

原子核殻模型計算による質量数 130 領域核の高スピン状態の理論的解明

Investigation of high-spin states of A~130 nuclei by nuclear 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

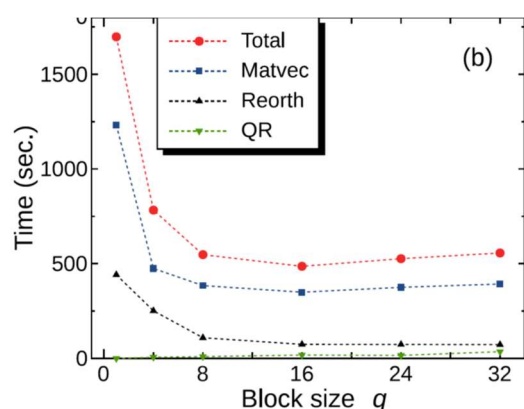
大規模殻模型計算により、質量数 130 近傍の核種に現れるエキゾチックな原子核構造を系統的に解明することを目的とする。

陽子数が 50 を超え、中性子数が 82 より小さい領域の原子核は、イントルーダー軌道と呼ばれる $0h_{11/2}$ 一粒子軌道が特別な役割を果たし、エキゾチックな構造が現れることが期待される。本研究では、殻模型計算によって多体相関を取り込んだ上で高い予言能力をもつ理論枠組みを実現し、多様な原子核構造を統一的に記述、それらが現れるメカニズムを解明することである。この質量領域の原子核殻模型計算では、100 億次元を超えるような大次元のハミルトニアン行列の固有値問題を解く必要があるため、大規模並列計算機向けコード開発や固有値問題ソルバーの探求を並行しておこなう。

これらの研究の進展は、ニュートリノレス二重ベータ崩壊や永久電気双極子能率探索実験で必要となる対象核の微視的計算の精度向上につながると期待される。

2. 研究成果の内容

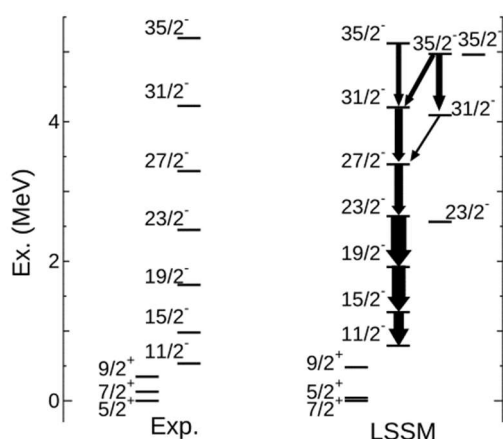
大規模並列計算機用の殻模型計算コード「KSHELL」の開発を進めた。Thick-restart block Lanczos method の実装と論文発表をおこなった。旧来の殻模型計算コードでは、ハミルトニアン行列の固有値問題を解くために Thick-restart Lanczos method を採用することが多い。本研究では、Block Lanczos method を導入することにより高速化を試みた。これによって、Lanczos 法のアルゴリズムに現れるベクトル・行列積部分の計算時間を短縮し、場合によっては 7 倍を超える計算の高速化に成功した。



左図：Thick-restart block Lanczos method の性能評価。学術論本[2]より。

クロム 48 原子核（模型空間 pf-shell）において 128 状態の固有エネルギーを求めるために必要な計算時間を実測した (Total)。ブロックサイズ 1 が通常の Lanczos 法に相当する。ブロックサイズを 16 にとることにより、通常の Lanczos 法に比して 3 倍強の高速化を達成している。

この KSHELL コードを用いて、質量数 130 近傍の原子核の殻模型計算を進め、特にランタン 133 の 11/2-アイソマー状態について最新の実験研究と比較検討し、バリウム 132 の 0+状態と、陽子が 0h11/2 軌道を占有している状態が結合してアイソマー状態となっていることを示した。さらに、セシウム 132 のカイラル二重項バンドの核構造解明を進めた。



左図：ランタン 133 の励起準位。縦軸が励起エネルギーを表す。Exp: 実験値、LSSM: 本研究で得られた殻模型計算結果。学术论文[1]より。矢印の幅は E2 遷移確率の大きさを示している。殻模型計算結果が実験値をよく再現している。Ex=0.535MeV の 11/2-状態がアイソマーとなる。

3. 学際共同利用が果たした役割と意義

学際共同利用が提供している Oakforest-PACS を効率的に活用し、100 億次元を超えるような大次元のハミルトニアン行列のエネルギー固有値を求めることが可能となった。大規模並列計算機向けの殻模型計算コードの開発にも、Oakforest-PACS の利用は必要不可欠な役割を果たした。これにより、殻模型計算による微視的研究が中重核領域で可能となり、アイソマー状態などの多様な核構造が明らかになりつつある。また、開発された殻模型計算コードは公開され、原子核研究コミュニティに広く使われることにより、原子核物理全体の発展に寄与している。

4. 今後の展望

殻模型計算コードに block Lanczos method を導入することにより高速化を果たした。今後は、さらなるコードの機能拡充をおこなう。これを用いて、中重核領域の殻模型計算用有効相互作用の開発、改良を進めている。これらの成果は、原子核シッフモーメントやニュートリノレス二重ベータ崩壊核行列要素の評価の高精度化につながり、素粒子標準模型を超える新物理探索実験に寄与することが期待される。(学会発表[1])

5. 成果発表

(1) 学术论文

[1] “Structure of the 11/2- isomeric state in 133La”, Md. S. R. Laskar, R. Palit, S. N. Mishra, N. Shimizu, Y. Utsuno, E. Ideguchi, U. Garg, S. Biswas, F. S. Babra, R. Gala, C. S. Palshetkar, and Z. Naik, Phys. Rev. C 101, 034315

(2020)

- [2] “Thick-restart block Lanczos method in nuclear shell-model calculations”, N. Shimizu, T. Mizusaki, Y. Utsuno and Y. Tsunoda, *Comput. Phys. Comm.* 244, 372 (2019)
- [3] “Isomer spectroscopy in ^{133}Ba and high-spin structure of ^{134}Ba ”, L. Kaya *et al.*, *Phys. Rev. C* 100, 024323 (2019).

(2) 学会発表

- [1] 「現実的有効相互作用を用いた殻模型によるシッフモーメントの評価」、清水則孝（東大 CNS）、柳瀬宏太（東大 CNS）、日本物理学会 2019 年秋の分科会、山形大学、2019 年 9 月 18 日
- [2] 「原子核殻模型計算と多様な変形バンド」、清水則孝（東大 CNS）、シミュレーションによる宇宙の基本法則と進化の解明に向けて（QUCS 2019）、京都大学基礎物理学研究所、2019 年 12 月 19 日

(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
Cygnus			
Oakforest-PACS	○	225,000	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。			