

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2023

課題番号：17K05432

研究課題名(和文) 輸送理論で解き明かす核反応と核物質におけるクラスター相関

研究課題名(英文) Cluster correlations in nuclear reactions and nuclear matter studied with transport models

研究代表者

小野 章 (Ono, Akira)

東北大学・理学研究科・助教

研究者番号：20281959

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：核子多体系の微視的な時間発展理論(輸送模型)である反対称化分子動力学(AMD)を駆使して、重イオン衝突などの時間発展計算を行い、特にクラスターの重要性に着目して研究を行った。理論計算と実験データとの比較により、核反応ダイナミクスの定性的・定量的理解を確立しつつ、様々な密度や陽子中性子非対称度の状態方程式の情報を抽出するとともに、クラスター相関が果たす様々な役割を明らかにした。さらに、国際共同研究により他の輸送模型計算との比較を進め、理論の不定性の根源を究明し、モデルを改良と信頼度の向上も実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

国内外の加速器施設で行われる重イオン衝突実験では、反応過程で様々な密度や温度の状態が実現するが、その性質(状態方程式)は、中性子星や超新星爆発のような天体現象を理解するためにも不可欠な情報である。本研究で実施したような理論計算は、地上実験での微視的な反応と巨視的な天体現象を結びつけるために重要な役割を果たす。また、量子力学の法則に従う多体系の複雑な時間発展について、クラスター相関等を含め如何に扱い理解するかという問題は、原子核物理に限らず、様々な階層の物理において重要な課題である。

研究成果の概要(英文)：Using the antisymmetrized molecular dynamics (AMD) model, which is a microscopic theory (transport model) to solve the time evolution of nucleon many-body systems, we have performed studies of heavy-ion collisions and other reactions, focusing in particular on the importance of clusters. By comparing theoretical calculations with experimental data, we have established qualitative and quantitative understandings of nuclear reaction dynamics and extracted some information on the equation of state for various densities and degrees of proton-neutron asymmetry, while clarifying various roles played by cluster correlations. In addition, through international collaborations, comparisons with other transport model calculations have been made to find the source of the theoretical uncertainties and to improve the model and its reliability.

研究分野：原子核理論

キーワード：クラスター 重イオン衝突 輸送理論 反対称化分子動力学 状態方程式 対称エネルギー

1. 研究開始当初の背景

長年にわたり、重イオン衝突の研究（ここでは核子あたり数十～数百 MeV のエネルギー領域）の大きな目的は、様々な状況下の核物質の性質を探ることであった。近年では特に陽子数と中性子数のバランスの崩れた非対称核物質の状態方程式（EOS）の研究が盛んであり、核構造研究から得られる情報とも連動して、対称エネルギーの研究が大きな拡がりを見せている。[$E = \epsilon(n, p)$, $\mu = (\epsilon - p)/n$ を用いて EOS を $E/A = \epsilon(n) + S(n)^2$ と書くとき、密度の関数 $S(n)$ を対称エネルギーという。] 中性子星などの高密度天体とも密接に関連する。また、理研 RIBF の S - RIT 実験において中性子過剰核衝突から生じる中間子などが測定されるなど、新データによる新たな展開も期待されてきていた。

一方、核子多体系におけるクラスター相関は、一般には原子核の励起状態の構造に顕著に現れることが知られているが、その重要性は低励起状態にとどまらない。重イオン衝突で実現する励起エネルギーは、核子あたり 10 MeV 程度以上と高いにもかかわらず、反応の終状態において系の陽子の 8～9 割はクラスター（ α 粒子 ^4He や重陽子 ^3H など）やそれより大きい原子核（フラグメント）に束縛されている。つまり、核子多体系の広大なエネルギー領域において量子論的なクラスター相関は極めて重要である。重イオン衝突分野においてクラスターの重要性は強く意識されるようになっていた。

EOS や対称エネルギーとクラスターは同時に考慮すべきである。例えば、研究代表者らは、重イオン衝突の複数の例で、クラスター相関によって対称エネルギー研究が重大な影響を受けることを指摘していた。また、超新星爆発においても重イオン衝突に類似の状況でクラスターが現れ、ニュートリノ輸送や衝撃波のダイナミクスに影響を及ぼす可能性も指摘されてきていた。特に、低密度物質中でのクラスターの存在について、超新星 EOS を重イオン衝突データが制限できる点も注目されていた。

重イオン衝突と EOS の研究の発展には理論研究の果たすべき役割は大きい。一般に実験データを輸送模型計算により分析して EOS を導こうとするが、模型の不定性のために EOS の導出に限界が生じる。輸送模型のほとんどは核子自由度に基づいた平均場理論を出発点としており、クラスター相関やフラグメントを扱うのは苦手である。それに対し、研究代表者が発展させてきた反対称化分子動力学法（AMD）については、クラスター相関を取り入れる拡張を行っていた。その結果、様々な系で同一の枠組みによりクラスター・フラグメント生成に記述に成功しており、この点が本研究の鍵となると考えられた。

2. 研究の目的

核物質の性質は、重イオン衝突などの核物理と中性子星や超新星爆発のような天体現象の両方に関連する研究対象であるとともに、状況によりクラスター相関が重要な役割を果たすなど量子多体問題としても興味深い。本研究では、核子多体系の微視的な時間発展理論（輸送模型）である反対称化分子動力学法（AMD）を駆使して重イオン衝突などの時間発展計算を熱平衡系の性質とも関連させ、特にクラスターの重要性に着目する。核反応ダイナミクスの定量的理解を確立しつつ、様々な密度や陽子中性子非対称度の状態方程式やクラスター組成の情報を抽出する。さらに、国際共同研究により他の輸送模型計算との比較を進め、理論の不定性の根源を究明し、模型を改良して信頼度を向上させることも本研究の目的とした。

具体的には以下のような具体的な課題を設定した。(1) 核子あたり数十 MeV の重イオン衝突(主に低密度核物質)について、AMD による既存の研究を多くの反応系へ拡張し、特にクラスターに着目した研究を推進する。(2) S RIT 実験の系(主に高密度核物質)について、AMD 計算によるクラスターや EOS の研究に加えて、共鳴や中間子生成の研究も行う。(3) 輸送模型比較の国際プロジェクトに積極的に関わる。(4) 熱平衡系という観点からの分析も行う。

3. 研究の方法

重イオン衝突・核物質・クラスター相関に関わる研究目的を達成するため、種々の核反応の計算を AMD により実施し、熱平衡の観点からも分析を行ってきた。研究の主要な部分は研究代表者が行ったが、実験データと AMD 計算を詳細に比較するために、対応する実験研究者と密接に連絡をとり、必要な部分は共同研究として実施した。具体的な反応系としては、核子あたり数十 MeV 領域の重イオン衝突、数百 MeV 領域の重イオン衝突などを対象とし、共通の枠組みでの理解を目指した。輸送模型を比較する国際的な共同研究にも積極的に貢献し、得られた知見を AMD 計算の改良にも役立てるように努めた。

4. 研究成果

[数百 MeV/nucleon での重イオン衝突]

理研の実験(S RIT 実験)に相当する核子あたり数百 MeV の入射エネルギーの重イオン衝突では、一旦実現した高密度状態が強く膨張していき、最終的に核子やクラスターが生成され観測される。AMD 計算を分析してみると、中性子過剰な原子核の衝突($Sn+Sn$ など)では、圧縮時に飽和核密度の2倍程度の高密度が実現し、その時点での中心部の陽子中性子比が高密度対称エネルギーを反映していることが確認できる。系全体の膨張は比較的単純であり、圧縮段階での陽子中性子比が、終状態の粒子のエネルギースペクトル(特に中性子と陽子の差)として観測可能である。このことは本研究での AMD 計算で確認できたが、特に、クラスター相関を取り入れた AMD 計算では、反応の早い段階からクラスター生成が繰り返し起こり、反応ダイナミクス全体にクラスター相関が影響していることは疑いない。

本研究では、実験研究者と協力し、S RIT 実験のデータを AMD 計算と比較して、現象の理解と各種の物理的情報の抽出を試みた。まずは、核子やクラスター(陽子 1H ・重陽子 2H ・三重陽子 3H など)の生成数は AMD 計算で概ね再現されることが確認でき、次に、反応の全体的様相に関わるストッピング(3次元運動量分布の等方化)に着目した。特に、 1H 、 2H 、 3H などの粒子ごとに運動量分布を実験と理論計算で比較してみると、AMD 計算では 3H のストッピングが弱すぎるという問題に遭遇したため、いくつかの解決策を検討した。媒質中での二核子衝突断面積の不定性や、古典力学的な平均場伝播のために 3H クラスター内部の束縛位相空間が狭すぎる問題、 4He の第一励起状態が $n+^3He$ には崩壊できず $p+^3H$ にのみ崩壊する効果を検討し、ある程度の改善が得られた。しかしながら、実験データを見る限り、 3H は系の重心付近に非常に多く生成しており、その完全な理解は今後の課題と言える。

上記の 3H の問題に関わらず、中性子数の異なる複数の系($^{132}Sn+^{124}Sn$ と $^{108}Sn+^{112}Sn$)を比較し、観測量の系依存性に着目することにより、実験や理論の不定性を低減できる。実際、 $^3H/^1H$ の比をラピディティ(あるいはビーム方向の速度成分)の関数として見たもの

は、2つの系の間で比を取ると、上記のような計算の不定性にほとんど依存しないことが確認できた。実験データを計算と比較すると、対称エネルギー $S(\rho)$ の傾きを表すパラメータ L について、明確な依存性が見られ、 $L=46$ MeV の場合は実験を再現するが、 $L=108$ MeV は実験と矛盾するという結論が得られた。これは、圧縮時の系の中心部の陽子中性子比が対称エネルギーを反映していることの結果として解釈できる。この成果は、国際共著論文として Physics Letters B 822 (2021) 136681 に発表した。

フロー観測量（側方へのフローや反応面外へのフロー）についても、実験と計算との比較を進め、論文を投稿中である。クラスターのフローが核子のフローより強いことが確認できたが、さらに、AMD 計算で用いる平均場の運動量依存性が観測量に顕著に現れることがわかった。

また、同じ反応系において、アイソスケーリングの分析を European Physical Journal A (2022) 58:201 に発表した。アイソスケーリングは熱平衡系におけるクラスター生成量に期待される関係式であるが、AMD 計算結果では全運動量領域でアイソスケーリングが見られた。一方、実験データでは高運動量部分でアイソスケーリングが成り立っておらず、特に、 ^3H スペクトルの $^{132}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$ と $^{108}\text{Sn}+^{112}\text{Sn}$ での違いが特異である。この点は、AMD 計算と実験データとの違いを理解する上での今後の鍵となる。

[輸送模型比較と独自研究への活用]

輸送模型比較の国際共同研究では、箱の中の系での二核子衝突項（NN NN の弾性散乱）の比較を Physical Review C 97, 034625 (2018) に発表した。この比較で得られた重要な認識は、特にパウリブロッキングに関して、終状態の位相空間占有率を見積もる際の大きなゆらぎによってブロッキングが過小評価されることであった。この問題は、AMD に別のコード JAM を組み合わせるアプローチでも、JAM 内部で NN NN 過程などを計算する際に存在した。この難題は、AMD+JAM 計算の場合、終状態の位相空間占有率を JAM 内部ではなく AMD で計算することで理想的な計算が可能であることに着想し、計算を実現させた。結果は Physical Review C 101, 034607 (2020) に発表し、精密なパウリブロッキングが S RIT 実験などでの中間子生成（特に荷電中間子比）に重要であることを示した。また、Physical Review C 100, 044617 (2019) では、中間子生成に直結する共鳴や中間子生成過程を模型間で比較するため、箱の中の計算を詳しく分析し、熱平衡で期待される諸量が再現できるかを調査した。その結果、計算処方によっては非物理的な相関が現れることなどがわかり、それを制御することで各コードの改善が得られ、S RIT 実験の荷電中間子比から EOS を得ることも期待できる状況となった。しかしながら、Physics Letters B 813 (2021) 136016 で発表した現実的な重イオン衝突系での結果では、模型依存性が強く現れた。その主な原因は、模型によって ρ や τ のポテンシャルや核子ポテンシャルの運動量依存性の扱いが異なるためだと考えられた。そこで、AMD+JAM にも ρ や τ のポテンシャルを取り入れることが重要と考え、基盤研究(C)21K03528 として、新たなプロジェクトに着手することになった。

[数十～100 MeV/nucleon の重イオン衝突]

フェルミエネルギー領域の重イオン衝突でも、AMD 計算を用いて反応機構の分析や実験データとの比較を進め、クラスター相関の重要性などを明らかにした。例えば、95 MeV/nucleon の $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 衝突では、複数の軽いクラスターが束縛状態を形成し Li や Be な

どの軽い核を作る相関の役割が明らかになった。クラスター間の相関によって、質量数 9 以下の原子核がほぼ基底状態に近い状態で直接生成される傾向があり、これにより生成物のスペクトルや角度分布の実験値を再現できた。結果は Physical Review C 97, 034610 (2018)などで発表した。

また、クラスター相関は、クラスターやフラグメントの生成に直結するだけでなく、自由度の変化によりエネルギー分配を変化させる。あるいは、単純な二核子衝突と比べ、終状態にクラスターを作る過程では運動学が異なる。実際、クラスター相関が反応の全体的様相に強い影響を与え、クラスターやフラグメントの生成の他にも、陽子などのエネルギースペクトルの再現にも重要であることが確かめられた。実験データと比較する共著論文として、Physical Review C 107, 044614 (2023)に発表した。

対称エネルギー $S(\rho)$ の密度依存性を反映する現象として、フェルミエネルギー領域では、各種のアイソスピン輸送現象が注目される。Physical Review C 103, 014603 (2021)では、イタリアのグループの実験データと AMD 計算を比較し、特に、入射核と標的核の中間部分にできるフラグメントのアイソトープ分布を分析した。計算結果には対称エネルギー依存性が見られ、比較的硬い $S(\rho)$ の方が実験データの再現がよいことがわかった。また、陽子中性子非対称度の異なる原子核間のアイソスピン拡散についても、AMD 計算と実験との比較を行い、Physical Review C 103, 014605 (2021)などに発表した。アイソスピン拡散を理論計算でよりよく記述するための要件として、原子核間の粒子移行の適切な取り扱いが今後の課題であろうと考えられる。

[波束の運動量幅の扱い]

本研究において AMD 計算と実験データを比較する過程で明らかになった課題として、S RIT 実験の系での生成粒子の運動量分布やフェルミエネルギー領域でのアイソスピン拡散に関連した粒子移行が挙げられる。これらの問題は、AMD における波束の扱いに関連している可能性が考えられたため、その改良を検討した。AMD では量子力学的な波動関数として波束を用いるため、不確定性関係により運動量にも幅を持つのが当然である。その一方、輸送模型比較に参加したほとんどの模型は、運動量幅を持たない波束を用いており、現実的には機能している。従来の AMD でも、孤立粒子のゼロ点エネルギーをハミルトニアンから差し引く処方により放出粒子は波束の運動量幅を持たないものと解釈しているのであるが、より一貫した扱いへの発展を要する。

そのために、AMD での二核子衝突過程において波束の運動量幅が適切に反映されるように改良した。その結果、クラスターの運動量スペクトルに影響が現れている。現在、論文の投稿を準備中であるが、原子核内の核子の運動量幅を直接反映する例として、入射核から 1 核子が剥ぎ取られた後に残るフラグメントの運動量分布を実験データと比較し、結果が顕著に改善することも確認できている。本研究で明らかになった課題についても、ひとつの方向性として、波束の運動量幅の観点から取り組みたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計23件（うち査読付論文 23件 / うち国際共著 16件 / うちオープンアクセス 23件）

1. 著者名 Frosin C., Piantelli S., Casini G., Ono A., Camaiani A., et al.	4. 巻 107
2. 論文標題 Examination of cluster production in excited light systems at Fermi energies from new experimental data and comparison with transport model calculations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 044614-1 ~ 14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.107.044614	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 該当する

1. 著者名 Ikeno Natsumi, Ono Akira	4. 巻 108
2. 論文標題 Collision integral with momentum-dependent potentials and its impact on pion production in heavy-ion collisions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 044601-1 ~ 18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.108.044601	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 Mukobara Yuta, Sanami Toshiya, Ono Akira, Inakura Tsunenori, Katabuchi Tatsuya, Chiba Satoshi, Ishizuka Chikako	4. 巻 61
2. 論文標題 Mean-field dependence of fragment-production cross sections in heavy-ion induced reactions calculated by antisymmetrized molecular dynamics	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Science and Technology	6. 最初と最後の頁 206 ~ 217
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/00223131.2023.2287102	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 Xu Jun, Wolter Hermann, Colonna Maria, Cozma Mircea Dan, Danielewicz Pawel, Ko Che Ming, Ono Akira, Tsang ManYee Betty, Zhang Ying-Xun, et al.	4. 巻 109
2. 論文標題 Comparing pion production in transport simulations of heavy-ion collisions at 270A MeV under controlled conditions	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 044609-1 ~ 34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.109.044609	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 該当する

1. 著者名 Wolter Hermann, Colonna Maria, Cozma Dan, Danielewicz Pawel, Ko Che Ming, Kumar Rohit, Ono Akira, Tsang ManYee Betty, Xu Jun, Zhang Ying-Xun, et al.	4. 巻 125
2. 論文標題 Transport model comparison studies of intermediate-energy heavy-ion collisions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress in Particle and Nuclear Physics	6. 最初と最後の頁 103962 (1-90)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pnpnp.2022.103962	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 該当する

1. 著者名 Lee J. W., Tsang M. B., Tsang C. Y., Wang R., Barney J., Estee J., Isobe T., Kaneko M., Kurata-Nishimura M., Lynch W. G., Murakami T., Ono A., Souza S. R., et al.	4. 巻 58
2. 論文標題 Isoscaling in central Sn+Sn collisions at 270 MeV/u	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The European Physical Journal A	6. 最初と最後の頁 201 (1-10)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epja/s10050-022-00851-2	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 該当する

1. 著者名 Colonna Maria, Zhang Ying-Xun, Wang Yong-Jia, Cozma Dan, Danielewicz Pawel, Ko Che Ming, Ono Akira, Tsang Manyee Betty, Wang Rui, Wolter Hermann, Xu Jun, Zhang Zhen et al.	4. 巻 104
2. 論文標題 Comparison of heavy-ion transport simulations: Mean-field dynamics in a box	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 024603-1 ~ 25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevc.104.024603	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 該当する

1. 著者名 Kaneko M., Murakami T., Isobe T., Kurata-Nishimura M., Ono A., Ikeno N., Barney J., Cerizza G., Estee J., Jhang G., Lee J.W., Lynch W.G., Santamaria C., Tsang C.Y., Tsang M.B., Wang R. et al.	4. 巻 822
2. 論文標題 Rapidity distributions of Z = 1 isotopes and the nuclear symmetry energy from Sn+Sn collisions with radioactive beams at 270 MeV/nucleon	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136681-1 ~ 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136681	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 該当する

1. 著者名 Ono Akira	4. 巻 826
2. 論文標題 Phase-space consideration on barrier transmission in a time-dependent variational approach with superposed wave packets	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136931-1~7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2022.136931	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 Akira Ono	4. 巻 32
2. 論文標題 Impacts of Cluster Correlations on Heavy-Ion Collision Dynamics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 010076-1~4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/jpscp.32.010076	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 Natsumi Ikeno, Akira Ono, Yasushi Nara, Akira Ohnishi	4. 巻 32
2. 論文標題 Neutron-Proton Dynamics and Pion Production in Heavy-ion Collisions by the AMD+JAM Approach	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 010067-1~4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/jpscp.32.010067	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 A. Camaiani, S. Piantelli, A. Ono, et al.	4. 巻 102
2. 論文標題 Influence of fast emissions and statistical de-excitation on the isospin transport ratio	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 044607-1~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.102.044607	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 該当する

1. 著者名 R. Han, Z. Chen, R. Wada, A. Ono, G. Tian, F. Shi, X. Zhang, B. Liu, H. Sun	4. 巻 102
2. 論文標題 Effects of cluster correlations on fragment emission in C12+C12 at 50 MeV/nucleon	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 034610-1~12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.102.064617	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 該当する

1. 著者名 A. Camaiani, G. Casini, S. Piantelli, A. Ono, et al.	4. 巻 103
2. 論文標題 Isospin diffusion measurement from the direct detection of a quasiprojectile remnant	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 014605-1~13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevc.103.014605	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 該当する

1. 著者名 S. Piantelli, G. Casini, A. Ono, et al.	4. 巻 103
2. 論文標題 Isospin transport phenomena for the systems Kr80+Ca40,48 at 35 MeV/nucleon	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 014603-1~13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevc.103.014603	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 該当する

1. 著者名 G. Jhang, J. Estee, J. Barney, G. Cerizza, M. Kaneko, J.W. Lee, W.G. Lynch, T. Isobe, M. Kurata-Nishimura, T. Murakami, C.Y. Tsang, M.B. Tsang, R. Wang, et al., M. Colonna, D. Cozma, P. Danielewicz, H. Elfner, N. Ikeno, C.M. Ko, J. Mohs, D.Oliinychenko, A. Ono, J. Su, Y.J. Wang, H. Wolter, J. Xu, Y.X. Zhang, Z. Zhang	4. 巻 813
2. 論文標題 Symmetry energy investigation with pion production from Sn+Sn systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136016-1~7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2020.136016	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 該当する

1. 著者名 S. Piantelli, A. Olmi, P. R. Maurenzig, A. Ono, M. Bini, G. Casini, G. Pasquali, A. Mangiarotti, G. Poggi, A. A. Stefanini, S. Barlini, A. Camaiani, C. Ciampi, C. Frosin, P. Ottanelli, and S. Valdre	4. 巻 99
2. 論文標題 Comparison between calculations with the AMD code and experimental data for peripheral collisions of 93Nb + 93Nb, 116Sn at 38 MeV/nucleon	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Rev. C	6. 最初と最後の頁 064616-1 ~ 16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.99.064616	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 該当する

1. 著者名 Akira Ono, Jun Xu, Maria Colonna, Pawel Danielewicz, Che Ming Ko, Manyee Betty Tsang, Yong-Jia Wang, Hermann Wolter, Ying-Xun Zhang, et al.	4. 巻 100
2. 論文標題 Comparison of heavy-ion transport simulations: Collision integral with pions and resonances in a box	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Rev. C	6. 最初と最後の頁 044617-1 ~ 35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.100.044617	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 該当する

1. 著者名 Natsumi Ikeno, Akira Ono, Yasushi Nara, Akira Ohnishi	4. 巻 101
2. 論文標題 Effects of Pauli blocking on pion production in central collisions of neutron-rich nuclei	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. C	6. 最初と最後の頁 034607-1 ~ 9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.101.034607	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 S. Piantelli, G. Casini, A. Ono, et al.	4. 巻 101
2. 論文標題 Dynamical fission of the quasiprojectile and isospin equilibration for the system 80Kr + 48Ca at 35 MeV/nucleon	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. C	6. 最初と最後の頁 034607-1 ~ 12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.101.034613	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 該当する

1. 著者名 Akira Ono	4. 巻 105
2. 論文標題 Dynamics of clusters and fragments in heavy-ion collisions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Prog. Part. Nucl. Phys.	6. 最初と最後の頁 139-179
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pnpnp.2018.11.001	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 G. Tian, Z. Chen, R. Han, F. Shi, F. Luo, Q. Sun, L. Song, X. Zhang, G. Q. Xiao, R. Wada, and A. Ono	4. 巻 97
2. 論文標題 Cluster correlation and fragment emission in $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ at 95 MeV/nucleon	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 034610-1 ~ 13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.97.034610	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 該当する

1. 著者名 Ying-Xun Zhang, Yong-Jia Wang, Maria Colonna, Pawel Danielewicz, Akira Ono, Manye Betty Tsang, Hermann Wolter, Jun Xu et al.	4. 巻 97
2. 論文標題 Comparison of heavy-ion transport simulations: Collision integral in a box	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 034625-1 ~ 20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.97.034625	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 該当する

〔学会発表〕 計23件 (うち招待講演 15件 / うち国際学会 18件)

1. 発表者名 Akira Ono
2. 発表標題 Heavy-ion collisions to study compressed nuclear matter
3. 学会等名 RIKEN Workshop: Giant monopole resonance and related topics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Akira Ono
2. 発表標題 Collision terms with energy conservation in AMD and sJAM
3. 学会等名 RIKEN Workshop: Equation of State of Dense Nuclear Matter at RIBF and FRIB (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Akira Ono
2. 発表標題 When and where are clusters formed in expanding systems?
3. 学会等名 NuSYM23: XIth International Symposium on Nuclear Symmetry Energy (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Akira Ono
2. 発表標題 EOS from expanding and clusterizing matter in heavy-ion collisions
3. 学会等名 Workshop on Equation of State of Dense Nuclear Matter, during DNP-JPS Joint Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小野章
2. 発表標題 分子動力学法における量子統計性
3. 学会等名 大西さん追悼研究会「クォーク・ハドロン・原子核物理の潮流と展望」(招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Akira Ono
2. 発表標題 Exploring EOS in heavy-ion collisions with transport models
3. 学会等名 Pioneering Session on the Equation of State of Nuclear Matter, Spring Meeting of the Korean Physical Society (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小野章, 池野なつ美
2. 発表標題 重イオン衝突での 中間子生成に関する 共鳴の閾値効果
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 池野なつ美, 小野章
2. 発表標題 重イオン衝突における 中間子生成と高密度対称エネルギー
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 A. Ono
2. 発表標題 Light clusters in dynamic evolution of heavy-ion collisions
3. 学会等名 NuSYM21: International Symposium on Nuclear Symmetry Energy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A. Ono
2. 発表標題 Transport model approach for clusters in heavy-ion collision dynamics
3. 学会等名 IWM-EC 2021: International Workshop on Multi-facets of EOS and Clustering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Akira Ono
2. 発表標題 Pauli and cluster correlations
3. 学会等名 ECT* Workshop "Challenges to Transport Theory for Heavy-Ion Collisions" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akira Ono
2. 発表標題 AMD+JAM and pion homework
3. 学会等名 Meeting on Heavy-Ion Transport Code Comparison (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akira Ono
2. 発表標題 Effects of cluster correlations and symmetry energy in heavy-ion collisions
3. 学会等名 NuSYM2019: 9th International Symposium on Nuclear Symmetry Energy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akira Ono
2. 発表標題 Pauli blocking effects on pion production in AMD+JAM approach
3. 学会等名 International Workshop on Nuclear Dynamics in Heavy-Ion Reactions (IWND2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akira Ono
2. 発表標題 Interplay between cluster correlations and collision dynamics
3. 学会等名 NuSYM18: 8th International Symposium on Nuclear Symmetry Energy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akira Ono
2. 発表標題 Summary of HW3 results
3. 学会等名 Transport Workshop 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Natsumi Ikeno
2. 発表標題 Pauli blocking effects on pion production in heavy-ion collisions
3. 学会等名 NuSYM18: 8th International Symposium on Nuclear Symmetry Energy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akira Ono
2. 発表標題 Impacts of cluster correlations on heavy-ion collision dynamics
3. 学会等名 NN2018: 13th International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akira Ono
2. 発表標題 Light clusters and light nuclei in collision dynamics
3. 学会等名 7th International Symposium on Nuclear Symmetry Energy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Akira Ono
2. 発表標題 Status of HW3 -- Pion Production
3. 学会等名 7th International Symposium on Nuclear Symmetry Energy (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Natsumi Ikeno
2. 発表標題 Pauli blocking effects on pion production in central collisions of neutron-rich nuclei
3. 学会等名 7th International Symposium on Nuclear Symmetry Energy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 池野なつ美, 小野章, 奈良寧, 大西明
2. 発表標題 中性子過剰な原子核衝突における 中間子生成に対するパウリブロッキング効果
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小野章
2. 発表標題 輸送模型計算における 生成
3. 学会等名 新学術領域「中性子星核物質」理論班主催研究会2018
4. 発表年 2018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			
米国	Michigan State University	Texas A&M University		
中国	Shanghai Advanced Research Institute	China Institute of Atomic Energy	Sun Yat-sen University	他5機関
ドイツ	University of Munich	GSI		
イタリア	INFN-LNS			
ルーマニア	IFIN-HH			

共同研究相手国	相手方研究機関			
イタリア	INFN Firenze	INFN-LNS		