

中重核領域の原子核構造の殻模型による統一的な記述

Unified description of nuclear structure in medium-heavy-mass region by shell-model calculations

清水 則孝

東京大学大学院理学系研究科 附属原子核科学研究センター

1. 研究目的

質量数 130 近傍の核種に現れるエキゾチックな原子核構造を、大規模殻模型計算により解明することを目的とする。例えばセシウム 128 はカイラル二重項バンドの候補として知られており、重点的に研究を進めている。並行して殻模型計算手法の改良、大規模並列計算へむけたコード開発をおこなう。

2. 研究成果の内容

具体的には、陽子・中性子ともにスズ 100 の芯を仮定し、陽子数・中性子数ともに 50-82 の間の一粒子軌道(0g7/2, 1d5/2, 1d3/2, 0s1/2, 0h11/2)をすべて模型空間とし、模型空間内で許されるすべての配位の多体相関を取り込んだ殻模型計算をおこなう。この質量領域は、三軸非対称に変形する状態と球形の状態が競合しているため、アイソスピン変化にともなう形の遷移や「形の共存現象」など、多様な核構造が現れる。この中でも特にカイラル二重項の存在が議論されており興味を持たれている。これは、非軸対称変形状態に、右手系の角運動量組み合わせと左手系の角運動量組み合わせの二つの区別された状態、つまりカイラリティが現れ、2重項のバンドを構成するという理論による解釈である。セシウム 128 はこのカイラル二重項バンドが現れる有力な候補と考えられている。しかしながら、バンドと言うよりはカイラル振動モードではないかという指摘もなされており、これまでの理論研究では模型的な制限が強い計算しかなされておらず、議論の対象となっていた。128 セシウムやその近傍核の大規模殻模型計算によって、カイラル二重項を始めとするエキゾチックな核構造の計算をおこなった。

図 1 にセシウム 128 の準位構造の計算結果を示している。これに相当する実験値は載せていないがある程度知られており、計算結果は実験値をよく再現している。同じスピン・パリティの状態が、近い励起エネルギーにペアとなって現れており、カイラル二重項バンドの特徴を示している。大規模計算によって得られた波動関数の解析を進めており、現在論文準備中である。

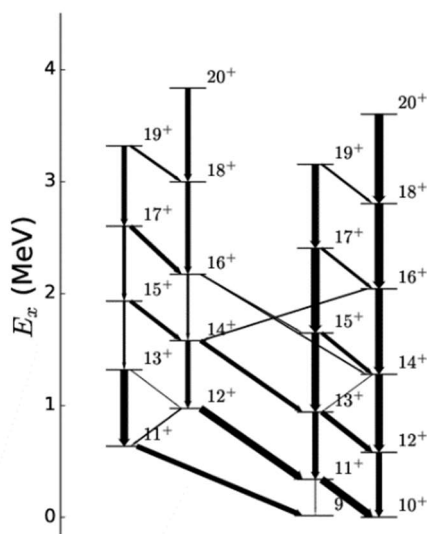


図1： セシウム128の準位構造の殻模型計算結果。縦軸：励起エネルギー、横棒は準位を表し、添えている数字と符号は各準位のスピンのとパリティをあらわしている。矢印とその幅は、E2遷移確率とその強さをあらわしている。

これらの研究をもとに、加速器実験グループとの共同研究を進めた。とくにランタン135には、励起エネルギー2738keVにアイソマーと呼ばれる比較的寿命が長い状態があり、状態の詳細は不明であったが、最新の実験結果と理論計算

をつきあわせて検討することにより、スピン・パリティは $23/2+$ 、この状態は中性子が $0h11/2$ 一粒子軌道に2ホールを占める配位が主であることを明らかにし、学術論文[2]に発表した。

並行して、大規模並列計算用の殻模型計算コード「KSHELL」の開発を進めた。殻模型計算では、大規模疎行列の固有値問題を解くことになる。解くべき行列の行列要素は、行列要素数が極めて多数となってメモリー上に保存できないため、事前には用意せず必要な時にオンザフライで生成する方式をとる。そのため、行列要素生成のオーバーヘッドがボトルネックとなる。これを抑えるために、**Thick-restart block Lanczos method** の採用を提案、有効性を示し、論文投稿中である。

3. 学際共同利用として実施した意義

上記セシウム128の原子核構造の計算には、760億次元もの巨大な行列の固有値問題を数値的に解く必要があり、学際共同利用としてスーパーコンピュータ Oakforest-PACS を用いなければ実行不可能な課題であった。また、大規模殻模型計算コード KSHELL の開発にもスーパーコンピュータ環境は必須である。そこで用いられる数値解法の探求は、原子核物理・数理科学との学際的な研究成果である。

4. 今後の展望

セシウム128のカイラル二重項バンドの研究については論文準備中である。さらに質量数130近傍の核種には、他のカイラル二重項バンドの候補や高スピンアイソマーなどが知られており、本成果に基づいたより系統的な研究を計画している。

5. 成果発表

(1) 学術論文

- [1] N. Shimizu, T. Mizusaki, Y. Utsuno and Y. Tsunoda, “Thick-restart block Lanczos method for large-scale shell-model calculations”, *Comp. Phys. Comm.* 投稿中 <https://arxiv.org/abs/1902.02064>
- [2] Md. S. R. Laskar *et al.*, “g-factor measurement of the 2738 keV isomer in ¹³⁵La”, *Physical Review C* **99**, 014308 (2019).

(2) 学会発表

- [1] N. Shimizu, “Large-scale shell model calculations and chiral doublet of ¹²⁸Cs”, International Conference, “Nuclear Theory in the Supercomputing Era 2018 (NTSE-2018)”, 2018/10/29-2018/11/2, 韓国・太田
- [2] N. Shimizu, “Shell-model study in A~130 nuclei and chiral doublet of ¹²⁸Cs”, The 9th international workshop “Quantum Phase Transitions in Nuclei and Many-body Systems”, 2018/5/22-2018/5/25, イタリア・パドヴァ

(3) その他

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
COMA		0	0
Oakforest-PACS	○	170200	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。