

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よって、量子多体系である原子核の構造の解明をおこなう。特に中重核領域の原子核の構造と集団運動状態を微視的に記述し、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中性子過剰核のエキゾチックな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。

具体的には、原子核殻模型計算コードの開発、計算手法の開発をすすめ、スパコンの効率的利用を可能としている。これにより、実験研究と連携して中重核の四重極集団運動とその遷移の微視的な議論を進める。学際的な応用として、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計算をおこなっている。これまでの MCRP プログラムでは、主に HFB+GCM 法の開発と、PMMU 相互作用を用いた四重極集団運動の微視的解明、Quasi SU(3) coupling の役割を議論してきた。

2. 研究成果の内容

質量数 200 近傍領域の原子核において、PMMU 相互作用を用いた HFB+GCM 計算による核構造研究を進め、0h11/2, 1f7/2 軌道対と 0i13/2, 1g9/2 軌道対の Quasi SU(3) 機構の役割を調べた。特に、質量数 188 – 208 のポロニウム(Po)同位体および隣のビスマス(Bi)およびアスタチン(At)同位体の計算を行った。PMMU 相互作用により Po 同位体を系統的に極めて良く再現できることがわかった。特に、中性子数が 114 から 104 に向かって減少するに伴い、励起エネルギーの急激な低下や E2 電磁遷移の増加を、Quasi SU(3)機構により説明でき、中性子数 112 近傍における第 1 励起 0+状態の急激な低下は、陽子 0h9/2 軌道と中性子 0i13/2 軌道間のモノポール相互作用によって理解できる。また、Bi および At 同位体の四重極モーメント、磁気能率についても実験値が極めて良く再現できることを確かめた。最近の実験で報告された 188Bi (中性子数 105) における急激な変形の増加は、上記モノポール相互作用によって説明できることも明らかになった。同様の現象は、中性子数 100 – 105 の水銀同位体でも報告されており、共通のメカニズムによるものと考えられる。また、134Ba において、PMMU 模型に基づく HFB+GCM 計算結果は、相互作用するボゾン模型 (IBM) の臨

界点对称性  $E(5)$  を良く再現していることが明らかになった。

並行して、カドミウム同位体や水銀同位体について、1 主殻を模型空間とした直接対角化法による殻模型計算を進め、特にカドミウム同位体の奇核における  $11/2^-$  状態の構造について議論した。旧来の解釈では球形に近い形状 + セニオリティが良い近似を与えると考えられてきたが、殻模型計算による波動関数を検証することにより、プロレート変形回転核の描像が適切であることを示した[1]。アルゴン 40 原子核のニュートリノ核反応断面積の計算をおこなった。

Pegasus では、モンテカルロ殻模型コードのボトルネック部分（角運動量射影後ハミルトニアン行列要素の計算箇所）の GPGPU 対応をおこなった。OpenACC + CuBLAS を用いて実装し、CPU の計算時間に比して、最大で 9.3 倍の高速化を達成した。

### 3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

我々のグループは大規模殻模型計算を効率的に遂行するために、殻模型直接対角化用 KSHELL コード、HFB+GCM コードなど並列計算に最適化したコードの開発・維持をおこなっている。学際共同利用プログラムによって提供された計算機資源の利用によって、これらのコードが大きな威力を発揮した。

### 4. 今後の展望

2023 年度中に研究を進めた質量数 200 希近傍領域の核構造と Quasi  $SU(3)$  機構の役割について論文執筆を進める。さらに模型空間を拡張し、変形の強いより重い核への適用を試みることを計画している。一方で、 $^{134}\text{Ba}$  において PMMU 模型に基づく微視的理論と IBM との関係を調べていく。

また、モンテカルロ殻模型コードの GPGPU 対応は有望な結果を示している。今後対応を完了させ、Pegasus 上でのプロダクションランをおこないたい。

### 5. 成果発表

#### (1) 学術論文

[1] D. Patel, P. C. Srivastava, N. Shimizu, and Y. Utsuno, Phys. Rev. C 109, 041617 (2024).

[2] T. Suzuki and N. Shimizu, Phys. Rev. C 108, 014611 (2023).

[3] D. Patel, P. C. Srivastava, and N. Shimizu, Nucl. Phys. A 1039, 122724 (2023).

[4] K. Yanase, N. Shimizu, K. Higashiyama, and N. Yoshinaga, Phys. Lett. B 841, 137897 (2023).

#### (2) 学会発表

(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	○	200,000	
Wisteria/BDEC-01	○	40,000	
※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。			