

# 自己無撞着平均場理論に基づく原子核の低励起モード及びその核子間相互作用との関係の研究

Study on low-excitation modes of nuclei and their linkage to nucleonic interaction based on self-consistent mean-field theory

中田 仁

千葉大学大学院理学研究院

## 1. 研究目的

自己無撞着平均場理論及び RPA (QRPA を含む) は、量子多体系の基底状態及び低励起状態を記述する上で標準的な理論であり、単一の有効 Hamiltonian またはエネルギー汎関数により核図表のほぼ全域を記述する能力を持つ。核子間相互作用に基づく微視的立場から原子核の基底状態及び低励起状態を総合的に理解するのに適し、さらには核物質の状態方程式を通じ中性子星の構造理解等にも繋がる。しかしその input である核子間有効相互作用に関する知見は十分とは言えず、今なお大いに検討の余地がある。我々は今まで、微視的相互作用に最小限の現象論的修正を加えた半微視的相互作用を用いた平均場計算により、原子核の基底状態の性質に対するテンソル力や 3 体 LS 力の影響等を調べ、一定の成果を挙げてきた。本 project はこれを低励起モードに拡張し、核構造論の精密化に繋げることを目的としたものである。近年、自己無撞着平均場理論に用いられている有効相互作用の多くが実は非物理的な不安定解を持つことが指摘されているのに対し、半微視的相互作用ではそのような不安定解が知られておらず、励起 mode への応用の意義・関心が増している。

## 2. 研究成果の内容

2015 年以来、Pb 核基底状態の荷電半径に見られる kink が 3 体 LS 力により矛盾なく理解できることを指摘し、Sn 核に対する予言も実証されたが、これらの核の kink について類似した結果を与える他の理論もあり競合関係にある。両者は安定領域及び中性子欠乏領域の Ca 核の荷電半径について異なる結果を与え、一長一短でいずれもその全体の説明に成功していない。この荷電半径の puzzle に対する手がかりを求め、2024 年度学際共同利用プログラムの下で Ca 及び O 核に対して HFB+QRPA 計算を実行したが、計算プログラムに誤りがあることが分かり、2025 年度に修正と再計算を行った。その結果、修正前の結果と定性的に異なることはなく、 $^{42,44}\text{Ca}$ ,  $^{18}\text{O}$  において

第 1 励起状態への E2 遷移確率の測定値が HFB+QRPA 計算の結果に比べて異常に大きいことが再確認された。荷電半径の異常との連関が強く疑われ、これらの核において荷電半径と E2 遷移確率を併せて扱うべきことが明らかになった。また、Ni 核でも HFB+QRPA 計算を実行して第 1 励起状態について調べ、殻構造から指摘されていた  $^{86}\text{Ni}$  の二重魔法性を示す結果を得ている。

### 3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

本研究では有限レンジ、特に湯川型を持つ半微視的有効相互作用を用いているため、現実的に QRPA 計算及び角運動量射影計算は並列計算によってのみ実行可能である。QRPA 計算では ScaLAPACK を利用した MPI での高速化、角運動量射影では OpenMP+MPI による hybrid 並列化を行っている。他方、相互作用行列要素を扱うため、個々の node において保持すべき memory も相当量である。学際共同利用はこれらの条件を満たす計算資源を提供しており、本研究 project の遂行に本質的である。

### 4. 今後の展望

Ni 核での HFB+QRPA 計算をさらに進め、第 1 励起エネルギーと E2 遷移確率について相互作用に対する依存性を確認し、Sn 核と併せて従来球形と考えられてきた核における変形の可能性、特にその系統性を調べる。異常な E2 遷移確率、ひいては荷電半径の問題の解決の糸口が得られることを期待し、さらには魔法数近傍の原子核の形状に関する新たな描像に繋がる可能性も視野に入れている。

また、Zr 核は殻構造と多体相関のバランスのため、中性子数により変形と球形の形状転移を繰り返すことが知られており、その記述は核構造理解の試金石の 1 つとさえ言ってもよい。半微視的相互作用を用いた HFB 計算により実験と概ね整合した形状転移が得られているが、HFB+QRPA と角運動量射影計算を併用して低励起状態の様相を調べ、形状変化の mechanism、それをもたらす核子間有効相互作用の理解や、実験データのない中性子過剰領域での構造の予言に繋げたい。N=82 近傍の中性子過剰領域は r 過程元素合成における waiting point になり得、その構造理解は元素合成の問題にも直結する。同様の計算を Sr 核についても行う。

### 5. 成果発表

#### (1) 学術論文

なし

#### (2) 学会発表

・ H. Nakada, "Deformability of neutron-deficient Sn nuclei studied with semi-realistic interaction", The 8th International Conference on Collective Motion in Nuclei under Extreme Conditions (COMEX8) (December 15–19, 2025);

Tallahassee, U. S. A.; 口頭発表)

(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*	一般利用による追加
Pegasus				
Miyabi-G				
Miyabi-C	○	4,800		
※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				