

低次元化モデルによる原子核構造計算

Nuclear structure calculation using reduced-order modeling

日野原 伸生

筑波大学計算科学研究センター

1. 研究目的

準粒子乱雑位相近似 (Quasiparticle Random-Phase Approximation: QRPA) は密度汎関数理論を基礎として原子核の励起状態を記述する代表的手法の一つであり、巨大共鳴、低励起状態、ベータ崩壊など、原子核構造研究において幅広い応用を有している。QRPA 計算は 10 万~100 万次元に及ぶ大規模行列の固有値問題として定式化されるため、特に変形原子核のように空間対称性を用いた次元削減が困難な場合には、計算負荷が極めて大きくなる。

これまでに、外場が存在する状況下において、行列の直接対角化を行わず、線形方程式を反復的に解くことで QRPA の応答を求める有限振幅法(Finite Amplitude Method: FAM)が構築されてきた。さらに、複素エネルギー面における周回積分を用いることで、FAM により離散的な低励起状態を抽出することも可能である。しかしながら、この方法では積分経路の設定のために、外場のエネルギーを変更させた多数回の FAM 計算を通じて極の位置を推定する必要があり、計算効率の面で必ずしも最適とは言えない。

本研究ではパラメータ依存性を有する大次元固有値問題を低次元化する手法として広く用いられている縮約基底法(Reduced Basis Method: RBM)を有限振幅法と組み合わせることにより、QRPA 計算の計算コスト削減を目的とする。

2. 研究成果の内容

RBM を用いて低エネルギー励起状態および巨大共鳴に関する系統的な計算を実施した。具体的には、プロレート変形した Dy 同位体を対象として、低励起の形状振動モードである β 振動およびアイソスカラー巨大四重極共鳴を計算した。その結果、特に β 振動については、極の位置推定と周回積分を併用する従来手法と比較して、約 70 倍の計算速度向上を達成した。

さらに、荷電交換過程に関する全核種計算を実行した。本年度は、約 600 核種に及ぶ全球形核を対象として、アイソバリックアナログ状態およびガモフ・テラー巨大共鳴を RBM による計算し、巨大共鳴励起エネルギーの質量数およびアイソスピンに対する依存性を系統的に解析した。

3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

縮約基底の構成には、多数回の有限振幅法計算が必要であり、特に全核種計算を実行する場合には大規模計算資源が不可欠となる。そのため、本研究においては、学際共同利用プログラムの計算資源を活用することが重要な役割を果たした。

4. 今後の展望

本研究で開発した計算手法に関する論文は、近日中に投稿できる見込みである。今後は、解析が比較的容易である荷電交換過程やベータ崩壊に関する全核種計算にとどまらず、核分裂慣性質量や二重ベータ崩壊の原子核行列要素の評価など、様々な励起モードに対する系統的な計算へと展開していく予定である。

5. 成果発表

(1) 学会発表

1. 日野原 伸生, 「有限振幅法エミュレータとその応用」, TOMOE Progress Meeting, 京都大学理学研究科セミナーハウス, June 30-July 1, 2025.
2. Nobuo Hinohara, “Application of reduced-order emulator for nuclear linear response calculations,” Daegu Theory Workshop on Nuclear Structure, Reaction, and Astrophysics: NuSRAP2025 Theory, Daegu University, Gyeongsan, Korea, July 17-18, 2025.
3. 日野原 伸生, 「FAM エミュレータによる荷電交換過程の計算」, 日本物理学会第 80 回年次大会, 広島大学東広島キャンパス, September 16-19, 2025.
4. 日野原 伸生, 「線形応答エミュレータを用いた荷電交換過程の系統的計算」 日本物理学会 2026 年春季大会, オンライン, March 23-26, 2026.

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	○	2,800		
Miyabi-G	○	630		
Miyabi-C	○	1,260		
※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				