

課題名 (タイトル) :

時間依存密度汎関数理論による核子多体系の量子ダイナミクスの研究

利用者氏名 : ○中務 孝、吉田 賢市*、佐藤 弘一、江幡修一郎**、Liang, Haozhao

理研での所属研究室名 : 中務原子核理論研究室

*新潟大学自然科学系

**北海道大学知識メディアラボラトリー

1. 本課題の研究の背景、目的、関係するプロジェクトとの関係

原子核の普遍的・汎用的な計算法として、世界的に、エネルギー密度汎関数法が現在の主流となっている。計算の簡便さに加えて、軽い核から重い核までを、一つのエネルギー密度汎関数を用いて高精度に再現することができる。基底状態の性質については、欧米を中心にした精度の高いエネルギー汎関数の構築に関わる活発な研究があり、その精度は数年前に比べて一桁程度上がってきている。我々は、この発展を踏まえて、時間依存密度汎関数の大規模数値計算を行い、励起スペクトル・光核反応・重イオン反応断面積などを対象にした核反応データの理論的整備を目指して本プロジェクトを平成 23 年度より開始し、本年度は簡易利用で計算を実施した。

本プロジェクトでは、関連する研究テーマがいくつか並行して推進されているが、今年度 (平成 26 年度) は、正準基底時間依存ハートレー・フォック・ボゴリューボフ法を用いた実時間計算の成果を報告する。

2. 具体的な利用内容、計算方法

正準基底時間依存ハートレー・フォック・ボゴリューボフ法 (Cb-TDHF) とは、我々が、2010 年に提唱した新しい理論形式であり、時間依存ハートレー・フォック・ボゴリューボフ法 (TDHF) が要求する莫大な計算コストを数桁減らしながら、その精度を保つことができる手法である。この理論を用いて、計算コードを開発し、3次元実空間を格子上に離散化し、実時間発展計算を実行した。今年度は特に、不安定核における低エネルギー電気双極子励起 (別名: ピグミー共鳴状態) の性質を、軽い核から重い核に渡って、系統的に調べることができた。

3. 結果

低エネルギー電気双極子 (E1) 励起は、ピグミー共鳴

状態とも呼ばれており、理研 RIBF を含む世界の放射性アイソトープ加速実験施設における実験で大きな注目を集めている。これまでに得られた実験データは、その性質に異なる解釈を与えており、いまだに定まった見解は得られていない。本研究では、Cb-TDHF の非制限計算によって、空間変形とゲージ空間変形 (対相関) を同時に考慮した大規模数値シミュレーションを実施し、ピグミー共鳴状態の性質に対していくつかの重要な予言・解釈を与えることに成功した。

一つは、中性子の殻効果である。特定の中性子数において、ピグミー共鳴状態は大きく成長することが分かった。以前の我々の研究によって同じことが示唆されていたが、今回、これが重い原子核 (質量数 100 を超えた領域) においても大きな効果を与えることが明確になった。

また、今回の計算の結果、核変形の効果が明らかになった。E1 強度の増加および低下の両方の効果があることが分かり、これまで言われてきたような球形の原子核において E1 強度が最大になるとは限らないことが示された。図 1 に示した Zr アイソトープの計算では、中性子数が 60 と 74 において E1 強度が減少しているが、これは、球形→変形、および変形→球形の形状転移に対応している。さらに、中性子スキンの厚さとピグミー共鳴強度との間の関係についても、モデルに寄らない形でその効果をはっきりさせることができた。

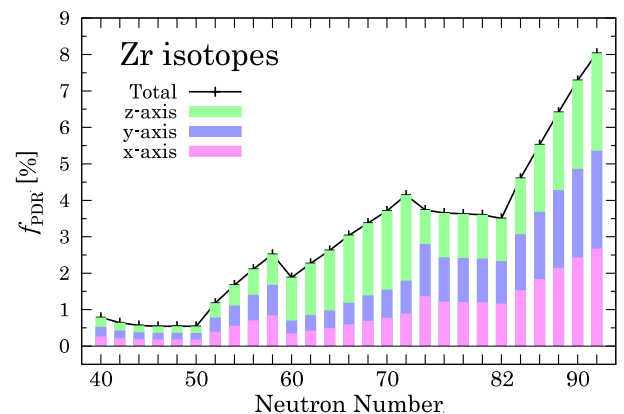


図 1: Zr アイソトープの E1 強度の和則値に対する比

さらに、ピグミー共鳴には大きく 2 種類の状態があることを、今回初めて指摘した。一つは、励起エネルギー 10 MeV あたりに現れる励起モードで、これは双極子巨大共鳴との結合によって E1 強度を失いながらも、余剰中性子の効果で残されたピーク構造である。一方で、特定の原子核の励起エネルギー 5 MeV 近傍に現れるモードは、双極子巨大共鳴との結合が解かれたモードであり、結合による E1 強度の低下が見られない。このような新しい励起モードが、どの領域に現れるかを予言した。図 2 に、Sn アイソトープの E1 強度分布を示している。132Sn を超えると、突然 5 MeV あたりにピークが出現し、これらのピークは青線と強度が一致していることが分かる。これは巨大共鳴との結合が切れていることを表している。

4. まとめ

今回の系統的な計算によって、これまで謎であった中性子過剰核に現れるピグミー共鳴状態の性質の重要な側面がいくつも明らかになった。特に、2 種類のピークが存在することは、今回初めて指摘されたことであり、今後の実験による確認に大いに期待したい。

5. 今後の計画・展望

Cb-TDHFB 法による数値シミュレーションは、MPI による並列化である程度の並列化効率を実現したため、今後は核反応計算に応用する予定である。核融合や核分裂において、対相関が果たす役割を明らかにするプロジェクトをスタートさせている。本年度の成果は、この核反応シミュレーションへの応用に対しても、重要な寄与をもたらしている。

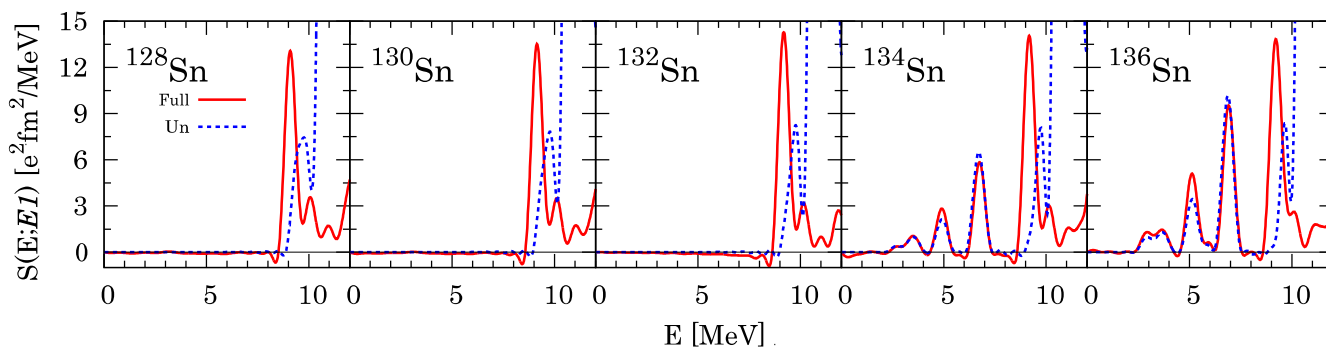


図 2 : Sn アイソトープの低エネルギー E1 強度。赤線が Cb-TDHFB の計算結果。青線は、残留相互作用を無視した粒子・空孔励起の強度分布である。

平成 26 年度 RICC 利用研究成果リスト

【論文、学会報告・雑誌などの論文発表】

J. A. Sheikh, N. Hinohara, J. Dobaczewski, T. Nakatsukasa, W. Nazarewicz, and K. Sato,
“Isospin-invariant Skyrme energy-density-functional approach with axial symmetry”
Phys. Rev. C 89, 054317 (2014) [12 pages].

T. Inakura, W. Horiuchi, Y. Suzuki, and T. Nakatsukasa,
“Mean-field analysis of ground-state and low-lying electric dipole strength in ^{22}C ”
Phys. Rev. C 89, 064316 (2014) [8 pages].

S. Ebata, T. Nakatsukasa, T. Inakura,
" Systematic investigation of low-lying dipole modes using the canonical-basis time-dependent
Hartree-Fock-Bogoliubov theory"
Phys. Rev. C 90, 024303 (2014) [18 pages].

【国際会議などの予稿集、proceeding】

T.Nakatsukasa,
“Finite amplitude method in linear response TDDFT calculations”
Journal of Physics Conf. Ser. 533, 012054 (2014) [4 pages]

H.Z. Liang, J. Meng, T. Nakatsukasa, Z.M. Niu, P. Ring, X. Roca-Maza, N. Van Giai, and P.W. Zhao,
“Nuclear charge-exchange excitations in localized covariant density functional theory”
EPJ Web of Conferences 66, 02064 (2014) [4 pages].

【国際会議、学会などでの口頭発表】

T. Nakatsukasa
“Nuclear structure studies with energy density functionals”
Progress in nuclear shell-model calculations in CNS-RIKEN collaboration, Wako, Japan, Nov.26-28, 2014

T. Nakatsukasa,
“Isospin invariant energy density functional and isobaric analogue states”
International symposium on physics of unstable nuclei 2014, Ho Chi Minh City, Vietnam, Nov. 3-8, 2014

T. Nakatsukasa,
“Time-dependent density functional calculation of nuclear response functions”
Nuclear Theory in Supercomputing Era 2014, Khabarovsk, Russia, June .22-26, 2014

T. Nakatsukasa,
“Nuclear response and equation of state”
APCTP Workshop on the intersection of cold-atomic and nuclear physics, May 12-13, 2014

H.Z. Liang,

平成 26 年度 RICC 利用報告書

“Solving Dirac equations in 3D coordinate space”

International Workshop on Nuclear Science and Simulation in fundamental and applied researches, Ho Chi Minh, Vietnam, Oct. 31-Nov.1, 2014

H.Z. Liang,

“Nuclear spin-isospin excitations --- Towards exotic deformed nuclei”

The 2nd Conference: Advances in Radioactive Isotope Science, Tokyo, Japan, June 1-6, 2014.

K. Sato, J. Dobaczewski, T. Nakatsukasa, and W. Satula,

“Isocranking calculation with proton-neutron mixed energy density functionals”

Fourth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physical Society and The Physical Society of Japan, Waikoloa, USA, Oct. 7-11, 2014

K. Sato, J. Dobaczewski, T. Nakatsukasa, and W. Satula,

“Mean-field calculation based on proton-neutron mixed energy density functionals”

The 2nd Conference on Advances in Radioactive Isotope Science, Tokyo, Japan, June 1-6, 2014.

K. Yoshida,

“Low-lying Gamow-Teller Excitations and Beta-Decay Properties of Neutron-Rich Zr Nuclei”

The 2nd Conference: Advances in Radioactive Isotope Science, Tokyo, Japan, June 1-6, 2014.

K. Yoshida,

“Skyrme-EDF for charge-changing excitation modes”

ICNT Workshop: “Physics of exotic nuclei: Theoretical advances and challenges”, Wako, Japan, June 9-13, 2014.

K. Yoshida,

“Gamow-Teller excitations and beta-decay properties of deformed neutron-rich Zr isotopes”

Nuclear Structure 2014, Vancouver, Canada, June 21 - 25 June, 2014.

K. Yoshida,

“Giant multi-pole resonances in rare-earth nuclei with shape changes”

International Workshop on Nuclear Science and Simulation in fundamental and applied researches, Ho Chi Minh City, Vietnam, Oct. 31-Nov. 1, 2014.

K. Yoshida,

“Proton-neutron pairing vibrations in $N = Z$ nuclei”

International Symposium on Physics of Unstable Nuclei 2014, Ho Chi Minh City, Vietnam, Nov. 3-8, 2014.

【その他】

RICC を用いた成果であった以下の論文が、2015 年度日本物理学会若手奨励賞に選出。

PHYSICAL REVIEW C 82, 034306 (2010)

“Canonical-basis time-dependent Hartree-Fock-Bogoliubov theory and linear-response calculations”