

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

所属 : 和光研究所 仁科加速器研究センター 理論研究部門 中務原子核理論研究室

* 新潟大学自然科学系

**東京大学 CNS

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

原子核物理の最近の大きな発展として、普遍的・汎用的なエネルギー密度汎関数の構築とその応用が挙げられる。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 年度より開始した。今年度は研究室メンバーがかなり入れ替わったため、一般利用から簡易利用に切り替えて計算を実施した。

今年度 (平成 24 年度) は、中性子過剰核における低エネルギー電気双極子 (E1) 共鳴に関する解析において成果が得られたため、この内容を報告する。

2. 具体的な利用内容、計算方法

原子核の典型的な集団運動の一つとして双極子巨大共鳴 (GDR) 状態があげられる。励起エネルギーが 15-20 MeV 程度の高い振動数をもつ振動状態であり、その振動子強度は和則のほぼ 100% を尽くす。一方、安定線 (ハイゼンベルグの谷) から遠くはなれた中性子過剰な原子核においては、GDR に加えて、励起エネルギー 10 MeV 以下にも振動子強度が小さなピーク (ピグミー共鳴 (PDR)) をもつことが理論・実験から示唆され、不安定核の典型的なエキゾチック励起モードとして注目を集めている。また、この PDR と中性子スキンの厚さ、および核物質の対称エネルギーとの相関も大きな話題である。これまでは、特定の原子核でのみしか調べられていないが、これを多くの原子核において系統的に研究することで、新たな知見を得ることができると考えられる。

方法は、我々が数年前に提案した正準基底時間依存ハートレー・フォック・ボゴリューボフ (Cb-TDHF) 法を用いる。正準基底を用いることで、計算時間を大幅に圧縮することができ、かつ線形応答領域においては、より厳密な計算と比較しても全く遜色のない結果が得られることがこれまでの研究で分かっている。対相関が重要になり核子超流動状態が基底状態に現れる重い原子核に対して有効な方法であり、かつその計算コストが莫大ではないため、系統的な研究が可能となった。

基本となる方程式は、

$$i \frac{\partial}{\partial t} \psi_i(t) = \{h[\rho(t)] - \eta_i\} \psi_i(t)$$

$$i \frac{\partial}{\partial t} \rho_i(t) = \kappa_i(t) \Delta_i^*(t) - \kappa_i^*(t) \Delta_i(t)$$

$$i \frac{\partial}{\partial t} \kappa_i(t) = \{\eta_i(t) + \eta_i^*(t)\} \kappa_i(t) + \Delta_i(t) \{2\rho_i(t) - 1\}$$

である。正準基底状態 $\psi_i(t)$ の時間発展の計算は、対相関がない系に対する計算と比較してもそれほど大きな変化がないことが特徴であり、このおかげで計算コストを通常のアプローチと比較して大きく短縮することが可能である。我々は、これを 3 次元の実空間メッシュで表現し、初期状態を基底状態に弱い E1 場を摂動として与えた状態として、直接実時間発展させる。その結果をフーリエ変換することで、E1 強度分布を計算する。

3. 結果

励起エネルギーが 10 MeV 以下の低エネルギー領域にどれだけの振動子強度が分布しているかを表した図が図 1 である。ここでは、ニッケル (Z=28) から錫 (Z=50) までのアイソトープについて、全和測値に対する比を示している。この結果から、中性子数が N=50 を超えると突然 PDR が大きく成長することが分かる。このよ

うな殻効果が、N=14,28,82 などにおいても同様に見られることが分かった。

られる。

5. 今後の計画・展望

より詳細な分析から、不安定核のエキゾチック励起モードの性質を解明する。PDR の性質については、多くの研究がある一方で、その中身はまだ混沌としている。これに決着を付けられる可能性があると考えている。

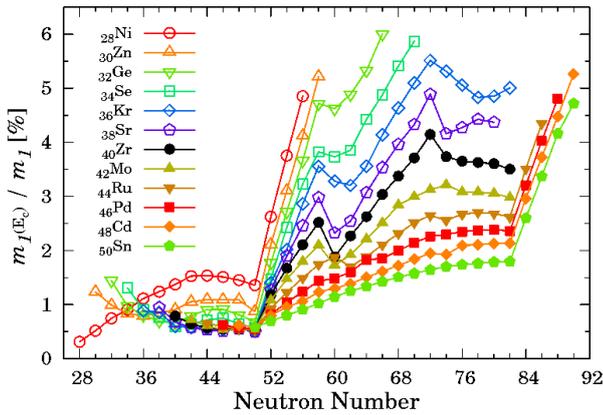


図 1 : PDR 強度比の中性子数依存性。

また、基底状態が変形した原子核においての系統的な計算を初めて行い、プロレート型に変形した原子核においては、伸びた対称軸方向に振動するモードが、より強く低エネルギーに現れることが分かった。図 2 の z 軸方向の強度がそれに対応する（球形の原子核では、当然 x、y、z 軸方向の強度は同一である）。また、中性子スキンの大きさの異方性も調べてみると、スキンの厚さは z 方向よりも x,y 方向により厚いことが分かった。

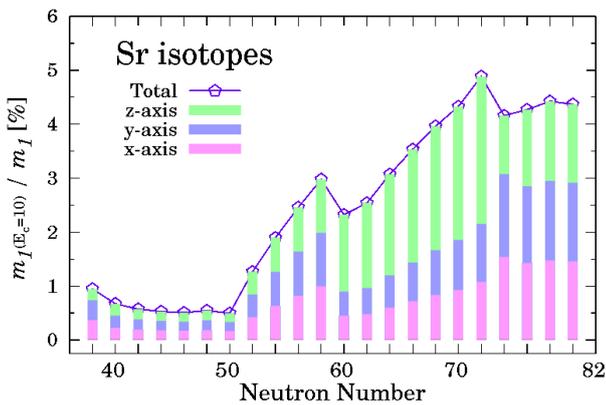


図 2 : Sr アイソトープにおける PDR 強度の方向依存性。N=60-72 のアイソトープがプロレート変形。

4. まとめ

PDR の殻効果が顕著であること、変形核での方向依存性が明らかにされた。この結果は、低エネルギーの E1 強度分布が中性子スキンの厚さと明白な相関を持たないことを示唆しており、対称エネルギーを含めた状態方程式への制限など、今後さらに詳しい解析が求め

平成 24 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】

K. Sato, N. Hinohara, K. Yoshida, T. Nakatsukasa, M. Matsuo, and K. Matsuyanagi,
"Shape transition and fluctuations in neutron-rich Cr isotopes around N=40"
Phys. Rev. C 86, 024316 (2012)

T. Nakatsukasa,
"Density functional approaches to collective phenomena in nuclei: Time-dependent density functional theory for perturbative and non-perturbative nuclear dynamics"
Prog. Theor. Exp. Phys. 2012, 01A207 (2012)

T. Nakatsukasa, S. Ebata, P. Avogadro, L. Guo, T. Inakura, and K. Yoshida
"Density functional approaches to nuclear dynamics"
J. Phys. Conf. Ser. 387, 0120156 (2012)

K. Sato, N. Hinohara, T. Nakatsukasa, M. Matsuo, and K. Matsuyanagi,
"Microscopic approach to large-amplitude deformation dynamics with local QRPA inertial masses"
J. Phys. Conf. Ser. 381, 012103 (2012)

S. Ebata, T. Nakatsukasa, and T. Inakura,
" Study of pygmy dipole resonance with a new time-dependent mean field theory"
J. Phys. Conf. Ser. 381, 012104 (2012)

S. Ebata, T. Nakatsukasa, and T. Inakura,
"Cb-TDHF calculation for the low-lying E1 strength of heavy nuclei around the r-process path"
Prog. Theor. Phys. Suppl. 196, 316 (2012)

N. Hinohara, K. Sato, K. Yoshida, T. Nakatsukasa, M. Matsuo, and K. Matsuyanagi,
"Microscopic analysis of shape coexistence/mixing and shape phase transition in neutron-rich nuclei around ^{32}Mg "
Prog. Theor. Phys. Suppl. 196, 328 (2012)

T. Inakura, T. Nakatsukasa, and K. Yabana
"Shell and neutron-skin effects on pygmy dipole resonances"
Prog. Theor. Phys. Suppl. 196, 365 (2012)

【国際会議などの予稿集、proceeding】

T. Nakatsukasa, T. Inakura, P. Avogadro, S. Ebata, K. Sato, and K. Yabana,
AIP Conference Proceedings 1484, 142 (2012)

【国際会議、学会などでの口頭発表】

T. Nakatsukasa,

“Time-dependent methods for quantum many-body dynamics”

Invited talk at XXXV Symposium on Nuclear Physics, Cocoyok, Mexico, January 3-6, 2012

T. Nakatsukasa,

“Recent developments in studies of low-energy dipole states”

Invited talk at KITPC International Workshop “From nucleon structure to nuclear structure and compact astrophysical objects”, Beijing, China, June 11-July 20, 2012.

T. Nakatsukasa,

“Time-dependent density-functional calculation of nuclear response and collective motion”

Invited talk at 4th International Conference on “Collective Motion in Nuclei under Extreme Conditions” (COMEX4), Hayama, Japan, October 22-26, 2012

T. Nakatsukasa,

“Developments in finite amplitude method”

Invited talk at the 6th LACM-TORIJIN-JUSTIPEN workshop, Oak Ridge, Tennessee, USA, October 31-November 2, 2012

T. Nakatsukasa,

“Time-dependent density-functional studies on strength functions in neutron-rich nuclei”

Invited talk at 5th International Conference on "Fission and properties of neutron-rich nuclei" (ICFN5), Sanibel Island, FL, USA, November 4-10, 2012

K. Yoshida,

“Skyrme energy density functionals for collective dynamics”

Invited talk at KITPC International Workshop “From nucleon structure to nuclear structure and compact astrophysical objects”, Beijing, China, June 11-July 20, 2012.

K. Yoshida

“Skyrme energy-density functional approach to collective modes of excitation in exotic nuclei”

Invited talk at 5th International Conference on "Fission and properties of neutron-rich nuclei" (ICFN5), Sanibel Island, FL, USA, November 4-10, 2012

K. Yoshida

“Skyrme-EDF for collective modes of excitation in exotic nuclei”

Invited talk at workshop on “Computational approaches to nuclear many-body problems and related quantum systems”, Wako, Japan, February 12-16, 2013

平成 24 年度 RICC 利用報告書

K. Sato, T. Nakatsukasa, Wojciech Satula, Jacek Dobaczewski

"Mean-field calculation including proton-neutron mixing in atomic nuclei --toward proton-neutron pairing--",
International symposium on Quarks to Universe in Computational Science (QUCS 2012), Nara, Japan, Dec.
13 - 16, 2012.

K. Sato N. Hinohara, K. Yoshida, Nakatsukasa, M. Matsuo and K. Matsuyanagi,,
"Microscopic approach to large-amplitude deformation dynamics with local QRPA",
7th Italy-Japan Symposium on Nuclear Physics, Milano, Italy, Nov. 20 - 23, 2012.

K. Sato, T. Nakatsukasa, Wojciech Satula, Jacek Dobaczewski
"Mean-field calculation including proton-neutron mixing -- toward proton-neutron pairing --",
International Symposium on Perspective in Isospin Physics: Role of non-central interactions in structure and
dynamics of unstable nuclei, Wako, Japan, Aug. 27 - 28, 2012.

S.Ebata, T.Nakatsukasa, T.Inakura

"Systematic study of low-lying E1 strength from light to heavy nuclei"
4th International Conference on "Collective Motion in Nuclei under Extreme Conditions" (COMEX4), Hayama,
Japan, October 22-26, 2012

S. Ebata

"Simulation of heavy ion collision using time-dependent density functional theory including nuclear
superfluidity"
Conference on Computational Physics (CCP2012), Kobe, Japan, Oct.14 – 18, 2012

S.Ebata, T.Nakatsukasa, T.Inakura

"Systematic investigation of E1 strength for the isotopes from $Z = 28$ to 50 "
Exotic Nuclear Structure From Nucleons (ENSN2012), Tokyo, Japan, Oct. 10-12, 2012

吉田賢市、日野原伸生

"Shape changes and large-amplitude collective dynamics in neutron-rich Cr isotopes"
日本物理学会第 67 回年次大会
関西学院大学 (2012 年 3 月 24 - 27 日)

吉田賢市、中務孝

"Giant resonances in Nd and Sm isotopes with shape evolutions"
日本物理学会 2012 年秋季大会
京都産業大学 (2012 年 9 月 11 - 14 日)

佐藤弘一、中務孝、Wojciech Satula, Jacek Dobaczewski

「 $A=48$ 同重核における陽子-中性子混合を含んだ平均場計算」
日本物理学会 2012 年秋季大会、京都産業大学、2012 年 9 月

平成 24 年度 RICC 利用報告書

佐藤弘一、中務孝、Jacek Dobaczewski

「陽子-中性子混合を入れた平均場計算」

日本物理学会第 67 回年次大会、関西学院大学、2012 年 3 月

江幡 修一郎

「重イオン反応への Cb-TDHFB の応用 II」

日本物理学会 2012 年秋季大会、京都産業大学, 2012.09.11 - 09.14