

有限振幅法を用いたニュートリノレス二重ベータ崩壊行列要素の評価

Evaluation of nuclear matrix element of neutrinoless double-beta decay using the proton-neutron finite-amplitude method

日野原 伸生

筑波大学計算科学研究センター

1. 研究目的

電子ニュートリノの有効質量をニュートリノレス二重ベータ崩壊の半減期から決定するために、崩壊原子核の遷移のしやすさを表す原子核行列要素の値を原子核構造理論から精密に計算し、ニュートリノの質量決定に貢献することが研究の目的である。原子核行列要素の値は原子核内の核子間有効相互作用、特に中性子-陽子間の相互作用に強く依存することがわかっている。半減期が測定されている、ニュートリノを2つ放出する二重ベータ崩壊($2\nu\beta\beta$)や二重電子捕獲($2\nu\text{ECEC}$)の原子核行列要素の情報を用いることで中性子-陽子間の相互作用の不定性を減らしつつ、 $0\nu\beta\beta$ の原子核行列要素の計算を行う。

2. 研究成果の内容

これまでに $2\nu\beta\beta$ や $2\nu\text{ECEC}$ 原子核行列要素の系統的な計算を中性子-陽子チャンネルの有限振幅法を用いて行った後に、 $0\nu\beta\beta$ の原子核行列要素計算に向けたコード開発を行っている。 $2\nu\beta\beta$ の二体崩壊演算子はスピンの3成分ごとに一体崩壊演算子の積として書けるため、一体演算子を用いた、始状態核および終状態核それぞれからの有限振幅法計算を2つ組み合わせることで1成分ごとの計算が容易であった。 $0\nu\beta\beta$ の崩壊演算子はニュートリノを中間状態に含むため複雑な形をしている。一体崩壊演算子の積で分解をするとニュートリノの運動量を変数として、また球面調和関数による展開のため大量の組み合わせが現れ、その数だけ有限振幅法計算を行う必要が出てくる。そのため有限振幅法による計算が必ずしも効率的ではないと考えられた。今年度は有限振幅法のエミュレータの開発を行い、これを用いることで $0\nu\beta\beta$ 原子核行列要素計算の大幅な効率化を示唆する結果を得た。有限振幅法の解は一体の外場演算子および、その振動を表す複素エネルギーの関数として表される、系の応答を表す振幅である。これら2つを入力変数として独立に有限振幅法の反復計算を行う必要があるため、外場の形や、複素エネルギー面での周回積分実行のために複素エネルギーを変えるたびに高計算コストの有限振幅法の反復計算が必要となる。低減基底法に基づくエミュレータでは、これらの入力変数の少数の組に対してのみ有限振幅法の計算を行い、それ以外の変数での解はすでに求めた解(基底)の重ね合わせで表現できると仮定し、その重み関数を低減基底空間での変分によって決定する。二重ベータ崩壊の原子核行列要素を含む原子核構造の諸問題では特定のエネルギー領域や特定の演算

子に関する遷移の情報が必要であることが多いため、そのエネルギー領域での有限振幅法の解を基底として用いることで、高精度のエミュレータの作成が可能となる。

^{24}Mg のオブレート変形状態での単極子アイソスカラー・アイソベクトルモードによる励起についてエミュレータのテスト計算を行った。巨大共鳴の強度分布関数を従来の計算よりも低コストで実行することに成功したほか、特に低励起状態に焦点を宛てた 10 点余りの基底を用いることで、励起エネルギーや遷移強度に関する計算精度を保ちつつ、従来の極の探索と極周りでの複素積分による計算と比べて二桁程度の効率化に成功した。 $0\nu\beta\beta$ の原子核行列要素計算で考慮すべき励起状態のエネルギー領域は限られており、また現れる一体演算子はニュートリノの運動量のような連続変数の関数となっていることから、少数の演算子を用いて構成したエミュレータで精度のよい近似解を高速に得ることができることが期待できる。

3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

縮約基底を構成する際に必要な有限振幅法の計算は大規模計算となり、学際共同利用プログラムの利用が重要な役割を果たしている。

4. 今後の展望

$0\nu\beta\beta$ 原子核行列要素の計算の他、 β 崩壊や低励起振動状態などの様々な励起モードの系統的な計算を行っていきたい。

5. 成果発表

(1) 学会発表

1. Nobuo Hinohara, “Reduced basis method for DFT linear response”, 2023 NUCLEI Collaboration Meeting, University of Tennessee, Knoxville, TN, USA, July 24 – 26, 2023.
2. Nobuo Hinohara, “Recent progress in the nuclear matrix element calculation using the finite-amplitude method for QRPA”, Theoretical and experimental approaches for nuclear matrix elements of double-beta decay, Research Center for Nuclear Physics, Osaka University, Ibaraki, Japan, December 21 – 22, 2023.
3. Nobuo Hinohara, “Nuclear matrix element for double-beta decay within density functional theory”, Unraveling the History of the Universe and Matter Evolution with Underground Physics (UGAP2024), Tohoku University, Sendai, Japan, March 4 – 6, 2024.
4. 日野原 伸生, Xilin Zhang, Jonathan Engel, 「有限振幅法のエミュレータ」, 日本物理学会 2024 年春季大会, オンライン, 2024 年 3 月 18 – 21 日.

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	○	1,000		0

筑波大学計算科学研究センター 2023 年度学際共同プログラム利用報告書

Pegasus				
Wisteria/BDEC-01	○	50,000		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			