

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 22 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2023

課題番号：19K03859

研究課題名(和文) 非弾性散乱を用いた新しいアプローチによる炭素燃焼過程の研究

研究課題名(英文) Novel approach for the Carbon burning processes based on alpha inelastic scattering

研究代表者

木村 真明 (KIMURA, Masaaki)

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・室長

研究者番号：50402813

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：反対称化分子動力学を用いて、 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 共鳴に關与するクラスター共鳴の性質を調べた。重心系のエネルギーで1~2MeV程度に多数の共鳴が存在し、それらの崩壊幅はかなり小さいとの結果を得た。それぞれの共鳴に対して、基底状態からの単極遷移強度を求め、実験との比較を通して、理論計算の妥当性を確認した。

さらに、求めた共鳴の性質から、核融合反応の反応率を予測した。得られた反応率は、従来の外挿値よりもやや小さなものとなった。この結果は、近年提唱されていたHindrance模型(低温での反応率の強い抑制)と、代理反応による見積り(低温での反応率の大きな増加)の双方を否定する結果となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、完全微視的な原子核模型によって $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 核融合の反応率を求めた初めての研究である。完全微視的な核模型は、数値計算のコストが大きいものの、さまざまな効果は無矛盾に取り入れることができる。そのため、従来の現象論的模型と比べて信頼性が高く、予言能力を持っている。実際に、本研究で予測したクラスター共鳴は、後の実験によって確認されており、高く評価されている。この研究で求めた $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 核融合反応の反応率は、超新星爆発のシミュレーションに早速用いられており、原子核物理の発展のみならず、天体現象の理解にも大きく役立つものと期待される。

研究成果の概要(英文)：Using antisymmetrized molecular dynamics, the properties of the cluster resonances relevant to the $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ fusion reaction were investigated. We found that there are many resonances in the energy range of 1-2 MeV in the center-of-mass system, and that their decay widths are rather small. For each resonance, the intensity of the monopole transition was calculated, and the validity of the theoretical calculation was confirmed through comparison with experiments. The reaction rates of fusion reactions were predicted from the properties of the obtained resonance properties. The obtained reaction rate was slightly smaller than the conventional extrapolated value. This result rejects both the Hindrance model (strong suppression of the reaction rate at low temperatures) and the estimate by proxy reactions (large increase in the reaction rate at low temperatures) that have been proposed in recent years.

研究分野：原子核物理学

キーワード：元素合成 核融合 クラスター

1. 研究開始当初の背景

ヘリウムや炭素の核融合は、中性子星で起こるスーパーバーストなどの爆発的天体現象、宇宙の化学組成に強く影響する。しかし、天体での低エネルギー核融合を加速器実験で測定することは困難であるため、反応率に対する制限が無い。その結果、天体現象を説明するための様々な反応率がアドホックに用いられており、核理論の知見から反応率に制限を加えることが求められていた。

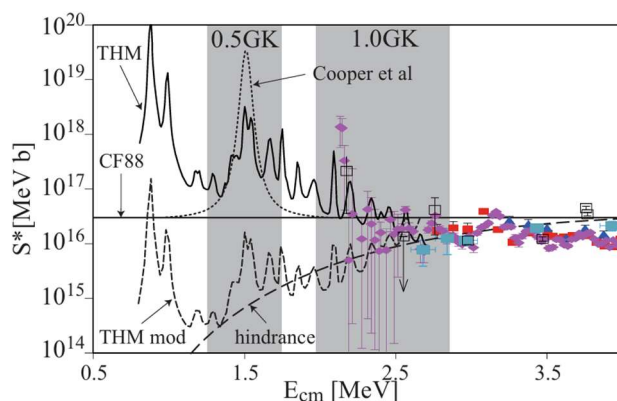


図 3: $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 核融合に対する S -factor の実験値とモデルによる低エネルギー側への外挿結果。シンボルで示されているのが直接反応による測定値 [5-8]、低エネルギー領域に実線 (THM) で示されたのが代替反応 (トロイの木馬法) による測定値です [13]。ただし、解析方法によっては数桁小さい値になることも議論されています (THM mod) [14]。天体シミュレーションでは、測定値を外挿したものが用いられ、代表的なものとして、CF88 [11]、hindrance 模型 [12] があります。また、X 線スーパーバーストを説明するために共鳴を仮定したもの (Cooper et al [4]) もあります。

2. 研究の目的

従って、本研究課題では、核融合反応に寄与するクラスター共鳴の性質を解明し、徹視的核模型計算に基づいて核融合反応率に制限を与えることである。

3. 研究の方法

核融合反応の断面積は極めて小さいため、直接反応によって反応率を調べることは極めて難しい。そこで、理論計算で共鳴のエネルギーと崩壊幅を求め、それに基づいて核融合反応の断面積を見積もることとする。

しかし、このままでは、理論計算が正しいことを保証できない。そこで、クラスター共鳴が大きな単極・双極遷移強度を持つため、 α 粒子による非弾性散乱によって観測できることを利用する。理論計算によって、クラスター共鳴の単極・双極遷移強度も求め、その結果を α 非弾性散乱の測定値と比較することで理論計算の結果を校正する。

4. 研究成果

Gongy D1S 密度汎関数と、反対称化分子動力学を用いて、 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 共鳴に関与するクラスター共鳴の性質を調べた。計算にあたっては、核間距離の拘束条件を課して変分を行うことで、 ^{12}C 原子核が回転励起したり、偏極したりする効果を、取り入れた。

その結果、重心系のエネルギーで 1~2MeV 程度に多数の共鳴が存在し、それらの崩壊幅は

かなり小さいとの結果を得た。また、それぞれの共鳴に対して、基底状態からの単極遷移強度を求めて公開した。のちに、実験による検証が行われ、理論予測に非常に近いエネルギーに共鳴が多数存在することが示され、理論計算の妥当性が確認された。

さらに、求めた共鳴の性質から、核融合反応の反応率を予測した。得られた値は、従来の外挿値よりもやや小さなものとなった。この結果は、近年提唱されていた Hindrance 模型 (低温での反応率の強い抑制) と、代理反応による見積り (低温での反応率の大きな増加) の双方を否定する結果となった。

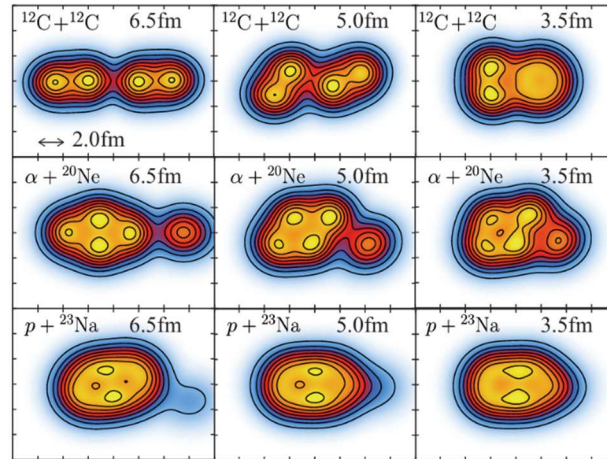


図 4: エネルギー変分によって求めた、 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$, $\alpha + ^{20}\text{Ne}$, $p + ^{23}\text{Na}$ チャンネルの波動関数の例。拘束条件を課すことで様々な核間距離に対して波動関数を求めています。距離に応じて核が回転したり偏極する様子が見てとれます。一部の図は論文 [1] から転載しています。

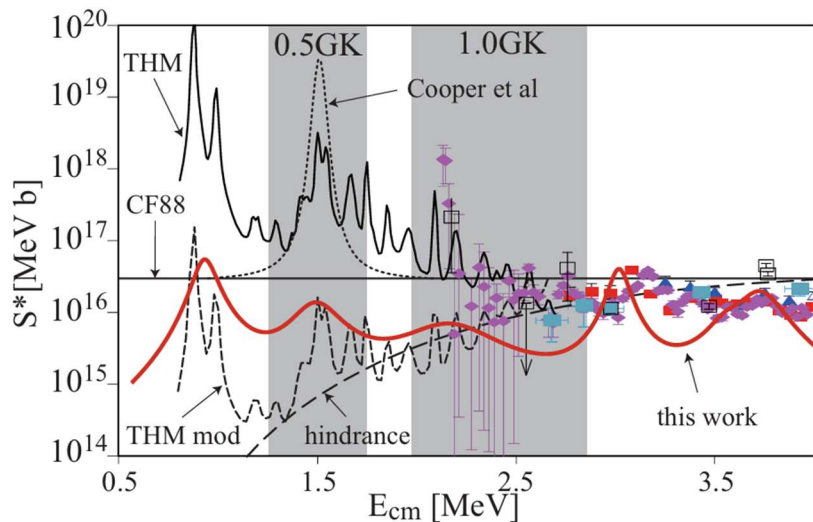


図 5: 図 3 に示した、 S -factor の測定値と外挿とを、我々の計算結果 (this work) と比較しています。計算結果はは 3 MeV 以上の実験データとよく一致しており、また 2 MeV 以下の領域にも核融合反を増大させる共鳴状態が存在することを示しています。

この研究で求めた $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 核融合反応の反応率は、超新星爆発のシミュレーションに早速用いられており、原子核物理の発展のみならず、天体現象の理解にも大きく役立つものと期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計24件（うち査読付論文 24件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Zhao Qing, Kimura Masaaki, Zhou Bo, Shin Seung-heon	4. 巻 106
2. 論文標題 alpha formation probability in 10Be and 12Be within a microscopic cluster model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.106.054313	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 Masui Hiroshi, Horiuchi Wataru, Kimura Masaaki	4. 巻 63
2. 論文標題 Two-Neutron Halo Structure and Anti-halo Effect in 31F	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Few-Body Systems	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00601-021-01715-z	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 Takatsu R., Suzuki Y., Horiuchi W., Kimura M.	4. 巻 107
2. 論文標題 Microscopic study of the deformed neutron halo of 31Ne	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.107.024314	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 Adsley P., Nesterenko V. O., Kimura M., Donaldson L. M., Neveling R., Bremmer J. W., Jenkins D. G., Kheswa N. Y., Kvasil J., Li K. C. W., Marin-Lambarri D. J., Mabika Z., Papka P., Pellegrini L., Pseudo V., Rebeiro B., Reinhard P.-G., Smit F. D., Yahia-Cherif W.	4. 巻 103
2. 論文標題 Isoscalar monopole and dipole transitions in 24Mg, 26Mg, and 28Si	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 044315, 1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.103.044315	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 該当する

1. 著者名 Dan M., Chatterjee R., Kimura M.	4. 巻 57
2. 論文標題 A description of the structure and electromagnetic breakup of ^{11}Be with microscopic inputs	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The European Physical Journal A	6. 最初と最後の頁 203, 215
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epja/s10050-021-00526-4	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 該当する

1. 著者名 Taniguchi Yasutaka, Kimura Masaaki	4. 巻 823
2. 論文標題 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ fusion S*-factor from a full-microscopic nuclear model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136790, 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136790	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 Kimura M., Suzuki Y., Baba T., Taniguchi Y.	4. 巻 105
2. 論文標題 Description of isospin mixing by a generator coordinate method	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 014311, 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.105.014311	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 Z. H. Yang et al.	4. 巻 126
2. 論文標題 Quasifree Neutron Knockout Reaction Reveals a Small s-Orbital Component in the Borromean Nucleus ^{11}B	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.126.082501	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 該当する

1. 著者名 Taniguchi Yasutaka, Yoshida Kazuki, Chiba Yohei, Kanada-En'yo Yoshiko, Kimura Masaaki, Ogata Kazuyuki	4. 巻 103
2. 論文標題 Unexpectedly enhanced α -particle preformation in $Ti48$ probed by the (p,p) reaction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.103.L031305	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 Nishibata H., Tajiri K., Shimoda T., Odahara A., Morimoto S., Kanaya S., Yagi A., Kanaoka H., Pearson M. R., Levy C. D. P., Kimura M., Tsunoda N., Otsuka T.	4. 巻 102
2. 論文標題 Structure of the neutron-rich nucleus $Mg30$	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.102.054327	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 Zhou Bo, Kimura Masaaki, Zhao Qing, Shin Seung-heon	4. 巻 56
2. 論文標題 Microscopic calculations for Be isotopes within real-time evolution method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The European Physical Journal A	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epja/s10050-020-00306-6	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 Choudhary V., Horiuchi W., Kimura M., Chatterjee R.	4. 巻 102
2. 論文標題 Imprint of a nuclear bubble in nucleon-nucleus diffraction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.102.034619	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 Kimura Masaaki、Taniguchi Yasutaka	4. 巻 102
2. 論文標題 + Si28 and O16 + O16 molecular states and their isoscalar monopole strengths	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.102.024325	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 Baba T.、Kimura M.	4. 巻 102
2. 論文標題 Monopole and dipole transitions of the cluster states of O18	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.102.024317	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 Liu Y., Ye Y.L., Lou J.L., Yang X.F., Baba T., Kimura M.	4. 巻 124
2. 論文標題 Positive-Parity Linear-Chain Molecular Band in C16	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.192501	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 Masui H.、Horiuchi W.、Kimura M.	4. 巻 101
2. 論文標題 Two-neutron halo structure of F31 and a novel pairing antihalo effect	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.101.041303	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 Chiba Y., Kimura M.	4. 巻 101
2. 論文標題 Hoyle-analog state in C13 studied with antisymmetrized molecular dynamics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.101.024317	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 Taniguchi Yasutaka, Kimura Masaaki	4. 巻 800
2. 論文標題 C12+16O molecular resonances at deep sub-barrier energy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2019.135086	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)O16 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 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 Nishibata H., Kanaya S., Shimoda T., Odahara A., Morimoto S., Yagi A., Kanaoka H., Pearson M. R., Levy C. D. P., Kimura M., Tsunoda N., Otsuka T.	4. 巻 99
2. 論文標題 Structure of Mg31: Shape coexistence revealed by - spectroscopy with spin-polarized Na31	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 1-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.99.024322	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 Imai R., Tada T., Kimura M.	4. 巻 99
2. 論文標題 Real-time evolution method and its application to the 3 cluster system	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.99.064327	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 Baba T., Kimura M.	4. 巻 100
2. 論文標題 Variety of clustering in 018	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.100.064311	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 Baba T., Kimura M.	4. 巻 99
2. 論文標題 Coulomb shift in the mirror pair of C14 and O14 as a signature of the linear-chain structure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.99.021303	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 Zhou Bo, Funaki Yasuro, Horiuchi Hisashi, Kimura Masaaki, Ren Zhongzhou, Roepke Gerd, Schuck Peter, Tohsaki Akihiro, Xu Chang, Yamada Taiichi	4. 巻 99
2. 論文標題 Nonlocalized motion in a two-dimensional container of particles in 3- and 4- states of C12	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.99.051303	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 -

[学会発表] 計13件(うち招待講演 9件/うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Masaaki Kimura
2. 発表標題 Astrophysical S-factor for $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ fusion reaction from a full-microscopic nuclear model
3. 学会等名 Annual Topical Meeting of IReNA - FA1 Nuclear reaction measurements in Underground Laboratories (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masaaki Kimura
2. 発表標題 Alpha cluster formation at the surface of stable and unstable nuclei
3. 学会等名 Korean Physical Society Spring meeting 2022 (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masaaki Kimura
2. 発表標題 Monopole transitions as a probe for nuclear shape and clusters
3. 学会等名 Developments of Physics of Unstable Nuclei (YKIS2022b) (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masaaki Kimura
2. 発表標題 Low energy monopole strength: A novel approach to the astrophysical fusion reactions
3. 学会等名 ECT* workshop, Advances On Giant Nuclear Monopole Excitations And Applications To Multi-Messenger Astrophysics (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木村真明
2. 発表標題 生成座標法によるアイソパリックアナログ状態とアイソスピン混合の記述
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaaki Kimura
2. 発表標題 Molecular dynamics approach for nuclear dipole responses
3. 学会等名 PANDORA Workshop 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木村真明
2. 発表標題 反対称化分子動力学による光核励起断面積の理論計算
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木村真明
2. 発表標題 原子核のかたち
3. 学会等名 大阪大学 南部コロキウム (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木村真明
2. 発表標題 Carbon burning process studied by α -inelastic scattering
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」第5回領域研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masaaki Kimura
2. 発表標題 Shape of light clustered nuclei
3. 学会等名 Light clusters in nuclei and nuclear matter: Nuclear structure and decay, heavy ion collisions and astrophysics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaaki Kimura
2. 発表標題 核データセンターの活動と、宇宙核物理における役割
3. 学会等名 核データと重元素合成を中心とする宇宙核物理研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaaki Kimura
2. 発表標題 非弾性散乱とクラスター共鳴
3. 学会等名 核データと重元素合成を中心とする宇宙核物理研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木村真明
2. 発表標題 Shape of Carbon 12
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
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
---------	---------