

実施報告書（平成22年度）

研究課題

大型-10-07 (scsSkyrme)

Skyrme および Gogny エネルギー汎関数による原子核励起機構の系統的研究

研究組織

1. 橋本幸男 (Hashimoto Yukio)
グループ責任者、筑波大学数理物質科学研究科・講師
2. 江幡修一郎 (Ebata Shuichiro)
メンバー、筑波大学数理物質科学研究科・D3
3. 稲倉恒法 (Inakura Tsunenori)
メンバー、理化学研究所基礎科学特別研究員
4. 中務 孝 (Nakatsukasa Takashi)
メンバー、理化学研究所准主任研究員
5. 矢花一浩 (Yabana Kazuhiro)
メンバー、筑波大学大学院数理物質科学研究科・教授

使用した計算ノード

SR11000 (A) の1ノード計算を実施した。

実施報告の詳細

本研究課題は、平成 21-22 年度の課題“Skyrme および Gogny エネルギー汎関数による原子核の構造と励起・反応機構の研究 (大型 09/10-10)”における成果に基づきこれを継続・発展させるものである。

本課題では、Skyrme エネルギー汎関数を用いた系統的な計算法の確立・実行と Gogny エネルギー汎関数に基づいた計算コードの整備・応用を主眼としている。

数値計算の主要部分は次のようである。実空間表示によって表現された Skyrme エネルギー汎関数が出発点になる。計算では、波動関数の人為的な対称性は課されない。Kohn-Sham 軌道波動関数は三次元座標格子空間で表現される。そのうえで、原子核の基底状態は虚時間発展法によって求められる。励起状態の計算においては、従来の乱雑位相近似 (RPA) の方法に基づきながらも、2007 年度の課題 (大型 07-20) において開発された有限振幅法 (FAM) を応用することによりその数値的な適用性能を高めた。この方法によれば、従来の計算で行われている残留相互作用部分の複雑かつ多量の計算を回避することが可能となる。その結果、エネルギー汎関数の密度についての微分を数値的に実行することで、核図表上の多くの原子核に対して系統的な計算を効率よく実行できるようになった。

数値計算の主要な部分は、軽い核から始めて系統的に進めている偶々核の光吸収断面積の計算である。光吸収断面積は原子核の“形”に依存するが、われわれの計算には人為的な対称性が仮定されていないので原子核の自発的な変形の効果が適切に取り入れられる。その結果、光応答における強度分布のピークの分裂を系統的にかつ定量的に計算することが可能になっている。一方、核内の重要な相関のひとつである対相関は、Skyrme 汎関数を用いたこれまでの RPA 計算には取り入れていない。対相関を含めた原子核の応答計算については後に述べる Cb-TDHF の方法のところで述べる。

図 1 に、今回の計算の一部として、酸素 ($Z=8$) からジルコニウム ($Z=40$) にいたる偶偶核の電気双極子強度分布を示す。前述のように、強度分布のピークの位置と分裂の幅は原子核の変形を反映する。ピークの平均的位置については、経験的な法則 $E_{\text{peak}} \simeq a A^{-1/3} + b A^{-1/6}$ (a と b は定数) が引用される。ピークの平均位置は、陽子数 Z と中性子数 N の関数になっていると考えられる。現在までに実行した、重い核の領域にまで至る数値計算の結果に基づき、経験則の公式を精密化する作業が続いている。

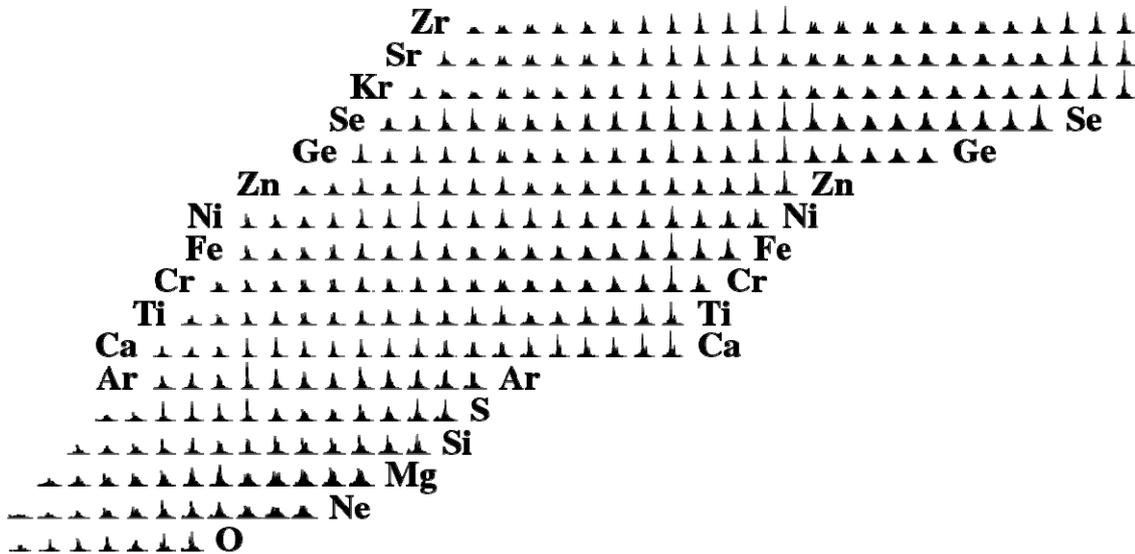


図 1. 偶偶核における電気双極子強度分布の計算。
エネルギー汎関数は SkM*。

中性子過剰核の光応答で、10MeV 近傍に小さい共鳴が系統的に現れる。これは、ピグミー (pygmy) 共鳴と呼ばれ、核内の中性子分布と陽子分布が大きく異なる場合の特徴的な振動運動であると考えられる。軽い核のピグミー共鳴の発現機構について、前回から引き続いて解析を行った。軽い不安定核でのピグミー共鳴は、緩く束縛された一粒子状態から連続状態への一粒子励起で表される。連続状態へ励起する際に、遠心力バリアを超える必要があるので、バリアが低い低軌道角運動量の一粒子状態が重要となる。従って、中性子過剰核の基底状態で低軌道角運動量 ($L=0, 1, 2$) の一粒子状態が占められる事がピグミー共鳴の発現条件である事が分かった。この発現条件は質量数 $A=60$ 領域まで成立する。

Skyrme 力に加えて核子間の対相関力を考慮した時間依存ハートレーフオックボゴリューボフの枠組みが完成 (Cb-TDHF の方法) し、テスト計算が進んでいる。この枠組みの特徴は、波動関数の関数形として TDHF + BCS 型と呼ばれる形をとるところにある。これによって、計算時間の大幅な短縮に成功し、鉛を含む重い質量数の原子核についても励起エネルギーのスペクトルを比較的短時間で得る事が出来るようになった。上記のように現在までに進められてきた RPA による系統的な計算に対応して、対相関の効果を含めた応答計算を行っている。図 2 は錫 ($Z=50$) のアイソトープの電気双極子振動における強度分布関数を示している。結果は全て質量数 100 を超えており、比較的重い領域に対し

でも系統的な計算が可能である。今後は電気双極子振動だけではない他の励起状態についても系統的に調べていく事を計画している。

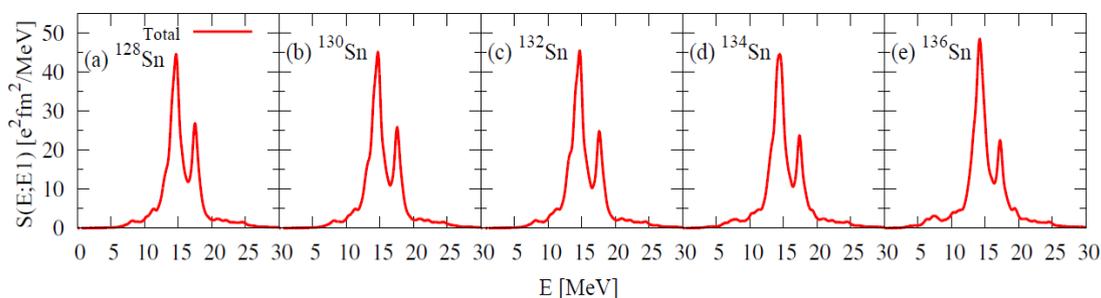


図2. 核子数 100 を超える錫 (Sn; Z=50, 球形核で対相関あり) のアイソトープの電気双極子振動における強度分布関数。

Gogny 有効相互作用を用いた計算では、QRPA に相当する線形応答の領域を越えて、より振幅が大きく非線形効果を伴う四重極型振動運動における対相関の働きを調べている。図3に、酸素18において時間依存HFB方程式を解いた結果を示す。巨大共鳴に相当する周期の短い振動による準位交差点の通過では対相関の働きによる占有確率の変化は起こらないことがわかる。一方、約2 MeVのエネルギーに相当する比較的長周期の平均場の形の運動に関連しては、占有確率の変化が空間密度の変化と対相関を通して同期することがわかる。後者の振る舞いは、いわゆる断熱的な変化に対応し、fissionに向かう大振幅運動の際に系のエネルギー移動を考える上で重要な役割をしていると考えられている。対相関によるエネルギー移動の仕組みを分析する試みが進行中である。

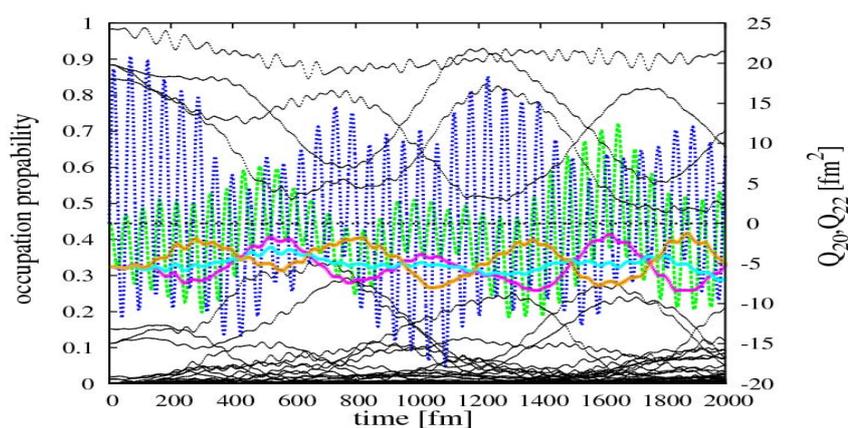


図3. 酸素18の四重極型振動運動 (青: Q20、緑: Q22) と中性子軌道の占有確率の時間変化 (黒線)。特に、黄、紫、水色の3本は d5/2 軌道 ($\Omega=1/2, 5/2, 3/2$) の占有確率をあらわす。

成果発表

論文

該当期間中のものは無い。

プロシーディングス

該当期間中のものは無い。

口頭発表

1. T. Nakatsukasa,
Large-scale numerical simulations of nuclear many-body dynamics using the time-dependent density-functional theory,
Invited talk at International Workshop on Nuclear Structure: Recent Developments (Dubna, Russia, October 14-16, 2010).
2. T. Nakatsukasa,
Density functional approaches to atomic nuclei
Invited talk at International Symposium "Nanoscience and Quantum Physics 2011" (nanoPHYS'11) (Tokyo, Japan, January 26-28, 2011).
3. T. Inakura, T. Nakatsukasa, K. Yabana
Systematic calculations of electric dipole response with fully self-consistent Skyrme-RPA
University of Aizu-JUSTIPEN-EFES Symposium on "Cutting Edge Pyssics of Unstable Nuclei" (Univ. of Aizu, 2010. 11.13 - 15)
4. S.Ebata, T.Nakatsukasa, T.Inakura, K.Yoshida, Y.Hashimoto, K.Yabana
"Systematic study of E1 mode using Canonical-basis TDHFB"
French-Japanese Symposium on Nuclear Structure Problems
理研 RIBF, 2011.01.05 - 01.08
5. Y.Hashimoto,
Description of t-band in 182Os with HFB+GCM,

University of Aizu-JUSTIPEN-EFES Symposium on "Cutting Edge Physics of Unstable Nuclei" (Univ. of Aizu, 2010. 11.13 - 15)

6. 中務 孝

「核子多体系シミュレーション計算の現状と課題」(招待講演)
次世代格子ゲージシミュレーション研究会
(和光市、2010年9月24-26日)

7. 江幡 修一郎, 中務 孝, 稲倉 恒法, 吉田 賢市, 橋本 幸男, 矢花 一浩

"Canonical-basis TDHFB を用いた線形応答計算"
(基研研究会「大振幅集団運動の微視的理論」、2010年10月24-26、基研、京都)

8. 橋本幸男,

Gogny-TDHFB による原子核の非線形振動と緩和
(基研研究会「大振幅集団運動の微視的理論」、2010年10月24-26、基研、京都)

9. 三藤竜也、橋本幸男、矢花一浩,

TDHFB による非軸対称非線形振動の研究
日本物理学会 2011 年年会 (3月25日~3月28日)