

科学研究費助成事業「新学術領域研究（研究領域提案型）」 研究概要
〔令和5年度事後評価用〕

令和5年6月30日現在

機関番号：12608
 領域設定期間：平成30年6月29日 ～ 令和5年3月31日
 領域番号：6005
 研究領域名（和文） 量子クラスターで読み解く物質の階層構造
 研究領域名（英文） Clustering as a window on the hierarchical structure of quantum systems
 領域代表者
 中村 隆司（NAKAMURA, Takashi）
 東京工業大学・理学院・教授
 研究者番号：50272456
 交付決定額（領域設定期間全体）：（直接経費）1,156,100,000円

研究成果の概要

研究分野：ハドロン物理学、原子核物理学、原子物理学、分子科学、量子エレクトロニクス
 キーワード：クラスター、物質の階層、ハドロン物理学、原子核物理学、原子物理学、分子科学、エキゾチックハドロン、不安定核、冷却原子

1. 研究開始当初の背景

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(図1(左))がなぜ存在するのか。この問いは、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。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。各階層の粒子は、それを構成する基本単位「構成粒子」とその間の「力」で特徴付けられる。ここで構成粒子が複合粒子の場合を「クラスター」と呼ぶ。例えば、原子核は核子というクラスターを構成粒子とし、核力という「力」で結び付く。核子はクォーク3個の複合粒子でありクラスターとみなせる。

研究開始時には、従来型物質の階層間「境界・中間」に位置する「セミ階層」(図1(右))に、さまざまな新奇の量子クラスター現象が見出されつつあり、本領域研究はここに着目した。例えば、ハドロン層に属するバリオンは、通常クォーク3個できているとみなせるが、 Λ (1405) と呼ばれる Λ 粒子の励起状態は、「K 中間子+核子」という「ハドロン分子」である可能性が指摘されていた。一方、原子核は、通常「核子」というクラスターから成る系であるが、ある条件下では「 α 粒子」を単位とする状態となることが知られている (α クラスター)。原子層と分子層の境界にもフェッシュバッハ分子と呼ばれる中間的な状態がある。これら新奇の量子クラスター系は、弱く束縛した状態、あるいはぎりぎり束縛できない状態、という共通項がある。

もう一つの重要な背景は、我が国が、クォークからハドロン、原子核、原子、分子に至るそれぞれの研究分野で、常に世界をリードする研究環境と研究者を擁してきたことである。ハドロンの研究ではJ-PARCが、原子核の研究では理研のRIBFや阪大RCNPが世界的研究拠点となってきた。原子間力や自由度

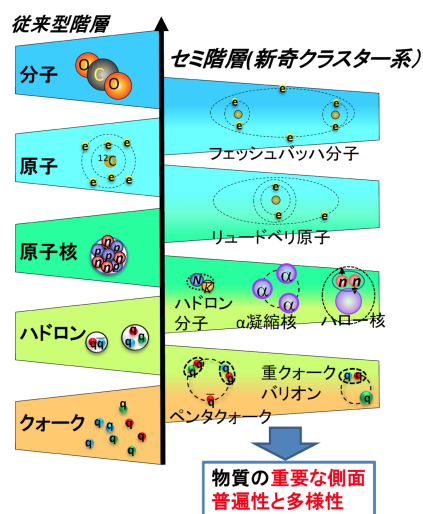


図1. 物質の階層構造. 本研究ではセミ階層の研究を通じて、階層構造の普遍性を探ってきた。

を稠密にコントロールすることで様々な新奇量子系を生み出している冷却原子の実験分野では、独創的な研究が我が国で次々と生まれてきた。また、物質階層をつなぐ上で重要な理論研究においても、量子色力学(QCD)の計算や少数粒子系の厳密計算で日本は世界最先端を走ってきた。さらに、「京」「富岳」といったスーパーコンピュータの活用が可能な時期にも遭遇した。そこで、こうした研究者を結集し、物質階層の謎に挑んだ連携研究が本領域である。

2. 研究の目的

本領域では、新奇の量子クラスターや量子クラスター系に着目し、実験でその生成や探索を行い、理論的にはそうしたクラスター(系)を予言し、クラスター間力を第一原理から計算し、階層構造を貫く普遍性を引き出すことを目的とした。また、冷却原子を用いる普遍的量子系のシミュレータ開発も目指した。こうして、普遍性を明らかにし、普遍性からのずれを見ることでそれぞれの階層の特徴を炙り出すことを目指した。セミ階層は、ダイクォーク、中間子、ダイ中性子、アルファ粒子、強相関フェルミ原子対などを構成粒子(クラスター)とする新奇クラスター系の層であり、従来型のクォーク、核子、原子を構成粒子とする純粋系ではない。セミ階層でのクラスター形成には「自由度」の中和、「閾値則」という階層を貫く普遍的メカニズムが示唆されている。また、セミ階層ではクラスターの度合「分離度」が重要である。本領域では、こうした「力」「自由度」「閾値則」「分離度」を理解し、セミ階層、クラスターの本質的理解を目指した研究である。

3. 研究の方法

本領域では各物質階層の分野で世界を牽引している研究グループを7つの計画研究班に組織した。すなわち、CERNで行われる高エネルギー重イオン衝突によるクォークグルーオンプラズマの実験(A01班)、世界最高性能のハドロン実験施設J-PARCと高強度光ビームを誇るSPring-8でのエキゾチックハドロンの実験(A02班)、J-PARCにおけるハイパー核やストレンジネスの入った中間子原子核の実験(B01班)、世界最高強度の不安定核ビームが供される理研RIBFにおける不安定核の実験と、世界最高分解能の核分光実験施設RCNPにおける三体核力の実験(B02班)、独創的なアイデアを持つ2つのグループで行われる冷却原子による量子シミュレーション実験(C01, C02班)、及び少数粒子系の厳密計算や第一原理計算で実績のある研究者らによる階層を繋ぐ理論研究(D01班)である。

本領域研究では、1)各物質階層の「クラスター」とクラスター間の「力」を理解するため、J-PARCで未知のバリオン間相互作用の精密測定(B01班)を行い、これをQCD計算と小数系厳密計算により第一原理的に理解する。さらに同理論計算により新奇クラスター(系)を予言する。クラスター間の2体力では説明できない「3体力」を原子核実験で精密測定し、一方、冷却原子シミュレーションで調べる。2)セミ階層の「クラスター」を理解するため、i)新たな自由度をもった量子クラスター(系)を観測し(A01, A02, B01, B02, C01, C02班)、ii)こうした新奇クラスターやその形成について、冷却原子シミュレータ(C01, C02班)や理論による第一原理的理解(D01班)を進め、セミ階層に共通の原理や各セミ階層独自の性質を明らかにする。以上が主な研究手法である。

4. 研究の成果

「クラスター間の力」「クラスター形成」「新奇クラスター(系)の発見」など、物質階層を横断するさまざまなハイライト成果が得られている。以下にその抜粋を示す。

(1) 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

J-PARCにおける Σ^p 散乱実験の結果、 Σ^p 弾性・非弾性散乱と Σ^+p 弾性散乱それぞれの微分断面積を過去の約100倍の統計で決定し、ハイペロン(ストレンジネスを含むバリオン)と核子間相互作用の精密測定に成功した(B01班)[1-3]。特に Σ^+p 散乱では位相差解析をハイペロン散乱では初めて行い、核力より強い斥力芯の存在を実証した[3]。核力の斥力芯の起源はこれまで謎であったが、今回の成果は、クォーク間パウリ効果が斥力芯の起源の一つであるとする理論予想を裏付けることとなった。また、今回の実験成果から格子QCDによるバリオン間力の計算を初めて検証することができた。こうして、原子核層のバリオン間力を、クォーク層から理解する理論研究や、カイラル有効場理論で記述する研究が進展した。

(2) 原子核層と原子層における三体力の測定

原子核における三体力の精密測定(B02班)：阪大RCNP、東北大CYRICにおいて中間エネルギー

一領域における陽子・ ^3He 弾性散乱(四核子系散乱)の高精度測定を実現した。厳密理論計算と比較し、三核子系散乱とは異なる核力の情報が得られることがわかった[4, 5]。特に、微分断面積とスピン相関係数から、藤田宮沢型、および荷電スピン 3/2 に敏感な三体力の情報が得られることが判明した。これは三中性子間力の導出や、さらには中性子核物質の状態方程式、中性子星構造の解明にもつながる成果である。**冷却原子を用いた普遍的三体力のシミュレータ**(C01 班) : Yb 原子の異なる電子軌道間フェッシュバッハ共鳴を用いて、光格子中原子に対して占有数分解超高分解能レーザー分光実験を遂行し、原子核で知られる藤田宮沢型三体力とみなせる摂動領域からこれまで未解明であった非摂動領域にわたる広範な相互作用領域で、3 体力のエネルギーを実験的に決定することに成功した。また、3 体系の理論数値計算を遂行し、非摂動領域で実験結果をよく説明する外挿曲線を見出した。この研究により、相互作用を稠密に制御できる冷却原子系を用いて、原子核など異なる階層の三体力を研究する手法が整った。冷却原子による三体力の研究は、本新学術領域内での原子核層(B02 班)や理論班(D01 班)との協力・有益な議論によって初めて実現した研究成果である。階層を超えた普遍的性質と普遍性からのずれについての理解が今後進むと期待される。

(3) 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

クォークレベルからの第一原理理論計算である格子 QCD 計算により、新しいペンタクォークの状態を予言し[6]、さらにはストレンジネスをもつバリオン間力を導出して[7, 8]、少数系厳密計算を適用し、NNN Ξ ハイパー核の予言を行った[9] (D01 班)。弱束縛の新奇ハイパー核を予言しており、今後の J-PARC での実験提案につながると期待される。下部の基本的階層(クォーク層)から、より上部のセミ階層(ハドロン層-原子核層)のクラスター間力、新奇クラスター(系)の予言が可能となったことは当該分野(ハドロン、原子核物理)の今後の進展に重要な成果である。また、バリオン間力の理解が進んだことで、今後、中性子星核物質の状態方程式、中性子星の構造の解明にも貢献する。重い中性子星が支えられないとして問題となっているハイペロンを含む状態方程式の謎(ハイペロンパズル)の解決にも貢献すると期待される。

(4) 階層変化を可視化する量子シミュレータ完成

制御可能な引力相互作用を有するフェルミ原子気体を利用し、実験・理論両面から粒子階層を貫く普遍的物理を深化させた(C02 班)。粘性率に対する状態方程式から原子階層と分子階層の境界が見積られることを示した。また等温圧縮率に対する状態方程式には分子間に働く 3 体相互作用の影響が顕著に現れることを明らかにした。これら一連の研究から、量子クラスターの複合粒子度(compositeness, 分離度の一種)がほぼゼロの値であっても量子多体系では階層変化が可能であることを示した。実験的に実証する冷却原子を用いた量子シミュレータも完成し、状態方程式から階層変化の様子をプローブできる事を示した。

(5) 新奇クラスターの発見—中間子原子核初観測

K 中間子と 2 つの核子系である $K^0\text{pp}$ 状態を J-PARC における $K^0+^3\text{He}$ 原子核反応実験で発見した[10, 11] (A02, B01 班)。この結果は、核媒質中では通常中間状態(仮想状態)としてのみ現れる「中間子」が原子核の構成要素として存在するという、ユニークな「中間子原子核」が生成されたと解釈できる。すなわち、ハドロンと原子核のセミ階層に存在する K 中間子クラスターの生成である。一方、B01 班および公募市川の研究からは、 $\Lambda(1405)$ (Λ 粒子の励起状態)が束縛したと解釈できる深い K 中間子原子核の束縛状態の存在を観測した[12]。今後、格子 QCD 計算による第一原理的理解が進み、分離度や閾値則の観点からの研究も進むと期待される。

(6) 新奇クラスターの発見—ハドロン分子の証拠

Λ 粒子の励起状態 $\Lambda(1405)$ の質量と崩壊幅を、J-PARC における K^0+d 反応実験により決定し、ハドロン分子の証拠が得られた(A02, B01 班)[13]。公募兵藤(のち A02 分担)らの理論研究により、閾値近傍の共鳴状態の分離度(複合粒子度 Compositeness)を用いて $\Lambda(1405)$ が反 K 中間子と核子から成る「ハドロン分子」であることが議論されているが、実験的な質量と崩壊幅の決定によって分離度の評価の精度があがり、「ハドロン分子」の定量的理解につながると期待される。一方、公募の兵藤、大西明の理論研究では、A01 班の進めた高エネルギー重イオン衝突実験で観測された K^0p の相関関数との関連性も指摘されている[14, 15]。ハドロン-原子核セミ階層の量子クラスターとしての「ハドロン分子」の研究の今後の進展が期待される。

(7) 新奇クラスターの発見—多中性子クラスターの観測

理研 RIBF における不安定核ビームを使った中性子ハロー核 ^6He , ^{19}B の分解反応実験により、これらの表面にダイ中性子が存在することを示した[16, 17] (B02 班)。また、純中性子原子核、テトラ中性子の共鳴状態の観測に成功した[18] (B02 班)。これに対しては理論班(D01 班)から、共鳴状態ではなくダイ中性子 2 個の崩壊過程として理解されうることも示され、さらなる研究の

広がりを見せている[19]。一方、RIBFの実験では世界初の4中性子同時測定法を確立することで、中性子クラスターを内包する可能性もある²⁸Oの観測と質量測定に成功した[20] (B02班)。²⁸Oは中性子ドリプラインを超える二重閉殻核候補であり、その観測が不安定核物理分野では世界的にフラッグシップ実験とされてきたが、本研究により成功に至った。以上のように、複数の中性子が集合する中性子クラスターの存在を確定させた。今後、中性子間力や中性子クラスター間力の第一原理的理解、さらには3中性子間力の知見を得ることによって、中性子物質の状態方程式、中性子星の物理的理解へと研究が展開される見込みである。

(8) 新奇クラスターの発見-新エフィモフ三量体

巨大質量比をもつ三粒子フェルミ原子系 Er-Er-Li についてエフィモフ3体状態の生成を示唆する結果を得た(C01班)。この研究にあたっては、まず Yb 原子を冷媒として用いることで、Er, Yb, Li からなる約 100nK 領域の超低温混合気体を生成した。特に、磁性原子 Er と非磁性原子 Yb のボース凝縮混合系を生成することに初めて成功したことが重要である[21]。また、Er-Li 原子の超低温混合系に対してフェッシュバハ共鳴を多数観測することに成功し[22]、エフィモフ三量体を示唆する実験結果の観測に繋がった [23]。この成果により、今後、巨大質量比の系で可能となる有限角運動量をもつ新奇なエフィモフ三量体の発見にも繋がり、原子核における三体のクラスター状態(ボロミアン系)や重いクォークでできたバリオン、中間子原子核、ハドロン分子とのアナロジーの研究に進展することが期待される。これは原子・分子・原子核などの少数量子系の普遍的性質を理解する鍵にもなる。

(9) その他: 冷却原子系とクォークグルーオンプラズマをつなぐ完全流体の粘性率の研究

(C02, A01, D01 班)、S=-2 のハイパー核(Ξハイパー核)研究の大きな進展 (B01, D01 班) など、上記以外においても、さまざまなハイライト的研究成果が得られた。

若手育成

若手育成を最重要課題の一つと位置付け、領域スクールを4回主催し、ストレンジネス核国際スクールを4回共催した。また、12回行った国際レクチャーシリーズでは、若手が他の階層の分野を学べる機会を提供、併せてミニワークショップも行い、若手の講演機会を設け、招聘研究者との研究交流を促進した。主催した2回の国際シンポジウムにおいても若手による発表を奨励し、優秀ポスター賞を表彰した。博士取得者は44名。若手の各賞の受賞実績はのべ34名(一部は下記に記載)、若手の学術分野への就職は4名、若手の昇進実績は15名である。

5. 主な発表論文等 (受賞等を含む)

査読論文

- [1] *K. Miwa, T. Takahashi, H. Tamura, et al., “Precise measurement of differential cross sections of the $\Sigma^-p \rightarrow \Lambda n$ reaction in momentum range 470-650 MeV/c”, Phys. Rev. Lett. **128**, 072501 (2022)
- [2] *T. Nanamura, K. Miwa, T. Takahashi, H. Tamura, et al., “Measurement of differential cross sections for Σ^+p elastic scattering in the momentum range 0.44-0.80 GeV/c”, Prog. Theor. Exp. Phys. **2022**, 093D01 (2022).
- [3] *K. Miwa, T. Takahashi, H. Tamura, et al., “Measurement of the differential cross sections of the Σ^-p elastic scattering in momentum range 470 to 850 MeV/c”, Phys. Rev. C **104**, 045204 (2021).
- [4] *A. Watanabe, S. Nakai, K. Sekiguchi, et al., “Spin correlation coefficient for proton-³He elastic scattering at 100 MeV”, Phys. Rev. C **106**, 054002 (1-9) (2022).
- [5] *A. Watanabe, S. Nakai, Y. Wada, K. Sekiguchi, et al., “Proton-³He elastic scattering at intermediate energies”, Phys. Rev. C **103**, 044001 (1-9) (2021). **Editors’ Suggestion**
- [6] *Q. Meng, E. Hiyama, K. U. Can, P. Gubler, M. Oka, A. Hosaka, H. Zong, “Compact sssc⁻ pentaquark states predicted by a quark model”, Phys. Lett. B **798**, 135028 (2019).
- [7] *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).
- [8] *T. Iritani, S. Aoki, T. Doi, et al., “ $N\Omega$ dibaryon from lattice QCD near the physical point”, Phys. Lett. B **792**, 284 (2019).
- [9] *E. Hiyama, K. Sasaki, T. Miyamoto, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Yamamoto, “Possible Lightest Ξ hypernucleus with Modern ΞN interaction”, Phys. Rev. Lett. **124**, 092501 (2020).
- [10] *T. Yamaga, T. Nagae, H. Noumi, H. Ohnishi, et al., “Observation of a $K\bar{b}n$ bound state in the ³He(K, Λp)n reaction”, Phys. Rev. C **102**, 044002.

- [11] *S. Ajimura, T. Nagae, H. Noumi, H. Ohnishi, *T. Yamaga, et al., ““ K^-pp ”, a Kbar-Meson Nuclear Bound State, Observed in $^3\text{He}(K^-, \Lambda p)n$ Reactions”, Phys. Lett. B **789**, 620 (2019).
- [12] *Y. Ichikawa, K. Miwa, T. Nagae, T. Takahashi, H. Tamura, et al., “An event excess observed in the deeply bound region of the $^{12}\text{C}(K^-, p)$ missing-mass spectrum”, Prog. Theor. Exp. Phys **2020**, 123D01 (2020).
- [13] 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).
- [14] *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).
- [15] *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**
- [16] *Y.L. Sun, T. Nakamura, Y. Kondo, et al., “Three-body breakup of ^6He and its halo structure”, Phys. Lett. B **814**, 136072 (1-8) (2021).
- [17] *K.J. Cook, T. Nakamura, Y. Kondo, et al., “Halo Structure of the Neutron-Dripline Nucleus ^{19}B ”, Phys. Rev. Lett. **124**, 212503 (2020). **Editors’ Suggestion**
- [18] *M. Duer, Y. Kondo, T. Nakamura, et al., “Observation of a correlated four-neutron system”, Nature **606**, 678-682 (2022).
- [19] *R. Lazauskas, E. Hiyama, and J. Carbonell, “Low Energy Structures in Reactions with $4n$ in the Final state”, Phys. Rev. Lett. **130**, 102501 (2023).
- [20] *Y. Kondo, T. Nakamura, et al., “First Observation of ^{28}O ”, Nature, *Accepted for publication* (2023).
- [21] *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).
- [22] *F. Schäfer, N. Mizukami, and Y. Takahashi, “Feshbach resonances of large-mass-imbalance Er-Li mixtures”, Phys. Rev. A, **105**, 012816(1-7)(2022).
- [23] *F. Schäfer, Y. Haruna, *Y. Takahashi, “Observation of Feshbach Resonances in an ^{167}Er - ^6Li Fermi-Fermi Mixture”, J. Phys. Soc. **92**, 054301 (1-4) (2023).

主な受賞：

肥山詠美子(D01 代表), 科学技術分野の文部科学大臣表彰「科学技術賞」(平成 31 年度)
 高橋義朗(C01 代表), 紫綬褒章(令和 2 年秋)
 関口仁子(B02 分担), 第 3 回東北大学優秀女性研究者賞「紫千代萩賞」
 関口仁子(B02 分担), 第 4 2 回猿橋賞 (2022 年 5 月)
 仲澤和馬(B01 公募), 第 6 6 回仁科記念賞 (2020 年度)
 大塚孝治(D01 公募), フンボルト賞(Humboldt Research Award) (June 2023)
 立川仁典(D01 公募), 第 4 回分子科学国際学術賞(2019 年度)
 足立智(B02 公募), 日本物理学会若手奨励賞 (令和 4 年度)
 足立智(B02 公募), 原子核談話会新人賞 (令和 4 年度)
 山口康宏(D01 博士研究員), 日本物理学会若手奨励賞 (令和 3 年度)
 渡邊跡武(B02 学生), 東北大学総長賞 (令和元年度)
 枝川知温(D01 公募緒方, 学生), 物理学会学生優秀発表賞(令和 4 年度)
 鶴沢浩太朗(D01 公募萩野, 学生), 物理学会学生優秀発表賞(令和 4 年度)
 神谷直紀(D01 公募山下, 学生), 物理学会学生優秀発表賞(令和 4 年度)
 木村祐太(A02, 学生), 物理学会学生優秀発表賞(令和 2 年度)
 北山翔(B02, 学生), 物理学会学生優秀発表賞(令和元年度)
 小野滉貴(C01, 学生), 物理学会学生優秀発表賞(令和元年度)
 井上南(B02, 学生), 物理学会学生優秀発表賞(平成 30 年度)

領域ホームページ

<http://be.nucl.ap.titech.ac.jp/cluster/index.html> (和文ページ)
<http://be.nucl.ap.titech.ac.jp/cluster/eng/index.html> (英文ページ)