

課題名（和文） 殻模型計算による中重核領域における原子核集団運動状態の微視的記述

課題名（英文） Microscopic description of the collective motion of medium-heavy nuclei based on shell-model calculations

清水 則孝

筑波大学計算科学研究センター

1. 研究目的

大規模殻模型計算にもとづく大規模量子多体計算により、量子多体系である原子核の構造の解明を進める。中重核領域では芯を仮定した殻模型計算・HFB+GCM 法により現象論的要素を持つ有効相互作用を構築し、四重極集団運動の微視的記述をおこなう。軽い核では、芯を仮定しない殻模型計算により第一原理的な核構造の記述をおこなう。これらの成果をもとに、世界中の加速器施設で精力的におこなわれている最新の実験研究活動と連携して核構造を解明するとともに、学際的な応用に重要な核データの理論的創出を目指す。

2. 研究成果の内容

中重核領域の原子核において、主殻内だけでなく下の殻（芯）からの励起、および上の殻への励起を取り扱うため PMMU 相互作用を用いた HFB+GCM 計算による核構造の研究を進めてきた。スズ同位体は魔法数 $Z=50$ の球形核と考えられるが、上記の集団励起は、球形状態の中に強く変形した励起状態として出現し、変形共存することを微視的計算から示した（論文執筆中）。さらに、これらの集団励起により、PMMU 模型と IBM（相互作用するボゾン模型）の関係を議論した（論文執筆中）。また、英国実験グループによるストロンチウム 80 の四重極モーメント、およびルーマニア実験グループによるテルル 116 の E2 遷移確率の理論的解析を行った（論文投稿中）。

また、原子核殻模型計算手法のひとつであるモンテカルロ殻模型コードの開発を進め、PEGASUS、Miyabi-G スーパーコンピューターでの GPGPU を用いたプロダクションランを可能とした。芯を仮定しないモンテカルロ殻模型に、「自然軌道」と呼ばれる配位混合計算に効率的な一粒子波動関数を導入した。この手法を用いて酸素 16 原子核を例に計算をおこない、第一原理計算としてのベンチマークをおこなった。模型空間を広げていく際のエネルギーの収束性を議論し、方法の有用性を示した（口頭発表[1]）。

並行して、ランチョス法による殻模型直接対角化計算により、中性子数 126 同中性子体のベータ崩壊（文献[1]）や、水銀同位体（文献[3]）や鉛近傍核のベータ崩壊（文献[4]）について理論研究を進めた。また、実験グループとの共同研究に基づき、マグネシウム 36 のアイソマー状態についての理論解析（文献[2]）、スズ同位体の荷電半径の解析（文献[5]）をおこなった。

3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

原子核殻模型計算では、多様な相関を取り込んだ複雑な波動関数を表現する必要がある。特にモンテカルロ殻模型法や HFB+GCM 法に現れる角運動量射影では、あらゆる方向のオイラー角へと回転した波動関数のかさねあわせで原子核の状態を表現するため、大きな計算機資源を要求する。学際共同利用が提供する Wisteria-O と、PEGASUS が持つ GPGPU の性能を活用することによって、この重ね合わせ計算を可能とした。

4. 今後の展望

中重核の様々な領域に存在する変形共存の微視的構造を明らかにするために、PMMU 相互作用を用いた HFB+GCM 計算を進める。一方で、変形共存する球形核から核子数が少し変化するだけで、急激に変形する領域が存在している。これは、球形状態と変形状態の逆転による現象と考えられる。今後、このような逆転現象と変形共存の系統的な理論研究を行っていく。

軽い核の芯を仮定しないモンテカルロ殻模型計算については、本研究成果に基づいて、質量数 16 までの p 殻核の系統的計算を進めるとともに、エネルギー以外の物理量についても収束性の検討をすすめ、第一原理計算としての方法論の確立をめざす。

5. 成果発表

(1) 学術論文

- [1] A. Kumar, N. Shimizu, Y. Utsuno, C. Yuan and P. C. Srivastava, Phys. Rev. C 109, 064319 (2024)
- [2] M. Madurga, J.M. Christie, Z. Xu, R. Grzywacz, A. Poves, T. King, A. Chester, J. Farr, I. Fletcher, J. Heideman, D. Hoskins, A. Laminack, S. Liddick, S. Neupane, S. Peng, A.L. Richard, N. Shimizu, K.L. Siegl, Y. Utsuno, P. Wagenknecht, and R. Yokoyama, Phys. Rev. C 109, L061301 (2024).
- [3] S. Sahoo, P. C. Srivastava, N. Shimizu, and Y. Utsuno, Phys. Rev. C 110, 024306 (2024).

[4] S. Sharma, P. C. Srivastava, A. Kumar, T. Suzuki, C. Yuan, and N. Shimizu, Phys. Rev. C 110 024320 (2024)

[5] M. Door, Chih-Han Yeh, M. Heinz, F. Kirk, C. Lyu, T. Miyagi, J. C. Berengut, K. Blaum, L. S. Dreissen, S. Eliseev, P. Filianin, M. Filzinger, E. Fuchs, H. A. FFurst, Z. Harman, J. Herkenhoff, N. Huntemann, C. H. Keitel, K. Kromer, D. Lange, A. Rischka, C. Schweiger, A. Schwenk, N. Shimizu, and T. E. Mehlstaubler, Phys. Rev. Lett. 134, 063002 (2025).

(2) 学会発表

[1] 清水則孝、宮城宇志、Anil Kumar、「芯を仮定しないモンテカルロ殻模型における自然軌道の導入」日本物理学会 2025 年春の分科会、2025/3/19

(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	移行*	追加配分
Cygnus				
Pegasus	○	18,000		18,000
Wisteria/BDEC-01	○	144,000		36,000
	※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			