

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25287065

研究課題名(和文)原子核の低エネルギー集団励起と核融合・核分裂機構の解明

研究課題名(英文)Low-energy collective excitations in nuclei and mechanism of nuclear fusion/fission

研究代表者

中務 孝(Nakatsukasa, Takashi)

筑波大学・計算科学研究センター・教授

研究者番号：40333786

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,500,000円

研究成果の概要(和文)：原子核反応は星のエネルギー源であり、星や爆発的天体現象の中で進行する重元素合成のミクロな過程である。特に重要な低エネルギーでの核融合・核分裂といった反応機構は、多核子が関与する集団的な運動であり、量子的かつ非調和的な性格を持った問題で、理論物理として挑戦的課題である。また、これらの反応は原子核における低エネルギー集団励起モードと深く関連しており、核構造の問題としても大変興味もたれる。通常の研究では反応経路は仮定され、ポテンシャル等を調整することで記述しているが、本研究では、この反応経路を、様々な仮定を排除して核子の自由度から決定し、核反応を記述する集団ハミルトニアンを導出することに成功した。

研究成果の概要(英文)：Nuclear reactions are fuel of stars and microscopic processes to produce heavy elements in stars and stellar explosions. Nuclear fusion and fission processes are particularly important reaction mechanisms. They are collective motions, involving many nucleons, of quantum nature with strong anharmonicity, which is a challenging subject in theoretical physics. These reactions are also closely related to low-energy collective excitations in nuclei. Thus, they are of great interest as a problem of nuclear structure. Conventional approaches to these problems assume its reaction path and adjusting the potential. In the present research, we remove all these assumptions and start from nucleonic degrees of freedom. We have achieved to derive the collective Hamiltonian for a fully non-empirical description of the nuclear reactions.

研究分野：理論核物理

キーワード：原子核反応 核融合 核分裂 大振幅集団運動 線形応答 光核反応 時間依存密度汎関数理論

### 1. 研究開始当初の背景

原子核の集団運動には大きく分けて、励起エネルギーの高い領域 ( $E \approx 10 - 30$  MeV) に現れる巨大共鳴状態と、低エネルギー領域 ( $E \approx 0 - 5$  MeV) に現れる状態がある。巨大共鳴状態が1つのスレーター行列式に対する線形応答理論で良く記述できるのに対して、低エネルギー状態の集団運動は非線形性が強く、振動・回転・変形・クラスター・対相関などが複雑に絡み合った状態である。また、これらの状態は、核分裂や核融合反応などの低エネルギー核反応とも深く関連した状態であり、これらの構造から反応までを統一的に記述する微視的理論の開発は、原子核物理学の未解決課題となっており、量子多体系物理学においても重要かつ困難な課題である。

### 2. 研究の目的

原子核構造の低エネルギー集団励起構造から核融合・核分裂反応までを統一的に記述する微視的理論の構築が第一の目標である。低エネルギー状態は、量子的殻構造に強く依存し、非調和性の強い状態であるため、これらの効果を取り入れた上で、構造から反応までを記述する理論を開発する。これに対して、以下の3で述べる2つの理論手法を発展させ、必要となる数値的処方箋を開発する。また、これを具体的に実現するためには、大規模数値計算が必要になるため、大規模並列コードの開発及びその数値計算も目標である。

### 3. 研究の方法

当初、主に2つの手法を考えていた。一つは3次元実空間上で実時間発展計算を可能にする正準座標表示時間依存ハートレー・フォック・ボゴリューボフ (Cb-TDHFB) 法である[1]。核子対凝縮効果を取り入れた従来の時間依存ハートレー・フォック・ボゴリューボフ (TDHFB) 法に比べて、計算コストを3-4桁圧縮することができる。これにより、光核反応断面積の系統的計算を実施し、さらに核融合ダイナミクスに関する実時間シミュレーションを実行した。この計算では、クーロン障壁よりも高いエネルギーの反応ダイナミクスが研究対象になる。

もう一つの手法は、断熱型自己無撞着集団座標 (ASCC) 法と呼ばれる大振幅集団運動論に基づくものである。集団的核反応である核融合や核分裂反応の反応経路 (集団座標) を微視的に決定し、求められた部分空間上でポテンシャル及び慣性質量パラメータを決定する。これにより、少数の集団変数による集団ハミルトニアンを構築し、量子核反応を解析する。再量子化によって、クーロン障壁以下の低いエネルギーにも適用が可能な方法となる。ASCC法では、動的乱雑位相近似 (moving RPA)

方程式と呼ばれる式を解くことで、集団反応経路の方向と慣性質量が同時に決定される。この計算では、密度だけでなくカレントの効果を取り入れ、時間依存密度汎関数理論に基づいた「正しい」質量が計算できることが大きな強みの一つである。

これら2つの中心となる手法以外に、マイクロ・マクロ法 (Strutinsky 法) や、行列対角化による準粒子乱雑位相近似などを用いた計算も並行して実施し、それぞれの結果を比較・検討することで長所・短所を明らかにした。

### 4. 研究成果

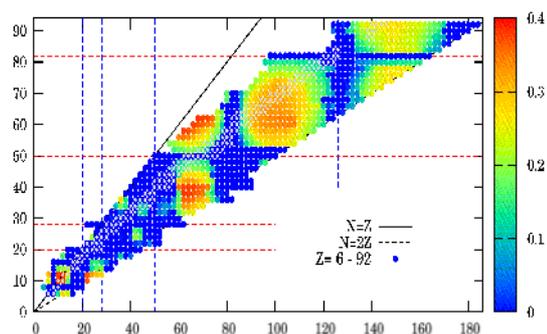


図 1: 変形度を図示した核図表

まず図1に、今回3次元実空間で計算した基底状態の変形度を、縦軸に陽子数、横軸に中性子数とした核図表に示す。Skyrme型のSkM\*と呼ばれるエネルギー汎関数を用い、対相関をBCS近似で扱った計算結果であるが、系統的に原子核の変形が得られ、その中には非軸対称変形や八重極変形の原子核も存在する。

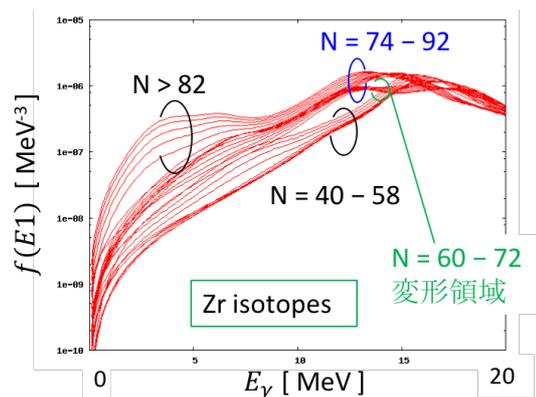


図 2: Zr アイソトープの  $\gamma$  線 ( $E1$ ) 強度関数

これらの基底状態を基礎として、Cb-TDHFB法を用いた光核反応の計算の成果をまず述べる。陽子ドリップラインから中性子過剰核 (中性子分離エネルギー2 MeV以上) の核種について、系統的に電気双極子 ( $E1$ ) 強度関数  $f(E1)$  を計算した。一例として、Zrのアイソトープの  $E1$  強度関数分布を図2に示す。中性子数によって核形状が変化し、それによって  $E1$  強度分布も変化する。また、中性子数が82を超えた

中性子過剰核では、ピグミー共鳴と呼ばれる低エネルギー強度が大きく成長することがわかる。図1と同じ原子核エネルギー密度汎関数を用いて、調整パラメータを一切導入することなく、球形核から変形核までを対象にした3次元空間基底・実時間計算である。また、中性子捕獲断面積を求めるため、これらの微視的ガンマ線強度関数をインプットとした、Hauser-Feshbach理論に基づく統計モデルでの計算も実施した。

次に、ASCC法を用いた核反応経路の微視的決定について報告する。コード開発では、計算コストがもっとも大きい箇所であるmoving RPA方程式の解法として、有限振幅法(FAM)[2]を採用した。このFAMは、従来の計算コストを縮小するとともに簡便なプログラミング法を提供する手法である。FAMを実装したプログラムを完成させ、最初に適用したのがベリリウム8( $^8\text{Be}$ )原子核の崩壊、あるいは2つの $\alpha$ 粒子の散乱問題である。 $^8\text{Be}$ の基底状態(共鳴状態)から出発して反応(分裂)経路を微視的に決定し、集団ハミルトニアンをポテンシャル及び慣性質量を計算することに成功した。図3に得られたポテンシャルを2つの $\alpha$ 粒子間の距離の関数として図示する。遠方では $\alpha$ 粒子間のクーロンポテンシャルに一致し、 $R < 6 \text{ fm}$ では核力による引力が働いている。この計算で構成されたハミルトニアンを量子化することで、 $\alpha$ - $\alpha$ 散乱の位相のずれを計算し、実験データと定量的にも一致する結果を得た。

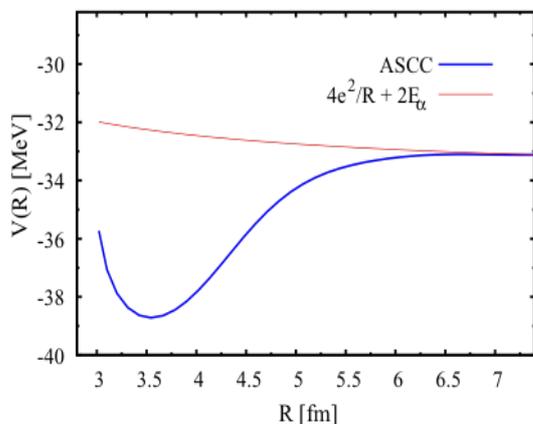


図 3:  $\alpha$ - $\alpha$  間距離の関数としての核間ポテンシャル

この $^8\text{Be}$ の問題は1980年代に断熱時間依存ハートレー・フォック(ATDHF)理論での解析が存在する。これと結果を比較し、ポテンシャルはほぼ同一のものが得られているが、慣性質量に大きな差が存在することがわかった。この違いの原因については現在調査中であり、まだはっきりしていないが、ATDHF法では多数の軌跡を生成してその包絡線を探す必要があるため、結果に不確実性が残っている点に問題があるのではないかと考えている。

次に、より重い原子核への適用にトライした。現状では、対相関を取り入れたエネルギー汎関数を用いていないため、カルシウム40( $^{40}\text{Ca}$ )程度が限度であると考えているが、 $\alpha$ 粒子・炭素12( $^{12}\text{C}$ )・酸素16( $^{16}\text{O}$ )などが関与する反応経路を決定した。図4は、 $\alpha$ 粒子と酸素 $^{16}\text{O}$ が反応し、ネオン( $^{20}\text{Ne}$ )の原子核が生成されるアルファ反応と呼ばれる天体核反応に対して求められた反応経路である。2つの原子核が十分に離れている状態、及び接触後の状態のスナップショットである。反応途中では八重極型(西洋梨型)の変形が現れることが分かる。同じ経路が、ネオン原子核の基底状態から出発しても得られた。ネオンの原子核は、クラスター模型の解析によって $\alpha$ 粒子と酸素原子核とがくっついたり離れたりするクラスター相関が重要であることが示唆されており、これと矛盾しない結果である。さらに、アルファ反応による元素合成において、ネオン原子核の構造が深く関与していることがわかる。これらは $\alpha$ 粒子と酸素というクラスター構造を仮定して調べられてきたが、今回の解析では、構造を何も過程せず非経験的にこれらの結果を得ることができた。

さらに、クーロン障壁の透過率をWKB近似で求め、低エネルギーでの融合反応断面積を計算した。天体物理S因子を過去のマクロな模型計算や実験データと比較し、それらと矛盾しない値を得ている。また、慣性質量について、2つの原子核の接触後に大きく増大するという結果を得た。これは、接触後における集団座標が、2つの原子核間の距離という単純な描像から大きくずれていることを示している。今回のような微視的に集団経路・反応経路を決定する手法を用いることで初めて明らかになった成果である。本成果は論文を投稿中である[3]。

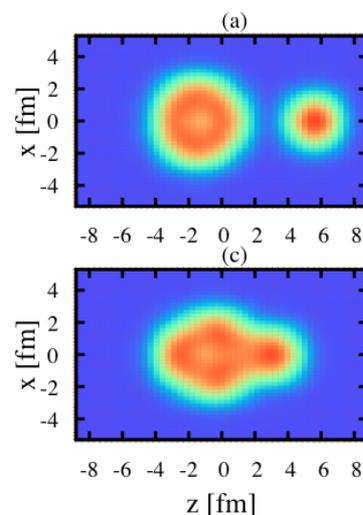


図 4:  $^{20}\text{Ne}$  合成のアルファ反応経路における密度分布スナップショット

<引用文献>

[1] S. Ebata et al., Phys. Rev. C 82, 034306 (2010).

[2] T. Nakatsukasa, T. Inakura, K. Yabana, Phys. Rev. C 76, 024318 (2007).

[3] K. Wen and T. Nakatsukasa, arXiv: 1703.04319.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 31 件)

① K. Wen and T. Nakatsukasa, “Self-consistent collective coordinate for reaction path and inertial mass”, Phys. Rev. C. 94 (2016) 054618.

② T. Nakatsukasa, K. Matsuyanagi, M. Matsu, and K. Ybana, “Time-dependent density-functional description of nuclear dynamics”, Rev. Mod. Phys. 88 (2016) 045004.

③ S. Ebata, T. Nakatsukasa, and T. Inakura, “Systematic investigation of low-lying dipole modes using the canonical-basis time-dependent Hartree-Fock-Bogoliubov theory”, Phys. Rev. C 90 (2014) 024303.

④ T. Ichikawa, “Systematic investigations of deep sub-barrier fusion reactions using an adiabatic approach”, Phys. Rev. C 92 (2015) 064604.

⑤ K. Yoshida, “Proton-neutron pairing vibrations in N=Z nuclei: Precursory soft mode of isoscalar pairing condensation”, Phys. Rev. C 90 (2014) 031303(R).

[学会発表] (計 57 件)

① T. Nakatsukasa, “Nucler reaction path and inertial mass in the self-consistent collective coordinate method”, International Nuclear Physics Conference (INPC2016), September 11-16, 2016, Adelaide, Australia.

② T. Nakatsukasa, “Microscopic determination of reaction path, potential, and inertial mass”, ECT\* workshop on Towards consistent approaches for nuclear structure and reactions, June 6 - 10, 2016, Trento, Italy.

③ T. Nakatsukasa, “Recent activities in

the time-dependent density-functional theory”, 9th Japan-China Joint Nuclear Physics Symposium, November 7-12, 2015, 大阪大学吹田キャンパス, 大阪府吹田市.

④ T. Nakatsukasa, “TDDFT studies of nuclear quantum dynamics in small and large amplitudes”, XXII Nuclear Physics Workshop: Marie & Pierre Curie, September 22 -27, 2015, Kazimierz-Dolny, Poland.

⑤ K. Yoshida, “Skyrme energy density functional method for large-scale linear response calculations”, Symposium on Quarks to Universe in Computational Science, 奈良春日野国際フォーラム, 奈良県奈良市.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中務 孝 (NAKATSUKASA, Takashi)  
筑波大学・計算科学研究センター・教授  
研究者番号: 40333786

(2) 研究分担者

市川 隆敏 (ICHIKAWA, Takatoshi)  
東京大学・大学院理学系研究科 (理学部)・  
特任助教  
研究者番号: 00370354

(3) 研究分担者

吉田 賢市 (YOSHIDA, Kenichi)  
新潟大学・自然科学系・助教  
研究者番号: 00567547

(4) 連携研究者

松尾 正之 (MATSUO, Masayuki)  
新潟大学・自然科学系・教授  
研究者番号: 70212214

(5) 連携研究者

矢花 一浩 (YABANA, Kazuhiro)  
筑波大学・計算科学研究センター・教授  
研究者番号: 70192789

(4) 研究協力者

江幡 修一郎 (EBATA, Shuichiro)