

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

Microscopic description of the collective motions of medium-heavy nuclei based on 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

大規模殻模型計算を発展させ、それを用いて質量数 80 から 150 程度の中重核領域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した。

原子核殻模型計算は、原子核の構造、特に低励起スペクトルを微視的・詳細に記述する有力な手法であるが、実際の数値計算には、対角化すべきハミルトニアン行列の次元が莫大になって中重核に適用する際に困難が生じる。本研究では、この問題を克服するために粒子数射影後変分ハートリーフォックボゴリウボフ(HFB)法と生成座標(GCM)法と変分後角運動量・パリティ射影を組み合わせた手法を開発し(以下、HFB+GCM 法と呼ぶ)、殻模型計算の適用範囲を広げた。

これら原子核構造の理論模型の向上は、元素合成過程の解明や、ニュートリノ粒子の性質解明に向けてのニュートリノレス二重ベータ崩壊実験に必要な核行列要素の評価、さらに永久電気双極子能率探索実験における対象核種のシッフモーメントの計算など、多様な学際的な応用にも貢献することが期待される。

2. 研究成果の内容

HFB+GCM 法を提唱し、計算コード開発とチューニング作業を進め、偶々核を取り扱うコードは完成した。ベンチマークテストをおこない、厳密対角化計算の結果を良く再現することを確認した。この成果を論文にまとめ、学術論文として投稿した。また、この手法の開発はさらなる高精度な近似法である「粒子数射影・角運動量射影・重ね合わせ後の変分法」という新しい展開につながった。(学術論文[3])

HFB+GCM 法を用いて、質量数 130 前後の中重核、特に Sn,Te,Xe,Ba,Ce,Nd の偶々核同位体について、系統的な核構造計算をおこなった。殻模型有効相互作用には、PMMU 相互作用を用いた。これらの多数の核種において、実験値の 2^+ 、 4^+ 励起エネルギーと E2 遷移確率を理論計算で再現し、統一的に記述することに成功した。特にスズ同位体については、 ^{100}Sn 近傍の陽子過剰側の同位体において、陽子 $0g_{9/2}$ 軌道から $1d_{5/2}$ 軌道への励起の寄与を評価することが E2 遷移確率の記述に必要なことを示した。また、ネオジウム同

位体に関して、中性子数を 82 から 68 に減らしていくと、球形から非軸対称変形へ、さらにプロレート変形に遷移していく形の変化の統一的記述をおこなった。従来の 1 主殻 ($50 < N, Z < 82$) のみを模型空間にとった殻模型計算では不十分であり、1 主殻では含まれていなかった $1f7/2$ 一粒子軌道がこれらの記述に必要な不可欠であることが明らかになった。 $1f7/2$ 軌道は $0h11/2$ 軌道との軌道角運動量の差が 2, 全角運動量の差も 2 であり、これらの一粒子軌道対は、四重極集団励起を強く促進することが知られている。(Quasi-SU(3) Coupling と呼ばれている。) 本研究では、この Quasi-SU(3) Coupling が中重核の中性子数変化に伴う形の変化に重要な役割を果たすことを示し、これらの成果をまとめて学術論文 [1] に発表した。

並行して、1 主殻模型空間ではあるが、現実的有効相互作用を用いた直接対角化法による殻模型計算を遂行し、キセノン 129 と水銀 199 のシッフモーメントを求め、学術論文 [2] に出版した。さらに、最新の重イオン加速器実験結果と我々の理論模型による計算結果の比較・検討を進め、実験グループとの共著を学術論文 [4,5] に出版した。

3. 学際共同利用が果たした役割と意義

原子核殻模型計算は、100 億次元を超えるようなハミルトニアン行列の固有値問題を解く大規模なものであり、その近似手法である HFB+GCM 法にあっても、広範囲の原子核を系統的に記述するためには大きな計算機資源を要求する。Oakforest-PACS の利用によって、中重核構造の系統的計算をはじめて可能としたものであり、学際共同利用は不可欠な役割を果たした。

4. 今後の展望

PMMU 相互作用を用いた HFB+GCM 法による殻模型計算によって、中性子数と陽子数が等しい $N=Z$ 核とその近傍核の構造と Quasi-SU(3) coupling の役割を議論し、論文投稿中である。今後、この手法をさらに重い原子核の領域へ適用することや、奇核への応用が見込まれる。奇核への適用が可能となれば、元素合成過程の理解に向けて、ベータ崩壊の研究や、時間反転対称性破れの検証実験に必要なシッフモーメントの計算が研究対象に入ってくる。より重い核でのこれらの研究が大きく進むことが期待される。

5. 成果発表

(1) 学術論文

- [1] K. Kaneko, N. Shimizu, T. Mizusaki and Y. Sun, Phys. Rev. C **103** L021301 (2021).
- [2] K. Yanase and N. Shimizu, Phys. Rev. C **102** 065502 (2020).
- [3] N. Shimizu, Y. Tsunoda, Y. Utsuno and T. Otsuka, Phys. Rev. C **103** 014312 (2020).

[4] N. Kitamura, K. Wimmer, N. Shimizu et al., Phys. Rev. C **102** 054318 (2020).

[5] S. Go et al., Phys. Rev. C **103** 034327 (2021).

(2) 学会発表

[1] 柳瀬宏太、清水則孝、“八重極相関による電気双極子モーメントの増幅効果”，
日本物理学会 2021 年年会（オンライン開催、2021/3/14）

(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	○	240,000	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。