

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も適している。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。その結果に立脚しまたそれを拡張して、原子核の低励起集団運動モード、特に四重極モードの微視的かつ総合的理解を図り、またそこに現れる核子間相互作用の影響を詳しく調べて、核構造論の精密化に繋げることを目的とする。そのため、次に述べる具体的な問題に対し、角運動量射影計算及び低励起モードに対する QRPA 計算を実行した。

偶々核の第 1 励起状態は通常 2^+ 状態であり、球形核では四重極振動による状態と考えられ、RPA や QRPA による記述が適している。よい球形核と見なされている Sn 同位体の 2^+ 励起モードでは、基底状態への遷移確率の実験データが通常の殻模型計算による予言 (主殻内ではほぼ左右対称な遷移強度が予言されている) と異なる中性子数依存性を示すことが明らかになっている。Sn 核の変形の可能性を示唆する先行研究もあるが、他方で核半径の中性子数依存性は変形なしに再現され、またテンソル力の影響を示唆する研究もある。我々は半微視的相互作用を用いた微視的計算により、この問題の解明を試みた。

変形核の第 1 励起状態は、基底状態と同じ平均場解から得られる”回転状態”と考えられ、角運動量射影によりこれを量子論的に取扱うことができる。この”回転”は、伝統的に剛体模型を基礎として議論されてきたが、微視的・量子力学的立場から見ると単純な運動学によるものではなく、核子間相互作用の影響を受ける。角運動量射影計算により、この回転状態に対する核子間相互作用の影響を調べた。

2. 研究成果の内容

半微視的相互作用を用いた平均場計算に立脚して、Sn 同位体の第 1 励起 2^+ 状態、その励起エネルギー及び基底状態への遷移強度を、特に中性子数依存性に注目しながら球対称 HFB+QRPA 計算による微視的かつ自己無撞着な立場から調べた。このような全核子を扱うアプローチでは芯偏極の効果も自然に取り込まれ、殻模型計算に比べ有効電荷というパラメータを外から付加する必要がないことが大きな利点である。その結果、 $N=62-80$ では新たなパラメータを全く導入することなく 2^+ 状態のエネルギー、 $E2$ 遷移強度の両方が自然に再現された。しかし、 $N=56-60$ では殻模型計算と逆に $E2$ 遷移強度を過大評価する結果となった。 $N=58$ では球形 HFB 解が不安定になることも分かった。 $N=56-60$ 領域ではフェルミ準位近傍の 1 中性子軌道の縮退が見られ有効ハミルトニアンの詳細に敏感である可能性が考えられるので、 $E2$ 遷移強度の過大評価の問題が有効ハミルトニアンの fine tuning に帰着し得るかどうかを探るため、関与する 1 粒子軌道のエネルギー、及び pairing の強度を変えた HFB+QRPA 計算も試みた。しかし、それらを調整して 2^+ 状態の性質を改善すると他の物理量と整合しない。また、軸対称 HFB 計算により変形の可能性も調べたが、 $N=58$ では確かに変形解が得られる

ものの E2 遷移の実験データを再現するには弱すぎる。これらを総合すると、N=56-60 の Sn 核の基底状態が、球形状態と変形状態の重ね合わせであることが示唆される。Sn をよい球形核とする従来の常識を覆す結果となった。

変形核の回転状態については、角運動量射影計算コードの並列化により計算を高速化し、Mg 核及び Zr 核で幾つかの計算を進めた。まとまった物理学的な成果を得るには、今後のさらなる計算を待つ。

3. 学際共同利用が果たした役割と意義

本研究は学際共同利用により初めて実現可能となった研究であり、またちょうどそれに適した研究である。数十ノードを用いた計算が不可欠かつ非常に有効で、これにより、微視的立場からの核構造研究に一定の道筋と寄与が得られたと言えよう。

RPA 計算コードは、特に QRPA 計算に用いた場合、単一ノードのワークステーションでは収束性を十分に調べることもさへ困難であった。Sn 同位体に対する系統的計算は OFP を用いることで実行可能になったものである。並列化効率もよく、少なくとも 40 ノードまで速度向上率が線形性を保つ。

角運動量射影計算も、Zr 以上では並列化なしには実行が現実的でない一方、主要部分である角度積分ではほぼ線形に高速化し、これも並列計算に適した数値計算である。ノード内並列化の併用（即ちハイブリッド並列）で一層の効率化が達成されている。

4. 今後の展望

Sn 同位体では、拘束条件付 HFB 計算を実行してエネルギーの形状依存性をより詳しく調べ、球形状態と変形状態の混合の様相に迫りたい。

変形状態の回転については、角運動量射影計算をさらに進める。特に Nd-Sm 領域でも計算を行った上で、Mg, Zr 核の結果と総合して原子核の”回転”に対する核子間相互作用の影響、またそれが質量数によりどう変化するかを調べ、微視的立場から原子核の”回転”に関する描像を再構築したい。

5. 成果発表

(1) 学術論文

なし

(2) 学会発表

- ・大村優里佳, 高橋眞輝, 中田仁, ”半微視的相互作用を用いた $^{100-132}\text{Sn}$ の B(E2) の研究”, 日本物理学会第 76 回年次大会 (2021 年 3 月 12-15 日, オンライン)
- ・阿部光平, 中田仁, ”微視的立場による原子核の回転バンドの起源の研究”, 日本物理学会第 76 回年次大会 (2021 年 3 月 12-15 日, オンライン)

(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	追加配分
Cygnus			
Oakforest-PACS	○	30000	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。