz, and A. Schwenk, Phys. Lett. B **872**, 140032 (2026).

(2) 学会発表

国際会議を含む発表が 7 件

(3) その他

使用計算機	使用計算機に○	配分リソース※		
		当初配分	移行*	一般利用による追加
Pegasus	○	15952		5000
Miyabi-G				
Miyabi-C	○	6400	0	0
※配分リソースについてはノード時間積をご記入ください。 *バジェット移行を行った場合、「+2000」「-1000」のように記入				