

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、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ている。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。他方で、Ca 核の荷電半径と四重極遷移の相関を示唆した研究もある。2024 年度学際共同利用プログラムの下で、この荷電半径の puzzle に対する手がかりを求めて、Ca 核、また併せて O 核に対して HFB+QRPA 計算を実行し、第 1 励起状態、特に E2 遷移確率を実験データと比較した。

Ca 核や O 核の基底状態は球形と考えられており、自己無撞着平均場計算でもほぼ

input に依ることなく球形解が得られる。この時、励起状態は球形解上の微小振動として QRPA によりよく記述できるはずである。しかし、 $^{42,44}\text{Ca}$ において第 1 励起状態への E2 遷移確率の測定値が HFB+QRPA 計算の結果より遥かに大きいことが分かった。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、 ^{18}O にも同様の問題があることを見出した。中性子欠乏 Sn 核での変形の影響（2022-23 年度成果）との類似性も示唆される。

3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

昨年度報告書でも述べた通り、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、QRPA 計算及び（2024 年度は実行していないが）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

O, Ca 核に加え Ni 核でも E2 遷移確率の HFB+QRPA 計算を実行し、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。それにより、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にのたため、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。

5. 成果発表

(1) 学術論文

なし

(2) 学会発表

なし

(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				
Pegasus				
Wisteria/BDEC-01	○	22,400		5,600
	※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			