

# 量子クラスターで読み解く物質の階層構造

領域番号:6005

平成30年度～令和4年度  
科学研究費助成事業(科学研究費補助金)  
(新学術領域研究(研究領域提案型))  
研究成果報告

令和6年6月  
領域代表者:中村隆司  
東京工業大学 理学院物理学系 教授

## はしがき

クォーク・ハドロン・原子核・原子・分子という微視的物質の階層構造がなぜ存在するのかという問いは、自然科学の根源的問題でありながら従来あまり議論されてこなかった。これは各階層が完全に分離しているように見え、その間に関連性が見られなかったからである。一方で、「クラスター」という概念の中に、階層の垣根を越えるある種の共通点が認識されるようになった。本領域は、我が国が世界をリードするハドロン物理、原子核物理、原子物理、分子科学分野の研究者の力を結集し、物質階層間の分野の壁を越えた連携研究を実現し、この問題に挑んだものである。本研究の目的は、異なる階層間の境界に現れるクラスター現象に焦点を当てて研究を進め、スケールの異なる物質を支配する普遍的な量子多体系の法則を見出すとともに、普遍性からのずれを理解し各物質階層の研究を深化させることであった。そして、物質の階層構造の起源にせまる新しい融合分野の創成を目標とした。

本研究は、全体会合でもある「クラスター階層領域研究会」、一つのテーマを深掘りして徹底的に議論する「物質階層を横断する会」、海外から講師を招聘して行う「国際レクチャーシリーズ」などを幾度も重ね、若手研究者の育成と異分野間の研究交流を進めた。このような取り組みもあって、原子核分野での「3体核力」研究が原子分野での「多体力」研究に実を結ぶなど、物質階層を超えたさまざまな研究が進んだ。また、多中性子クラスターや中間子原子核などの新奇クラスターの発見や、ハイペロン核子相互作用の精密測定などクラスター間力に関する研究、第一原理計算や量子色力学に基づく理論研究、冷却原子系を用いた量子シミュレーターの実現など、本領域で進めた研究が飛躍的に進展した。物質階層という分野の垣根を超え、俯瞰的視点で微視的物質を研究する土台の構築に成功したと言える。

## 研究組織

領域代表： 中村隆司(東京工業大学 理学院 教授)

### 計画研究

(総括班)

研究代表者：中村隆司(東京工業大学 理学院 教授)

(A01 班)

研究代表者：志垣賢太(広島大学 先進理工系科学研究科 教授)

研究分担者：濱垣秀樹(長崎総合科学大学 新技術創成研究所 特命教授)

研究分担者：中條達也(筑波大学 数理物質系 講師)

研究分担者：郡司卓(東京大学 大学院理学系研究科 准教授)

(A02 班)

研究代表者：大西宏明(東北大学 電子光理学研究センター 教授)

研究分担者：野海博之(大阪大学 核物理研究センター 教授)

研究分担者：與曾井優(大阪大学 核物理研究センター 特任教授)

研究分担者：新山雅之(京都産業大学 理学部 准教授)

研究分担者：青木和也(大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構, 素粒子原子核研究所, 研究機関講師)

研究分担者：兵藤哲雄(東京都立大学 理学研究科 准教授)

研究分担者：成木恵(京都大学 理学研究科 教授)

(B01 班)

研究代表者:田村裕和(東北大学 理学研究科 教授)

研究分担者:永江知文(京都大学 理学研究科 教授)

研究分担者:高橋俊行(大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 教授)

研究分担者:三輪浩司(東北大学 理学研究科 教授)

(B02 班)

研究代表者:中村隆司(東京工業大学 理学院 教授)

研究分担者:近藤洋介(東京工業大学 理学院 助教)

研究分担者:若狭智嗣(九州大学 理学研究院 教授)

研究分担者:梅野泰宏(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 協力研究員)

研究分担者:関口仁子(東京工業大学 理学院 教授)

(C01 班)

研究代表者:高橋義朗(京都大学 理学研究科 教授)

研究分担者:西田祐介(東京工業大学 理学院 教授)

(C02 班)

研究代表者:堀越宗一(大阪公立大学 大学院理学研究科 准教授)

研究分担者:大橋洋士(慶應義塾大学 理工学部 教授)

研究分担者:田島裕之(東京大学 大学院理学系研究科(理学部), 助教)

研究分担者:飯田圭(高知大学 教育研究部自然科学系理工学部門 教授)

(D01 班)

研究代表者:肥山詠美子(東北大学 理学研究科 教授)

研究分担者:保坂淳(大阪大学 核物理研究センター 教授)

研究分担者:金賢得(京都大学 理学研究科 助教)

研究分担者:金田佳子(京都大学 理学研究科 准教授)

研究分担者:NAIDON PASCAL(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 専任研究員)

研究分担者:土井琢身(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 専任研究員)

公募研究:

平成 31 年度-令和 2 年度

研究代表者:加藤悠司(名古屋大学 助教)

研究代表者:白鳥昂太郎(大阪大学 核物理研 助教)

研究代表者:宮林謙吉(奈良女子大学 自然科学系 教授)

研究代表者:石川貴嗣(東北大学 電子光理学研究センター 助教)

研究代表者:仲澤和馬(岐阜大学 教育学部 教授)

研究代表者:堂園昌伯(東京大学 大学院理学系研究科 特任助教)

研究代表者:川畑貴裕(大阪大学 理学系 教授)

研究代表者:小林淳(北海道大学 工学研究院 准教授)

研究代表者:堀内涉(北海道大学 理学系 講師)

研究代表者:竹内一将(東京大学 大学院理学系研究科(理学部) 准教授)

研究代表者:中務孝(筑波大学 計算科学研究センター 教授)

研究代表者:大塚孝治(東京大学 大学院理学系研究科(理学部) 名誉教授)

研究代表者:江尻信司(新潟大学 自然科学系 准教授)

研究代表者:兵藤哲雄(東京都立大学, 理学研究科, 准教授)

研究代表者:大西明(京都大学 基礎物理学研究所 教授)

研究代表者:立川仁典(横浜市立大学 データサイエンス学部 教授)

研究代表者:鹿野豊(慶應義塾大学 理工学研究科 特任准教授)

研究代表者:岡真(国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門  
原子力科学研究所 先端基礎研究センター センター長)

令和3年度-令和4年度

研究代表者:佐甲博之(国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門  
原子力科学研究所 先端基礎研究センター 研究主幹)

研究代表者:高橋智則(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 協力研究員)

研究代表者:石川貴嗣(大阪大学 核物理研究センター 教授)

研究代表者:富田夏希(京都大学 理学研究科 特定助教)

研究代表者:藤岡宏之(東京工業大学 理学院 准教授)

研究代表者:橋本直(国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門  
原子力科学研究所 先端基礎研究センター 研究職)

研究代表者:市川裕大(国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門  
原子力科学研究所 先端基礎研究センター 研究職)

研究代表者:山本剛史(国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門  
原子力科学研究所 先端基礎研究センター 研究職)

研究代表者:本多良太郎(大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所  
准教授)

研究代表者:足立智(東北大学 サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター 助教)

研究代表者:木村真明(北海道大学 理学研究院 教授)

研究代表者:山下琢磨(東北大学 高度教養教育・学生支援機構 助教)

研究代表者:遠藤晋平(東北大学 理学研究科 助教)

研究代表者:大塚孝治(東京大学 大学院理学系研究科(理学部) 名誉教授)

研究代表者:萩野浩一(京都大学 理学研究科 教授)

研究代表者:大西明(京都大学 基礎物理学研究所 教授)

研究代表者:浅川正之(大阪大学 大学院理学研究科 教授)

研究代表者:緒方一介(九州大学 理学研究院 教授)

研究代表者:船木靖郎(関東学院大学 理工学部 准教授)

研究代表者:岡真(国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門  
原子力科学研究所 先端基礎研究センター 客員研究員)

## 交付決定額(配分額)

年度	合計	直接経費	間接経費
平成 30 年度	318,760,000 円	245,200,000 円	73,560,000 円
令和元年度	301,990,000 円	232,300,000 円	69,690,000 円
令和 2 年度	298,480,000 円	229,600,000 円	68,880,000 円
令和 3 年度	294,580,000 円	226,600,000 円	67,980,000 円
令和 4 年度	289,120,000 円	222,400,000 円	66,720,000 円
合計	1,502,930,000 円	1,156,100,000 円	346,830,000 円

## 研究発表

### 学術雑誌論文(代表的論文の抜粋)

1. S.Acharya, T.Chujo, T.Gunji, H.Hamagaki, K.Shigaki, *et al.* (ALICE Collaboration), “Measurement of anti-<sup>3</sup>He nuclei absorption in matter and impact on their propagation in the Galaxy Scattering studies with low-energy kaon-proton femtoscopy in proton-proton collisions at the LHC”, *Nature Phys.* **19**, 61-71 (2023). 査読有
2. S.Acharya, T.Chujo, T.Gunji, H.Hamagaki, K.Shigaki, *et al.* (ALICE Collaboration), “Direct observation of the dead-cone effect in quantum chromodynamics”, *Nature* **605**, 440-446 (2022). 査読有
3. S.Acharya, T.Chujo, T.Gunji, H.Hamagaki, K.Shigaki, *et al.* (ALICE Collaboration), “Unveiling the strong interaction among hadrons at the LHC”, *Nature* **588**, 232-238 (2020). 査読有
4. S.Acharya, T.Chujo, T.Gunji, H.Hamagaki, K.Shigaki, *et al.* (ALICE Collaboration), “Scattering studies with low-energy kaon-proton femtoscopy in proton-proton collisions at the LHC”, *Phys. Rev. Lett.* **124**, 092301(2020). 査読有
5. S.Acharya, T.Chujo, T.Gunji, H.Hamagaki, K.Shigaki, *et al.* (ALICE Collaboration), “Measurement of Y(1S) elliptic flow at forward rapidity in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV”, *Phys. Rev. Lett.* **123**, 192301 (2019). 査読有
6. S.Acharya, T.Chujo, T.Gunji, H.Hamagaki, K.Shigaki, *et al.* (ALICE Collaboration), “First Observation of an Attractive Interaction between a Proton and a Cascade Baryon”, *Phys. Rev. Lett.* **123**, 112002 (2019). 査読有
7. S.Acharya, T.Chujo, T.Gunji, H.Hamagaki, K.Shigaki, *et al.* (ALICE Collaboration), “Investigations of Anisotropic Flow Using Multiparticle Azimuthal Correlations in pp, p-Pb, Xe-Xe, and Pb-Pb Collisions at the LHC”, *Phys. Rev. Lett.* **123**, 142301 (2019). 査読有
8. I.W. Park, H. Sako, K. Aoki, P. Gubler, and S.H. Lee, “Disentangling longitudinal and transverse modes of the phi meson through dilepton and kaon decays”, *Phys. Rev. D* **107**, 074033 (2023). 査読有
9. S. Aikawa, T. Nagae, \*H. Noumi, H. Ohnishi, *et al.* “Pole position of  $\Lambda(1405)$  measured in  $d(K^-,n)\pi\Sigma$  reactions” *Phys. Lett. B* **837**, 137637 (1-8) (2023). 査読有
10. \*T. Hashimoto, H. Noumi, H. Ohnishi, *et al.*, “Measurements of Strong-Interaction Effects in Kaonic-Helium Isotopes at Sub-eV Precision with X-Ray Microcalorimeters”, *Phys. Rev. Lett.* **128**, 112503(2022). 査読有
11. \*T. Yamaga, T. Nagae, H. Noumi, H. Ohnishi, *et al.*, “Observation of a  $K\bar{K}n$  bound state in the  $^3\text{He}(K^-, \Lambda p)n$  reaction”, *Phys. Rev. C* **102**, 044002. 査読有
12. \*R. Honda, H. Noumi, *et al.*, “Continuous timing measurement using a data-streaming DAQ system”, *Prog. Theo. Exp. Phys.*, **2021**, 12, 123H01(2021). 査読有
13. \*H. Ohnishi, \*F. Sakuma and T. Takahashi, “Hadron Physics at J-PARC”, *Prog. Part. Nucl. Phys.* **113** 103773 (1-51) (2020). 招待レビュー記事, 査読有

14. \*N. Muramatsu, J.K. Ahn, W.C. Chang, H. Ohnishi, M. Yosoi, et al, “Measurement of neutral pion photoproduction off the proton with the large acceptance electromagnetic calorimeter BGOegg”, Phys. Rev. C **100**, 055202 (2019). 査読有
15. \*S. Ajimura, T. Nagae, H. Noumi, H. Ohnishi, \*T. Yamaga et al., ““K<sup>-</sup>pp”, a K<sup>-</sup>-Meson Nuclear Bound State, Observed in 3He(K<sup>-</sup>Δp)n Reactions”, Phys. Lett. B **789**, 620 (2019). 査読有
16. \*T. Ishikawa, et al., “Coherent photoproduction of the neutral-pion and η-meson on the deuteron at incident energies below 1.15 GeV”, Phys. Rev. C **105**, 045201 (2022). 査読有
17. \*T. Ishikawa, H. Fujimura, H. Fukasawa, R. Hashimoto, Q. He, et al., “Resonance-like structure near the ηd threshold in the γd→π<sup>0</sup>ηd reaction”, Phys. Rev. C **104**, L052201 (2021). 査読有
18. \*T. Ishikawa, et al., “An scattering parameters and possible ηd bound state from η photoproduction on the deuteron”, Acta Phys. Polon. **51**, 27 (2020). 査読有
19. T. J. Moon, Y. Kato et al. (Belle Collaboration), First determination of the spin and parity of the charmed-strange baryon Ξ<sub>c</sub>(2970)<sup>+</sup>, Phys. Rev. D **103**, L111101(2021). 査読有
20. K. Chilikin, K. Miyabayashi, et al. (Belle collaboration), “First search for the h<sub>c2</sub>(1D) in B decays at Belle” JHEP2005, 034 (2020 May 08). 査読有
21. \*K. Shirotori, “Hadron spectroscopy with high-momentum hadron beams”, JPS Conf. Proc. **33** (2021) 011115, 10.7566/JSPSC.33.011115 査読有 \*J. K. Ahn, T. Takahashi et al., “Superconducting dipole magnet for Hyperon spectrometer”, Nucl. Instrum. Meth. A **1047**, 167775 (2023) 査読有.
22. \*K. Miwa, T. Takahashi, H. Tamura et al., “Precise measurement of differential cross sections of the Σ<sup>-</sup>p→Λn reaction in momentum range 470-650 MeV/c”, Phys. Rev. Lett. **128**, 072501 (2022) 査読有
23. \*T. Nanamura, K. Miwa, T. Takahashi, H. Tamura et al., “Measurement of differential cross sections for Σ<sup>+</sup>p elastic scattering in the momentum range 0.44–0.80 GeV/c”, Prog. Theor. Exp. Phys. **2022**, 093D01 (2022) 査読有.
24. \*M. Fujita, H. Tamura et al., “Ξ<sup>-</sup> atomic X-ray spectroscopy using a counter-emulsion hybrid method”, Prog. Theor. Exp. Phys. **2022**, 123D01 (2022) 査読有.
25. \*K. Miwa, T. Takahashi, H. Tamura, et al., “Measurement of the differential cross sections of the Σ<sup>-</sup>p elastic scattering in momentum range 470 to 850 MeV/c”, Phys. Rev. C **104**, 045204 (2021) 査読有.
26. \*S. Hayakawa, T. Takahashi, H. Tamura et al., “Observation of Coulomb-Assisted Nuclear Bound State of Ξ<sup>-</sup><sup>14</sup>N System”, Phys. Rev. Lett. **126**, 062501 (2021) 査読有.
27. \*M. Yoshimoto, T. Takahashi, H. Tamura et al., “First observation of a nuclear s-state of a Ξ hypernucleus, <sup>15</sup>ΞC”, Prog. Theor. Exp. Phys. **2021**, 7 (2021).
28. \*Y. Ichikawa, K. Miwa, T. Nagae, T. Takahashi, H. Tamura et al., “An event excess observed in the deeply bound region of the <sup>12</sup>C(K<sup>-</sup>,p) missing-mass spectrum”, Prog. Theor. Exp. Phys **2020**, 123D01 (2020) 査読有.
29. \*H. Fujioka et al., “Production of light Ξ-hypernuclei, 7ΞH” EPJ Web Conf. **271**, 03004 (2022). 査読有
30. \*R. Honda, “New Clock Distribution System Based On Clock-Duty-Cycle-Modulation For Distributed Data Aquisition System”, IEEE Trans. Nucl. Science, **70**, 1102-1109 (2023). 査読有.
31. \*T.O. Yamamoto et. al, X-ray spectroscopy experiments on exotic Xi atoms at J-PARC, PoS **380** (2022) 211. DOI: 10.22323/1.380.0211 査読有.
32. \*H. Ekawa, K. Nakazawa et al., “Observation of a Be double-Lambda hypernucleus in the J-PARC E07 experiment”, Prog. Theor. Exp. Phys. **2019**, 021D02 (1-11) (2019) 査読有.
33. \*Nakazawa, K., “Experimental Aspect of S = -2 Hypernuclei”, In: Tanihata, I., Toki, H., Kajino, T. (eds) *Handbook of Nuclear Physics*, Springer, Singapore (2023). 査読有
34. \*Y. Kondo, T. Nakamura, et al., “First Observation of <sup>28</sup>O”, Nature **620**, 965-970 (2023). 査読有
35. \*H.N.Liu, Y.Kondo, T.Nakamura, et al., “STRASSE: A Silicon Tracker for Quasi-free Scattering Measurements at the RIBF”, Eur. Phys. J. A **59**, 121 (26p) (2023). 査読有
36. \*T. Wakasa, et al., “Neutron-skin values and matter and neutron radii determined from reaction cross sections of proton scattering on <sup>12</sup>C, <sup>40,48</sup>Ca, <sup>58</sup>Ni, and <sup>208</sup>Pb”, Phys. Rev. C **107**, 024608 (2023). 査読有
37. \*M. Duer, Y. Kondo, T. Nakamura, et al., “Observation of a correlated four-neutron system”, Nature **606**, 678-682 (2022). 査読有
38. \*A. Watanabe, S. Nakai, K. Sekiguchi, et al., “Spin correlation coefficient for proton-<sup>3</sup>He elastic scattering at 100 MeV”, Phys. Rev. C **106**, 054002 (1-9) (2022). 査読有

39. \*Y.L. Sun, T. Nakamura, Y. Kondo, et al., “Three-body breakup of  ${}^6\text{He}$  and its halo structure”, Phys. Lett. B **814**, 136072 (1-8) (2021). 査読有
40. \*A. Watanabe, S. Nakai, Y. Wada, K. Sekiguchi, et al., “Proton- ${}^3\text{He}$  elastic scattering at intermediate energies”, Phys. Rev. C **103**, 044001 (1-9) (2021). **Editors’ Suggestion** 査読有
41. \*K.J. Cook, T. Nakamura, Y. Kondo, et al., “Halo Structure of the Neutron-Dripline Nucleus  ${}^{19}\text{B}$ ”, Phys. Rev. Lett. **124**, 212503 (2020). **Editors’ Suggestion** 査読有
42. \*Y. Kondo, T. Tomai, T. Nakamura, “Recent progress and developments for experimental studies with the SAMURAI spectrometer”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B **463**, 173-178 (2020), 査読有
43. \*K. Sekiguchi, “Experimental approach to three-nucleon forces via three- and four-nucleon scattering”, Few-Body Systems **60**, pp.56:1-5 (2019). 査読有
44. \*S. Adachi, T. Kawabata et al., “Candidates for the  $5\alpha$  condensed state in  ${}^{20}\text{Ne}$ ”, Phys. Lett. B **819**, 136411 (2021). 査読有
45. \*F. Schäfer, Y. Haruna, \*Y. Takahashi, “Observation of Feshbach Resonances in an  ${}^{167}\text{Er}$ - ${}^6\text{Li}$  Fermi-Fermi Mixture”, J. Phys. Soc. **92**, 054301 (1-4) (2023). 査読有
46. T. Ishiyama, \*K. Ono, T. Takano, A. Sunaga, and Y. Takahashi, “Observation of an Inner-Shell Orbital Clock Transition in Neutral Ytterbium Atoms”, Phys. Rev. Lett. **130**, 15, 153402(1-6) (2023). 査読有
47. \*F. Schäfer, Y. Haruna, and \*Y. Takahashi, “Realization of a quantum degenerate mixture of highly-magnetic and nonmagnetic atoms”, Phys. Rev. A **107**, L031306(1-5) (2023). 査読有
48. \*K. Ono, Y. Takahashi, et al. , “Observation of Nonlinearity of Generalized King Plot in the Search for New Boson”, Phys. Rev. X **12**, 2, 021033 (1-17) (2022). 査読有
49. \*F. Schäfer, N. Mizukami, and Y. Takahashi, “Feshbach resonances of large-mass-imbalance Er-Li mixtures”, Phys. Rev. A **105**, 012816(1-7) (2022). 査読有
50. \*K. Ono, T. Higomoto, Y. Saito, S. Uchino, Y. Nishida, and Y. Takahashi, “Observation of spin-space quantum transport induced by an atomic quantum point contact”, Nature Com. **12**, 6724(1-8) (2021). 査読有
51. \*D. Kagamihara, H. Tajima, Y. Ohashi, et al. “Isothermal compressibility and effects of multibody molecular interactions in a strongly interacting ultracold Fermi gas”, Phys. Rev. A **106**, 033308 (2022). 査読有
52. \*H. Tajima, S. Tsutsui, T. M. Doi, and K. Iida, “Cooper triples in attractive three-component fermions: Implication for hadron-quark crossover,” Phys. Rev. Research **4**, L012021 (2022).
53. \*D. Kagamihara, Y. Ohashi, “Kovtun-Son-Starinets conjecture and Effects of Mass Imbalance in the Normal State of an Ultracold Fermi Gas in the BCS-BEC Crossover Region”, J. Phys. Soc. Jpn. **89** (2020), 044005. 査読有
54. \*Y. Ohashi, H. Tajima, and Pieter van Wyk, "BCS-BEC crossover in cold atomic and in nuclear systems", Progress in Particle and Nuclear Physics **111**, 103739 (2020). 査読有
55. \*K. Iida, E. Itou, and T.-G. Lee, "Two-colour QCD phases and the topology at low temperature and high density", J. of High Energy Physics 2020, **181**(1-21) (2020). 査読有
56. D. Kagamihara, D. Inotani, and \*Y. Ohashi, "Shear Viscosity and Strong-Coupling Corrections in the BCS-BEC Crossover Regime of an Ultracold Fermi Gas", J. Phys. Soc. Jpn **88**, 114001(10),2019. 査読有.
57. J. Takahashi, R. Imai, E. Nakano, and \*K. Iida, "Bose polaron in spherical trap potentials: Spatial structure and quantum depletion", Phys. Rev. A **100**, 23624(1-9) (2019). 査読有
58. \*M. Horikoshi and M. Kuwata-Gonokami, “Cold Atom Quantum Simulator for Dilute Neutron Matter”, International Journal of Modern Physics E, **28**, 1930001 (2019). 査読有
59. \*Lai Hnin Phyu, H. Moriya, W. Horiuchi, K. Iida, K. Noda, and M. T. Yamashita, Coulomb screening correction to the Q value of the triple-alpha process in thermal plasmas, Prog. Theor. Exp. Phys. **2020**, 093D01 (2020). 査読有
60. \*S. Satsuka and W. Horiuchi, “Emergence of nuclear clustering in electric-dipole excitations of  ${}^6\text{Li}$ ”, Phys. Rev. C **100**, 024334-1-12 (2019). 査読有
61. \*R. Lazauskas, E. Hiyama, and J. Carbonell, “Low Energy Structures in Reactions with  $4n$  in the Final state”, Phys. Rev. Lett. **130**, 102501 (2023). 査読有.
62. \*Y. Lyu, T. Doi, et al., “Optimized two-baryon operators in lattice QCD”, Phys. Rev. D **105**, 074512(7) (2022). 査読有

63. \*[E. Hiyama](#), K. Sasaki, T. Miyamoto, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Yamamoto, "Possible Lightest  $\Xi$  hypernucleus with Modern  $\Xi N$  interaction", Phys. Rev. Lett. **124**, 092501 (2020). 査読有
64. \*Y. Yamaguchi, H. Garcia-Tecocoatzi, A. Giachino, [A. Hosaka](#) et al., "Pc pentaquarks with chiral tensor and quark dynamics, Phys. Rev. D**101**, 09152702(R) (2020). 査読有
65. \*S. Yamaoka and [H-D. Kim](#), "Decelerated Liquid Dynamics Induced by Component-Dependent Supercooling in Hydrogen and Deuterium Quantum Mixtures", J. Phys. Chem. Lett. **11**, 4186 (2020). 査読有
66. \*K. Sasaki, S. Aoki, [T. Doi](#), et al., " $\Lambda\Lambda$  and  $N\Xi$  interactions from Lattice QCD near the physical points", Nucl. Phys. A **998**, 121737 (2020). 査読有
67. \*Q. Meng, [E. Hiyama](#), K. U. Can, P. Gubler, [M. Oka](#), [A. Hosaka](#), H. Zong, "Compact  $ssscc^-$  pentaquark states predicted by a quark model", Phys. Lett. B **798**, 135028 (2019). 査読有
68. \*[Y. Kanada-En'yo](#), Y. Shikata, "Isoscalar dipole excitations in  $^{16}\text{O}$ ", Phys. Rev. C **100**, 014301 (2019) 査読有
69. \*[Y. Kanada-En'yo](#), K. Ogata, "Microscopic calculation of inelastic proton scattering of  $^{18}\text{O}$ ,  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{12}\text{Be}$ , and  $^{16}\text{C}$  for study of neutron excitation in neutron-rich nuclei", Phys. Rev. C **100**, 064616 (2019). 査読有
70. \*T. Iritani, S. Aoki, [T. Doi](#), et al., " $N\Omega$  dibaryon from lattice QCD near the physical point", Phys. Lett. B **792**, 284 (2019). 査読有
71. \*[P. Naidon](#), L. Pricoupenko, "Width and shift of Fano-Feshbach resonances for van der Waals Interactions", Phys. Rev. A **100**, 042710 (2019). 査読有
72. \*E. Kido, [M. Kimura](#) et al., Evaluations of uncertainties in simulations of propagation of ultrahigh-energy cosmic-ray nuclei derived from microscopic nuclear models, Astro particle Physics **152**, 102866 (2023). 査読有
73. \*T. Miura, Y. Akamatsu, \*[M. Asakawa](#), Y. Kaida, "Simulation of Lindblad equations for quarkonium in the quark-gluon plasma," Phys. Rev. D **106**, 074001(1-12) (2022). 査読有
74. \*[T. Otsuka](#), et al., " $\alpha$ -Clustering in atomic nuclei from first principles with statistical learning and the Hoyle state character", Nature Com. **13**, 2234 (2022). 査読有
75. Y. Kim, \*[M. Oka](#), K. Suzuki, "Doubly heavy tetraquarks in a chiral-diquark picture", Phys. Rev. D **105**, 074021-1-17 (2022). 査読有
76. \*K. Uzawa, [K. Hagino](#), K. Yoshida, "Microscopic description of cluster decays based on the generator coordinate method", Phys. Rev. C **105** (2022) 034326. 査読有
77. \*Y. Chazono, K. Yoshida, [K. Ogata](#), "Importance of deuteron breakup in the deuteron knockout reaction", Phys. Rev. C **106**, 064613 (2022). 査読有
78. \*[T. Yamashita](#), Y. Kino, [E. Hiyama](#), et al., "Near-threshold behavior of positronium-antihydrogen scattering cross sections", Phys. Rev. A **105**, 052812 (2022). Editor's suggestion 査読有
79. \*K. Wen, [T. Nakatsukasa](#), "Microscopic collective inertial masses for nuclear reaction in the presence of nucleonic effective mass" Phys. Rev. C **105** (2022) 034603. 査読有
80. \*T. Kinugawa, [T. Hyodo](#), Structure of exotic hadrons by a weak-binding relation with finite-range correction, Phys. Rev. C **106**, 015205 (2022). 査読有
81. \*[船木靖郎](#) 「原子核中に起こるアルファ凝縮とクラスター構造形成の動力学」、日本物理学会誌「解説」**77**, 602-610, 2022年9月号. 査読有
82. Q. Meng, M. Harada, [E. Hiyama](#), [A. Hosaka](#), \*[M. Oka](#), "Doubly heavy tetraquark resonant states", Phys. Lett. B **824**, 136800-1-5 (2021). 査読有
83. \*K. Washiyama, N. Hinohara, [T. Nakatsukasa](#), "Finite-amplitude method for collective inertia in spontaneous fission", Phys. Rev. C **103**, 014306 (2021). 査読有
84. \*T. Naito, [S. Endo](#), [K. Hagino](#), Y. Tanimura, "On deformability of atoms-comparative study between atoms and atomic nuclei", J. Phys. B **54**, 165201 (2021). 査読有
85. \*[S. Ejiri](#), et al., (WHOT-QCD Collaboration), "End point of the first-order phase transition of QCD in the heavy quark region by reweighting from quenched QCD", Phys. Rev. D **101**, 054505 (2020). 査読有
86. \*Y. Kamiya, [T. Hyodo](#), K. Morita, [A. Ohnishi](#), W. Weise, K-p correlation function from high-energy nuclear collisions and chiral SU(3) dynamics, Phys. Rev. Lett. **124**, 132501 (2020). 査読有
87. \*K. Morita, S. Gongyo, T. Hatsuda, [T. Hyodo](#), Y. Kamiya, \*[A. Ohnishi](#), "Probing  $\Omega\Omega$  and  $p\Omega$  dibaryons with femoscopic correlations in relativistic heavy-ion collisions", Phys. Rev. C **101**, 015201 (1-10) (2020). **Editors' Suggestion**, 査読有



88. M.Harada, Y.-R. Liu, M.Oka, K. Suzuki, “Chiral effective theory of diquarks and  $U_A(1)$  anomaly”, Phys. Rev. D **101**, 054038 (2020). 査読有
89. \*A. Io, T. Kawatsu, \*M. Tachikawa, "Quantum Stabilization of the Frustrated Hydrogen Bonding Structure in the Hydrogen Fluoride Trimer ", J. Phys. Chem. A, **123**, 7950-7955 (2019). Cover Image, 査読有
90. \*T. Otsuka, et al., “Underlying Structure of Collective Bands and Self-Organization in Quantum Systems”, Phys. Rev. Lett., **123**, 222502 (2019). **Editors’ Suggestion** 査読有

#### 学会発表 (主な招待講演について抜粋)

91. T. Nakamura “Spectroscopy of nuclei near and beyond the neutron dripline”, ETC\* Workshop on Nuclear Physics at the Edge of Stability (2022.7 Trento, Italy, Online), 招待講演
92. T. Nakamura “Summary Talk”, The 11<sup>th</sup> International Conference on Direct Reactions with Exotic Beams (DREB2022) (2022.7 Santiago de Compostela, Spain), 招待講演
93. T. Nakamura “Spectroscopy of neutron dripline nuclei”, Symposium: Developments of Physics of Unstable Nuclei (YKIS2022b) (2022.5 Kyoto University) 招待講演
94. K. Shigaki, “Heavy Ion Physics in the Future in the Highest Energy Regime”, Korean Physics Society symposium (2018/10/25, Changwon, South Korea). 招待講演
95. S.Y. Ryu “Hadron physics with polarized photons at LEPS/LEPS2”, EMMI Workshop on New Vistas in Photon Physics in Heavy-Ion Collisions, 2022.9.19-22, Krakow, Poland. 招待講演
96. H. Noumi, “Studies of excited baryons with heavy flavors at J-PARC”, APCTP WS on Nuclear Physics 2022: Phys. of Excited Hadrons in the Present and Future Facilities, Jeju, Korea, July, 2022. 招待講演
97. H. Tamura, “Strangeness Nuclear Physics”, The 8<sup>th</sup> International Conference on Quarks and Nuclear Physics, (2018/11/13-17, Tsukuba Japan) 招待講演
98. T. Nagae, “ $\Xi$  hypernuclei at J-PARC”, Few-Body 22 Conference, (2018/7/9-13, CAEN, France) 招待講演
99. T. Nakamura, “Exploring neutron-rich extremes of the nuclear landscape”, UK Nuclear Physics Conference (IOP), (2023/4/4-6, York, UK.) 招待講演
100. K. Sekiguchi, “Exploring Three-Nucleon Forces via Three- and Four-Nucleon Scattering”, the 24th European Conference on Few Body Problems in Physics, (2019/9/2-6, Guilford, United Kingdom) 招待講演
101. Y. Takahashi, “Quantum simulation using ultracold ytterbium in an optical lattice”, US-Japan QELS-13 (the 13th Japan-US Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy) (2018/9, Kanazawa, Japan) 招待講演
102. Y. Takahashi, “Quantum magnetism of ultracold ytterbium Fermi gases in an optical lattice”, 7th International Workshop on Ultra-cold Group II Atoms (2018/09, Beijing, China) 招待講演
103. J. Kobayashi, “Test for the stability of the electron-to-proton mass ratio using ultracold molecules”, 12th Int. Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2020) 招待講演 (2020/01/9-10 RIKEN, Japan)
104. M. Horikoshi, “Study of excited cluster states using Feshbach molecules”, ECT\* workshop “Universal physics in Many-Body Quantum Systems – From Atoms to Quarks”, (2019/10, Villazzano, Italy) 招待講演
105. M. Horikoshi, “The equation of state for Fermi gases in the unitary regime”, International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2019 (SCES '19) (2019/9/27, Okayama, Japan) 招待講演
106. M. Horikoshi, “Cold Atom Experiments for Cold High-Energy Physics”, HKUST IAS Focused workshop on “Quantum simulation of novel phenomena with ultracold atoms” (2019/5/7, Hong Kong) 招待講演
107. P. Naidon, “QCD-like phase diagram of resonantly interacting SU(3) Fermi gases”, Workshop "Universal physics in Many-Body Quantum Systems - From Atoms to Quarks" (2019/10/7-11, ECT\*, Trento, Italy) 招待講演
108. T. Doi, “Recent progress on Lattice QCD of Two- and Three-Baryon Forces”, Bethe Forum “Multihadron Dynamics in a Box” (2019/9/9-13, Bonn, Germany) 招待講演  
A. Hosaka, “Threshold peaks in heavy hadrons  $P_c$ ”, Inha Hadron Mini Workshop, (2019/6/17-18, Inha University, Incheon, Korea) 招待講演

## 図書

109. Takashi Nakamura, Handbook of Nuclear Physics (Chapter: Coulomb breakup and soft E1 excitation of neutron halo nuclei). Springer (2023).  
 110. パリティ編集委員会編、中村隆司他著、物理科学、この1年2020、丸善出版(2020)

## アウトリーチ

111. 田村裕和, 「物質の常識をくつがえす中性子星のサイエンス」 量子クラスターオンライン科学講演会、2020年8月8日  
 112. 高橋義朗, 「レーザー冷却で作る超低温原子の世界」 京大アカデミックデイ 2019 「研究者と立ち話」、2019年9月15日

## 産業財産権

出願 なし 取得 なし

## 研究成果

本領域研究は、それぞれの階層を主として実験で探る計画研究6班：A01班「クォーク階層とハドロン階層を繋ぐ動的機構」、A02班「クォーククラスターで読み解くクォーク・ハドロン階層構造」、B01班「ストレンジ・ハドロンクラスターで探る物質の階層構造」、B02班「エキゾチック核子多体系で紐解く物質の階層構造」、C01班「極低温原子で紐解く階層横断エキゾチック物性現象」、C02班「物質の階層変化および状態変化に伴う普遍的物理」、階層を繋ぐための理論研究を行う理論班：D01班「第一原理計算から明らかにする階層構造の発現機構」、およびそれぞれに関連する公募研究から構成された。7班からなる計画研究と、広範囲の階層の分野からの公募研究が一体となって、物質の階層をつなぎ、物質階層分離のメカニズムの解明、階層を超える普遍的現象・法則の発見とその解明を進め、物質科学の新たな融合領域の創成を目指した。

下記の表には本領域研究のハイライト的成果を抜粋し、そのインパクトをまとめた。各物質階層が、複眼的視点、普遍的視点で研究され、クラスター間力、クラスター形成、新奇クラスター、物質階層の特徴などが明らかになり研究が大きく進展した。クラスター間力の測定や新奇クラスターの発見は、今後、格子QCDや厳密少数系計算、核子系第一原理計算などの理論的研究による物理的理解の深化が期待され、一方、理論により予言された様々な新奇クラスターについては、実験的な観測による実証が期待される。本研究で達成したこうした成果をきっかけとして、物質階層学の更なる進展が期待される。

表：ハイライト成果のまとめ

ハイライト成果	概要	当該分野へのインパクト	階層をつなぐ成果とインパクト	関連分野へのインパクト
ストレンジネスを含むバリオン間力の精密測定と第一原理的理解 (B01,D01)[22,23,25]	$\Sigma^{\pm}p$ 散乱断面積を高精度測定, QCD計算の検証と核力の斥力芯の起源の解明が進んだ	原子核：一般的なバリオン間力の理解につながる画期的成果, 核力の斥力芯の起源解明も	原子核層形成の元となるバリオン間力をクォーク階層から理解	ハドロン物質の状態方程式の決定により未知の中性子星内部物質の解明へ
原子核層と原子層における三体力の測定 (B02,C01)[38,40]	$p^3\text{He}$ 散乱精密測定; 光格子中少数原子系による三体力量子シミュレーション	原子核：荷電スピンの3/2 三体力を初測定; 原子：3 体力の冷却原子シミュレータ成功	クォークレベルで核力の理解, 冷却原子による原子核の三体力研究枠組みを整えた	中性子物質の状態方程式, 中性子星の構造の解明へ, 少数量子系を理解する鍵ともなる
格子QCD計算と少数計算の融合による新奇クラスターの予言 (D01)[61-63,66,70]	格子QCD計算でストレンジネスをもつバリオン間力を導出, NNNE ハイパー核を予言	格子QCD計算と厳密少数計算によりハイパー核の第一原理かつ定量的予言が可能に	クォークレベルから上部セミ階層のクラスター間力, 新奇クラスターの予言が可能に	状態方程式, 中性子星を解く鍵, 厳密少数系計算の化学分野への応用

	階層変化を可視化する量子シミュレータ完成 (C02)	量子多体理論と冷却原子を用いた量子シミュレーション実験	原子：粒子間相互作用と粒子数密度で階層変化を普遍的に整理した	多体効果による新奇なクラスター状態と多体力の存在を理解した	殻構造をもつクラスター生成の量子シミュレーションの可能性
新奇クラスターの発見	中間子原子核初観測 (A02,B01,D01) [11,15]	中間子原子核 $K^-pp$ を初観測. $K^-ppn$ の観測にも成功	原子核ハドロン：中間子-バリオン力の研究等、ハドロン物理の新展開	QCD による第一原理的理解. セミ階層の分離度・閾値則理解	中性子星や初期宇宙で中間子原子核の存在の可能性などを探究
	ハドロン分子の証拠 (A02,B01,D01) [9]	$\Lambda(1405)$ が $K^-p-N$ ハドロン分子状態である実験的証拠を得た	原子核ハドロン：長年謎であった $\Lambda(1405)$ の構造を実験的に解明	QCD による第一原理的理解. セミ階層の分離度・閾値則の解明	ハドロン分子の、初期宇宙や中性子星における存在を探究
	多中性子クラスターの観測 (B02,D01) [34,37,39,41]	ダイ中性子クラスター観測, テトラ中性子観測, $^{28}\text{O}$ の初観測	原子核：中性子クラスターの解明, 中性子間力, N 中性子相関を解明	他階層のクラスターとのアナロジーの解明. 閾値則の解明	中性子物質の状態方程式, 中性子星の解明. 元素合成過程解明
	新エフィモフ三量体 (C01)[49]	巨大質量比のフェルミ原子 Er-Er-Li のエフィモフ3量体を示唆するデータを初めて取得	巨大質量比の系で可能となる、角運動量をもつ新奇エフィモフ3量体の発見に繋がる	不安定核におけるボロミアン系, 重クォークを含むバリオンとのアナロジー研究への進展	原子・分子・原子核などの少量量子系の普遍的性質を理解する鍵

\*本表の研究成果の2列目:()は成果を出した計画研究の主たる班、[]は参考文献番号である。参考文献は上記「研究発表—学術雑誌の論文」の番号で示した。