

課題名（和文） 二体流行列要素の生成

課題名（英文） Generating matrix elements of two-body currents

宮城 宇志

筑波大学計算科学研究センター

1. 研究目的

核子を基本自由度とした原子核の第一原理計算による研究は急速に発展している。核子間相互作用を系統的に導出可能なカイラル有効場理論の発展、coupled-cluster 法や in-medium similarity renormalization group (IMSRG) 法等の系の大きさに対して多項式時間でスケールする量子多体問題の解法が積極的に使用された結果、近年では質量数 200 程度までの原子核の第一原理計算が実行され、周辺分野へのさらなる応用が期待される。特に電弱相互作用が媒介する原子核の過程を精密に理解することは素粒子物理学や天体核物理学分野等、原子核物理学分野を超えて大きな需要がある。原子核の第一原理計算ではその結果に伴う不定性の評価が可能であり、実験・観測が難しい過程については今後の展開を牽引していくことが予想される。しかしながら、高精度な計算実行やより堅実な不定性の評価のためには、従来用いられる 1 体流演算子に加えて、2 体流演算子の寄与を含めることが重要であろうことが明らかになりつつある。例えば、ガモフ・テラー型の β 崩壊や磁気双極子モーメントの実験値を再現するためには 2 体流演算子の効果を取り込むことが不可欠である。このことから現在実験・観測が実行もしくは計画されている暗黒物質・原子核散乱やニュートリノを放出しない 2 重 β 崩壊などについて、従来の計算に加えて 2 体流演算子を考慮することが強く求められている。2 体流演算子の表式については当該分野で標準的に用いられるカイラル有効場理論で導出されており、その応用が進められている。前述のガモフ・テラー型の β 崩壊や磁気双極子モーメントについてはその過程で移行する運動量（運動量移行）が 0 の極限で議論可能な物理量であり、より一般的な過程である有限の運動量移行が必要な場合と比べると極端な簡略化が可能である。この簡略化ができない応用、例えば、暗黒物質・原子核散乱の原子核構造因子などを精密に計算するためには有限の運動量移行の 2 体流演算子が必要である。

2. 研究成果の内容

本研究では、よく用いられる 1 体流演算子と同様、方法論的に最も容易と思われる多重極展開を 2 体流演算子について実装、高速化を行なった。カイラル有効展開の最低次で現れる 2 体電磁流演算子と 2 体軸性流演算子について、弾性散乱過程に寄与する成分についてそれぞれランク 1 の行列要素を 1~350 MeV までの適当な運動量移行に関して生成した。合計して 1TB 程度の行列要素となった。また、得られた 2 体電磁流演算子の磁氣的成分の

行列要素を用いて、 ^{48}Ca の基底状態から $1+$ 励起状態への遷移形状因子について、IMSRG による量子多体計算を行なった。これにより、軸性ベクトル型の 2 体演算子によってガモフ・テラー遷移強度が小さく抑えられるのに対して、ベクトル型の 2 体演算子は磁氣的遷移強度にほぼ影響を与えないことがわかった。ここで得られた結果は論文にまとめられ、*Physical Review C* にて査読が進行中である。

3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

本プロジェクトではスーパーコンピュータ *Cygnus* を用いた。1 ノードあたり 200GB 程度のメモリを備えていたことから、MPI 並列を利用せずに、OpenMP のみを用いた並列化を行なった。計算コードの高速化を経て、1 ノードで 12 ノード時間程度を使って 1 つの行列要素ファイルの生成が可能になった。最終的には、11 の演算子構造と 28 の運動量移行、合計 308 のジョブを並列的に投入することで目標を達成でき、*Cygnus* の利用は不可欠であった。

4. 今後の展望

本プロジェクトで得られた行列要素は将来的な応用について重要な役割を果たす。例えば、原子核を用いた暗黒物質の探索である。宇宙には、光と相互作用しない物質が存在することが観測によりほぼ確定している。弱く相互作用する重い粒子 (WIMP) は暗黒物質の候補として知られている。WIMP-原子核散乱の探索を通じて、その質量や結合定数の制限を得るためには、核形状因子の計算が必要となる。今後は基底状態スピンの $1/2$ の WIMP-原子核散乱の候補核である ^{19}F や ^{129}Xe について本プロジェクトで生成した 2 体軸性流演算子を用いた研究を進める。

5. 成果発表

(1) 学術論文

S. W. Bai, ..., T. Miyagi et al., arXiv: 2504.12001 (2025).

C. Brase, T. Miyagi, J. Menéndez, and A. Schwenk, arXiv:2504.08711 (2025).

H. Yu and T. Miyagi, arXiv:2503.01684 (2025).

(2) 学会発表

宮城宇志,” 2 体電弱カレント演算子の多重極展開”, 日本物理学会 2025 年春季大会, オンライン, 2025 年 3 月 18 日.

T. Miyagi, “Effect of two-body current on magnetic dipole moments”,

International Conferences on Shapes and Symmetries on Nuclei:

from Experiment to Theory SSNET, IJCLab, France, Nov. 7, 2024.

T. Miyagi, “Nuclear magnetic dipole moments from ab initio calculation”, 10th

International Conference on Quarks and Nuclear Physics, University of

Barcelona, Spain, July 8, 2024.

(3) その他

なし

使用計算機	使用計算機に ○	配分リソース*		
		当初配分	移行*	追加配分
Cygnus	○	4000		4000
Pegasus				
Wisteria/BDEC-01				
※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				