

令和 5 年 5 月 15 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K03617

研究課題名(和文) 軽い原子核における低エネルギー単極子・双極子励起モードの解明

研究課題名(英文) Low-energy monopole and dipole modes in light nuclei

研究代表者

金田 佳子 (Kanada-En'yo, Yoshiko)

京都大学・理学研究科・准教授

研究者番号：40300678

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：軽い原子核における、monopole励起、isoscalar型とisovector型のdipole励起について、特に低エネルギーの励起状態の性質を解析することによって、核子多体系の励起モードを調べた。低エネルギーに現れる特徴的なモードにおいて、クラスター、変形などの多体相関がどのように寄与するかに焦点をあてた。新しい計算方法としてK射影後変分法を開発して中性子過剰なベリリウムや酸素同位体に適用し、特に双極子励起モードにおけるアイソスピンの特徴に焦点をあてて解析を行った。これらの中性子過剰核において余剰中性子と芯原子核の運動により新しい励起モードが出現することを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した新しい計算手法(構造モデル)によって、安定原子核、不安定原子核の励起モードを理論的に説明することに成功した。中性子過剰核における低エネルギーモードの実験データが増加する中で、その理論的な解明が必要とされている状況において、アイソスピン自由度に注目した解析によって、励起モードの特徴と発現メカニズムを明らかにしたことは重要な成果である。特に、クラスター構造、原子核変形、余剰中性子に起因した異なるタイプのモードの出現を示したことは独創的な成果である。さらに、予言した励起モードについて原子核反応計算による断面積の理論値を示したことは、新たな励起モード探索実験に直接結びつく成果である。

研究成果の概要(英文)：I studied monopole and dipole excitations of stable and unstable nuclei in light mass region. The properties of low-energy excitation modes were investigated to clarify excitation modes arising in many-nucleon systems. To describe exotic excitation modes at low energy, a new theoretical method was constructed based on the framework of the anti-symmetrized molecular dynamics and were applied to neutron rich nuclei including Beryllium and Oxygen isotopes. The isospin properties of the dipole excitations were analyzed in detail to reveal the origins of those excitation modes. The clustering and valence neutrons were found to play important roles in excitation modes. The former and the latter contributes to the isoscalar and isovector components of the low-energy dipole excitations.

研究分野：原子核理論

キーワード：中性子過剰核 クラスター 双極子励起

1. 研究開始当初の背景

近年、安定・不安定原子核の励起状態の実験情報が増大する状況において、低エネルギーの励起モードが注目されている。特に単極子・双極子励起モードには従来見られなかった特徴が見られ、励起モードの新たな発現機構として理論的解明が必要となっている。

2. 研究の目的

不安定原子核において、自由度の分離によって引き起こされる運動様式(励起モード)の特徴(エネルギーや強度)と出現機構を明らかにし、新規な励起モードを調べることで従来の理解を超えた新しい知見を得ることを目的とする。幅広いエネルギー領域について、単極子励起、アイソスカラー型、および、アイソベクター型の双極子励起の強度関数を統一的に研究することによって、一つの系に共存する多様なモードがどの自由度に起因しているかを分離し、それぞれのモードの性質と運動様式を明らかにする。原子核に出現する多様な励起モードを解明することで核子多体系の本質的性質を理解すると同時に、実験的検証にも直接貢献することが目的である。

3. 研究の方法

異なるエネルギーの多様な励起モードを統一的にするために、反対称化分子動力学法を応用して新たな理論的手法を開発した。内部変形をもつ原子核においてクラスターや余剰中性子のダイナミクスを直接記述できる手法であり、安定原子核だけでなく陽子・中性子数の異なる不安定原子核の多様な励起モードを記述することが可能である。この手法をベリリウムや酸素同位体に適用し、単極子・双極子励起モードを解析した。励起強度のアイソスピン依存性を調べて非弾性散乱実験で観測される断面積データと直接比較を行い、実験で見つかっている励起モードとの対応関係と、理論的予測を示す。

4. 研究成果

原子核、不安定原子核の低エネルギー励起モードの理論研究を系統的に行った。例えば、 ^{14}C のクラスター励起、 Mg , Si などの sd-shell 原子核の基底状態回転体、 ^{10}Be や酸素同位体の monopole, dipole 励起状態の研究を AMD などの微視的構造計算で記述することに成功した。また、新たに開発した理論的方法を用いて安定・不安定原子核の低エネルギー励起モードを調べた。中性子過剰な酸素同位体については、双極子励起モードにおけるアイソスピンの特徴に焦点をあてて解析を行った。その結果、クラスター型励起モード、渦型の励起モード、中性子スキン型の励起モードが出現することを明らかにした。さらに、クラスター芯と余剰中性子の運動が原子核の内部変形と結合し、モードの分離と結合を引き起こすことがわかった。図 1、図 2 参照

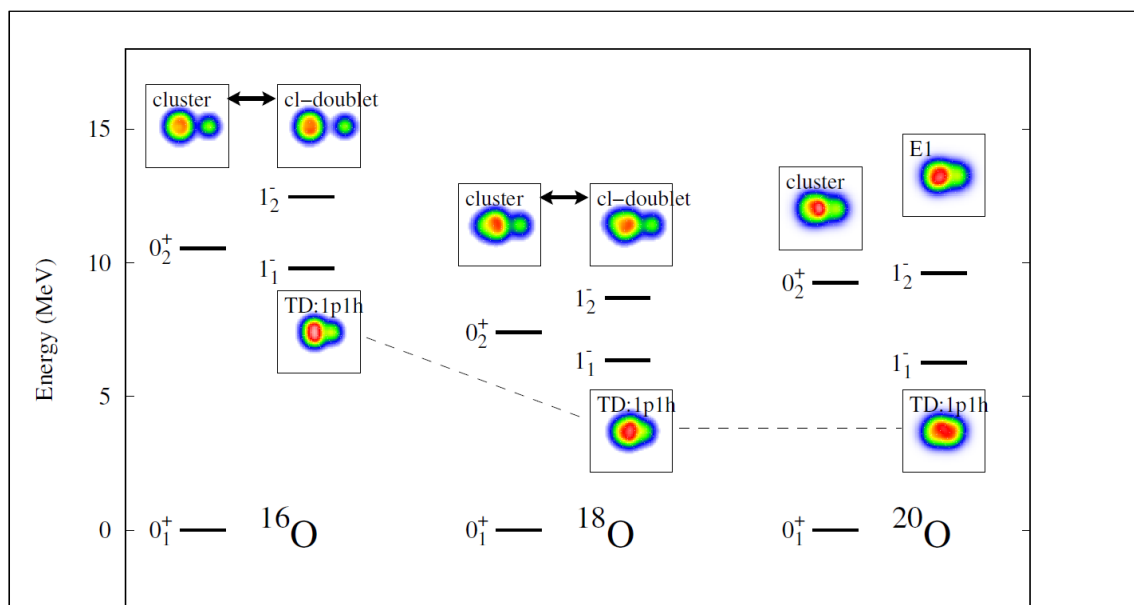


図 1 酸素同位体の単極子・双極子励起の励起スペクトルと密度分布図。クラスター励起(Cluster)、渦型励起(TD:Toroidal dipole)、中性子スキン型励起(E1)に特徴づけられる。(図は Phys.Rev.C 104 (2021) 3, 034314 から引用)

これらの微視的な構造計算の結果を用いて、原子核の density および transition density の

計算を行い、励起モードの特徴を解析し、アイソスピンモードの特徴を解明した。得られた density を input にして、微視的な反応計算を行い、陽子非弾性散乱、非弾性散乱の計算を系統的に行った。微視的な反応計算では、Melbourne g matrix を用いた coupled-channel 反応計算を用いることによって、多様な原子核の (p,p'), (alpha,alpha') 散乱について観測された断面積が見事に再現できることを確認した。従来の計算で問題となっていた missing monopole 問題も解決し、monopole や dipole 励起状態への断面積の定量的な議論が可能となった。安定原子核での既存の実験データでの検証に加えて、不安定核として、Be, C, O 同位体の陽子非弾性散乱にも適用し 2+ 状態への遷移強度について中性子と陽子の寄与 (Nn/Mp ratio) を議論することで、反応の断面積から構造の情報を引き出すことに成功した。一連の研究において、(p,p') 散乱, (alpha,alpha') 散乱を同じ反応理論の枠組みで統一的に議論できることが明らかになった。この手法では、エネルギー依存性や標的原子核の質量数について、反応計算における不定性がなく、データの少ない未知原子核にも適用可能であり、定量的な予言値を与えることができることが重要なメリットである。

また、中性子過剰な Be 同位体の励起状態を調べたところ ^{12}Be において異なる性質をもつ内部状態の回転帯 (バンド) が共存しているという興味深い現象が明らかになった。回転の角運動量の増加とともに 2 つのバンドの混ざりが強くなる様相が見られ、その混合率を非弾性散乱の断面積の大きさによって評価できるという理論結果を得た。この結果は、今後の観測実験計画の提案に密接に結びつく重要な成果である。また、核表面の クラスターの存在確率を調べるために ノックアウト反応の実験解析と理論計算を比較した共同研究を進めた。

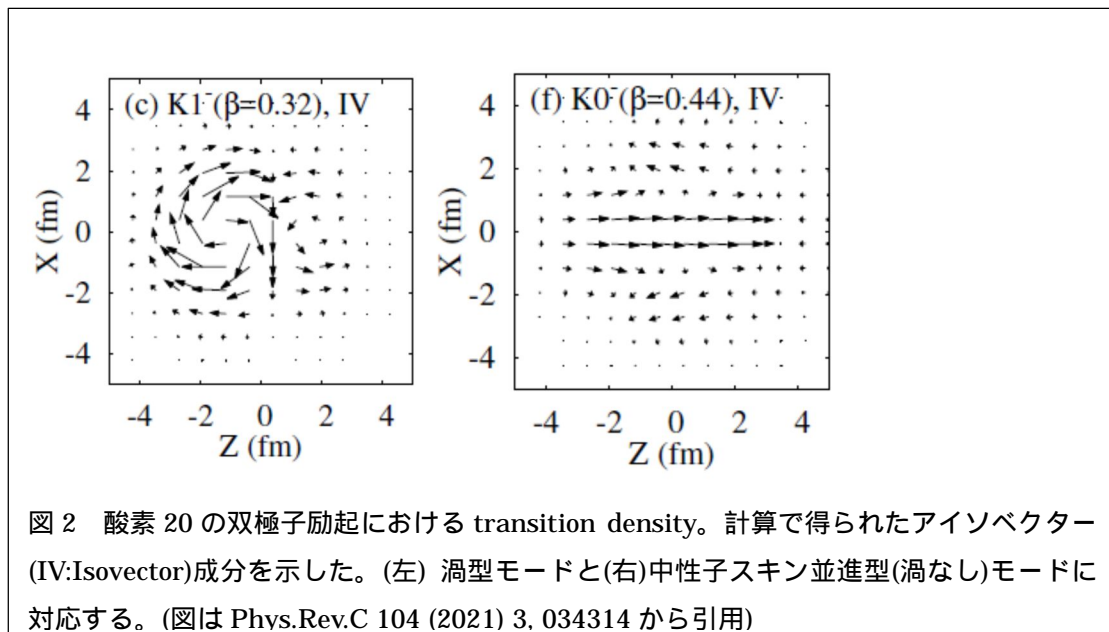


図 2 酸素 20 の双極子励起における transition density。計算で得られたアイソベクター (IV:Isovector) 成分を示した。(左) 渦型モードと(右)中性子スキン並進型(渦なし)モードに対応する。(図は Phys.Rev.C 104 (2021) 3, 034314 から引用)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計24件（うち査読付論文 18件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Shikata Yuki, Kanada-En'yo Yoshiko	4. 巻 104
2. 論文標題 Low-energy dipole excitations in ^{200}Pb with antisymmetrized molecular dynamics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 034314-1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.104.034314	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ogawa Shoya, Matsumoto Takuma, Kanada-En'yo Yoshiko, Ogata Kazuyuki	4. 巻 104
2. 論文標題 Investigation of multistep effects for proton inelastic scattering to the 2^+_{1st} state in ^6He	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 044608-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.104.044608	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Y. Kanada-En'yo and D. Lee	4. 巻 103
2. 論文標題 Effective interactions between nuclear clusters	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical review C	6. 最初と最後の頁 024318-1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.103.024318	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yuki Shikata, Yoshiko Kanada-En'yo	4. 巻 103
2. 論文標題 Low-energy dipole excitation mode in ^{18}O with antisymmetrized molecular dynamics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical review C	6. 最初と最後の頁 034312-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.103.034312	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takahashi Toru T. and Kanada-En'yo Yoshiko	4. 巻 103
2. 論文標題 Lattice QCD study of static quark and antiquark correlations at finite T via entanglement entropies	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 034504-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.034504	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kanada-En'yo Yoshiko and Ogata Kazuyuki	4. 巻 103
2. 論文標題 Probing negative-parity states of Mg24 probed with proton and inelastic scattering	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 024603-1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.103.024603	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kanada-En'yo Yoshiko, Shikata Yuki, Chiba Yohei, and Ogata Kazuyuki	4. 巻 102
2. 論文標題 Neutron dominance in excited states of Mg26 and Be10 probed by proton and inelastic scattering	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 014607-1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.102.014607	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kanada-En'yo Yoshiko and Ogata Kazuyuki	4. 巻 101
2. 論文標題 Properties of $K = 0_1^+$, $K = 2^-$, and $K = 0_1^-$ bands of Ne20 probed via proton and inelastic scattering	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 064308-1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.101.064308	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shikata Yuki and Kanada-En'yo Yoshiko	4. 巻 2020
2. 論文標題 Variation after K-projection in antisymmetrized molecular dynamics for low-energy dipole excitations in ^{10}Be and ^{16}O	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 073D01-1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa092	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kanada-En'yo Yoshiko and Ogata Kazuyuki	4. 巻 101
2. 論文標題 Transition properties of low-lying states in ^{28}Si probed via inelastic proton and neutron scattering	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 064607-1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.101.064607	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 N. Itagaki, H. Matsuno and Y. Kanada-En'yo	4. 巻 2019
2. 論文標題 Short-range and tensor correlations in ^4He and ^8Be studied with antisymmetrized quasi cluster model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 progress of theoretical and experimental physics	6. 最初と最後の頁 063D02-1-28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptz046	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kanada-En'yo Yoshiko, Ogata Kazuyuki	4. 巻 101
2. 論文標題 Cluster structures and monopole transitions of ^{14}C	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 014317-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.101.014317	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Shikata, Y. Kanada-En'yo and H. Morita	4. 巻 2019
2. 論文標題 Low-energy dipole excitation modes in ^{10}Be	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 progress of theoretical and experimental physics	6. 最初と最後の頁 063D01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptz049	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kanada-En'yo Yoshiko, Ogata Kazuyuki	4. 巻 100
2. 論文標題 Microscopic calculation of inelastic proton scattering off ^{10}B , ^{10}Be , ^{12}Be , and ^{16}C to study neutron excitation in neutron-rich nuclei	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 064616-1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.100.064616	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kanada-En'yo Yoshiko, Ogata Kazuyuki	4. 巻 99
2. 論文標題 First microscopic coupled-channels calculation of cross sections for inelastic scattering off ^{16}O	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 064608-1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.99.064608	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kanada-En'yo Yoshiko, Shikata Yuki	4. 巻 100
2. 論文標題 Isoscalar dipole excitations in ^{16}O	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 014301-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.100.014301	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshida Kazuki, Chiba Yohei, Kimura Masaaki, Taniguchi Yasutaka, Kanada-En'yo Yoshiko, Ogata Kazuyuki	4. 巻 100
2. 論文標題 Quantitative description of the Ne20(p,p)016 reaction as a means of probing the surface amplitude	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 044601-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.100.044601	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kanada-En 'yo Yoshiko, Matsuno Hideaki, Itagaki Naoyuki	4. 巻 238
2. 論文標題 Tensor Correlations in alpha Clustering Studied with Antisymmetrized Quasi Cluster Model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Springer Proc.Phys.	6. 最初と最後の頁 85 ~ 89
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-32357-8_15	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshida Kazuki, Ogata Kazuyuki, Kanada-En'yo Yoshiko	4. 巻 98
2. 論文標題 Investigation of clustering with knockout reactions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 024614-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.98.024614	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Lyu Mengjiao, Yoshida Kazuki, Kanada-En'yo Yoshiko, Ogata Kazuyuki	4. 巻 97
2. 論文標題 Manifestation of clustering in Be10 via -knockout reaction	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 044612-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.97.044612	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Morita Hiroyuki、Kanada-En'yo Yoshiko	4. 巻 98
2. 論文標題 Low-energy Gamow-Teller transitions in deformed N=Z odd-odd nuclei	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 034307-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.98.034307	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Matsuno H.、Kanada-En'yo Y.、Itagaki N.	4. 巻 98
2. 論文標題 Tensor correlations in He4 and Be8 within an antisymmetrized quasicluster model	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 054306-1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.98.054306	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fukui Tokuro、Kanada-En'yo Yoshiko、Ogata Kazuyuki、Suhara Tadahiro、Taniguchi Yasutaka	4. 巻 983
2. 論文標題 Investigation of spatial manifestation of clusters in 160 via -transfer reactions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Physics A	6. 最初と最後の頁 38 ~ 52
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nuclphysa.2018.12.024	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kanada-En'yo Yoshiko、Horiuchi Hisashi	4. 巻 13
2. 論文標題 Coexistence of cluster and shell-model aspects in nuclear systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Frontiers of Physics	6. 最初と最後の頁 132108-1-25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11467-018-0830-y	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 金田佳子
2. 発表標題 陽子および 非弾性散乱で探る原子核の励起状態
3. 学会等名 RCNP研究会「原子核における多様な共鳴現象とそれを探る反応機構
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Kanada-En'yo
2. 発表標題 alpha inelastic scattering cross sections on ^{12}C with microscopic coupled-channel calculation
3. 学会等名 the 15th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG15) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Kanada-En'yo
2. 発表標題 Cluster excited states probed by alpha and proton inelastic scattering
3. 学会等名 ECT* Workshop on " Light clusters in nuclei and nuclear matter: Nuclear structure and decay, heavy-ion collisions, and astrophysics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Kanada-En'yo
2. 発表標題 alpha and di-nucleon correlations in nuclei
3. 学会等名 ECT* workshop on Universal physics in Many-Body Quantum Systems From Atoms to Quarks (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshiko Kanada-En'yo
2. 発表標題 Tensor correlations in α clustering studied with antisymmetrized quasi cluster model'
3. 学会等名 International Conference on Few-Body Problems in Physics (FB22) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshiko Kanada-En'yo
2. 発表標題 Dipole excitations in ^{10}Be
3. 学会等名 International Conference on Simplicity, Symmetry and Beauty of Atomic Nuclei (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshiko Kanada-En'yo
2. 発表標題 Tensor correlation in α clustering studied with antisymmetrized quasi cluster model (AQCM): ^4He and ^8Be
3. 学会等名 Recent advances in nuclear structure physics 2018 (RANSP2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshiko Kanada-En'yo
2. 発表標題 Cluster phenomena in nuclear systems
3. 学会等名 新学術領域研究「量子クラスターで読み解く物質の階層構造」スクール (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 延与佳子
2. 発表標題 4Heおよび8Beにおけるテンソル相関と短距離相関
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会(2019年)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関