

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2年度中間評価用〕

令和2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（予定）額（領域設定期間全体）：（直接経費）1,169,700,000 円

研究の概要

クォーク、ハドロン、原子核、原子、分子という微視的物質世界の階層構造形成の謎に挑む。そのため、本領域は、我が国が世界をリードするハドロン物理学、原子核物理学、原子物理学、分子科学分野の研究者の力を結集し、従来あった階層間の分野の壁を超えた連携研究を実現するものである。異なる階層間に現れる多彩な新奇クラスター現象を通して、スケールが何桁も異なる物質層を支配する量子多体系の法則を見いだすとともに、お互いの違いとそのためにも生じる多様性も理解する。こうして、物質の階層構造の起源に迫る新しい融合分野を創成する。

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

物質世界には、図1（左）に示すクォークから分子に至る階層構造が存在する。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。ミクロの物質がなぜこのような階層構造を持つのか、というのは自然科学の根源的な問題でありながらこれまであまり議論されてこなかった。研究分野はそれぞれの物質階層毎に独立に進展し、分野を横断する研究があまり行われてこなかったからである。

最近、こうした物質の階層の狭間「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ており、本領域研究はここに着目した。例えば、ハドロンの世界においては、バリオンは通常、クォーク3個から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+核子の系とみなせる。原子核は、通常「核子」というクラスターからできた多粒子系とみなせるが、特殊な条件下では「 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・ハドロンから原子核、原子、分子に至るそれぞれの研究分野で世界をリードする研究環境と研究者を擁していることである。例えば、ハドロンの研究ではJ-PARCが、原子核の研究では理研のRIBFが世界的研究拠点となっている。原子間の力や自由度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いる。また、物質階層をつなぐ上で重要な理論研究においても少数粒子系の厳密計算や量子色力学の計算で日本は世界最先端にある。そこで、こうした研究者を結集し、物質階層の謎に挑む連携研究が本領域の研究である。

2. 研究の目的

本領域研究では、「セミ階層」とそこに現れる新奇量子クラスターに着目し、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ている。また、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も目指している。セミ階層は、ダイクォーク、中間子、ダイクォーク、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、階層構造を解く4つの指標として「力」「自由度」「閾値則」「分離度」を掲げ、その本質的理解を目指す。このようにクラスター現象を統一的に理解し、階層構造形成の謎に挑むのが本領域研究である。

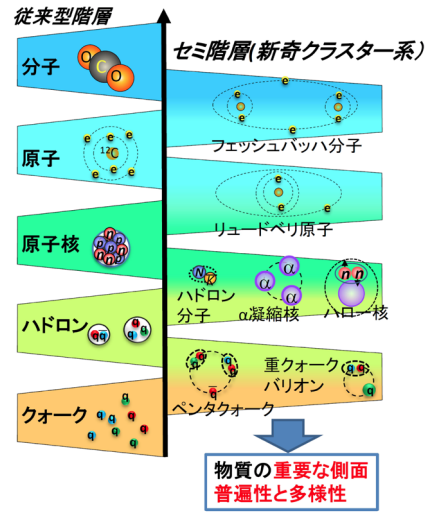


図1. 物質の階層構造。本研究ではセミ階層の研究を通じて、階層構造の普遍性を探る

3. 研究の方法

図2には、本領域の研究組織、研究の進め方、目標を模式的に示した。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。A、B班で様々な新奇クラスターの探索や精密観測が行われ、それらの特徴付ける相互作用、分離度、密度などが抽出され図2左下のように点としてプロットされる。これを冷却原子(C班)による量子シミュレーション実験、理論班(D01班)の第一理論計算によって普遍的な曲線を描くことにより、クラスターの普遍性が見つかり、一方、普遍性からのずれから特定の階層に固有な性質を明らかにする。本領域研究終了時までには、こうした例がいくつか見つかれば、階層を特徴付ける4つの指標や普遍性の理解が進み、個々の粒子・クラスターの基本法則や物理が解明されていくと期待される。本領域のように階層を跨ぐ連携研究を実験・理論両面からこれほど大規模に進める研究は革新的であり、世界初の試みである。こうして量子多体系の物理、物質科学の新しい分野が開拓される。

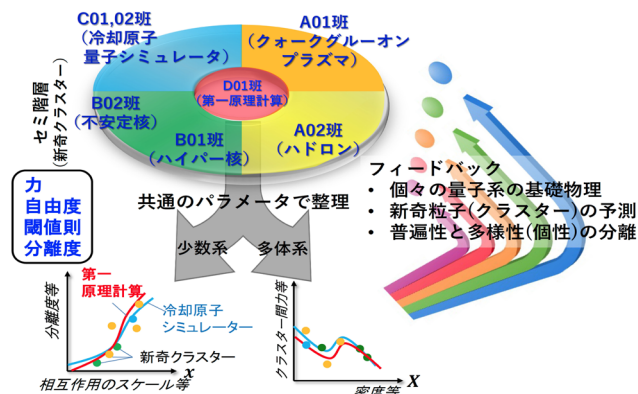


図2：本研究領域の研究組織、研究方針の概念図

4. 研究の進展状況及び成果

本研究では、クォーク、ハドロン、原子核、原子、分子、それぞれの階層でさまざまな新奇クラスターの生成・探索、「力」を探る実験が進み、一方でこれらを理解するための理論研究が進んでいる。クォーク階層では、CERN ALICE 実験検出器高度化をほぼ完了し、ハドロン階層と繋ぐ動的機構の解明へ向けた研究準備段階を終えつつある(A01班)。新奇クラスター状態としては、ハドロン階層では、中間子+2核子の系、K-PPの束縛系がJ-PARCのK-³Heの原子核反応実験で発見された[3]。これはA02班とB01班の共同研究である。B01班は、J-

PARC で新手法により Σ 粒子+陽子の弾性散乱実験を行い、従来の 100 倍の統計を得ることに成功した。これで、これまで未知であった Σ ハイペロン-核子間力が明らかにされる。原子核層の新奇クラスター状態を探る B02 班の研究では、理研 RIBF の実験で、中性子過剰核 ^{19}B に中性子ハロー構造とダイ中性子の存在が示された[4]。また、6 中性子クラスターの候補核となる中性子超過剰核 ^{21}B が発見された[5]。冷却原子系の研究では、C01 班が巨大質量比を持った 3 種混合冷却原子集団の光トラップ技術を世界で初めて確立した。C02 班は冷却原子で形成される量子クラスターの光学応答、またそのクラスターの結合強度に依存した粘性率の研究を進展させ、さらに量子クラスター間の相互作用を明らかにする物性研究の準備が実験・理論の両輪で進んでいる。少数系理論や第一原理計算(格子 QCD 計算など)で階層を繋ぐ理論計算を進める D01 班では、幅の狭い新奇のペンタクォークの共鳴状態を予言し、これが単純な 5 クォーク系ではなく、クラスターの構造を内包することを示唆した[11]。また、四体グザイハイパー核の存在を予言した[12]。さらに上記 B02 班の実験で研究が進む中性子過剰ホウ素同位体 (^{19}B) については、冷却原子系で研究が進むユニタリー極限の特徴があることがわかり、原子核-原子での普遍性の可能性を示唆した[13]。

5. 今後の研究計画

各計画研究では引き続き「力」「自由度」「閾値」「分離度」という階層を繋ぐキーワードを念頭に、クォークからハドロンへの動的機構の解明(A01)、セミ階層における新奇クラスター状態の探索(A01, A02, B01, B02, C01, C02)と予言(D01)、クラスター間の力の実験的研究(A01, A02, B01, B02, C01, C02)と理論的研究(D01)、冷却原子系を用いた量子シミュレーターの構築(C01, C02)、階層を繋ぐ様々な理論研究と第一原理計算(D01)を進めていく。また、階層を繋ぐ連携研究を強化するため、1) 粘性と完全流体挙動、2) ハドロン生成 vs. 原子分子生成、3) 3 体力、4) ダイクォーク、ダイ中性子、強相関フェルミ原子対、5) ハドロン分子とフェッシュバハ分子の諸問題と普遍性、などを戦略テーマと位置づけ、連携研究や共同研究を促進させる。相補的な役割を果たす公募研究との連携も強化する。このように、物質階層、実験・理論の壁を超える連携研究を行い、新奇クラスターを鍵に階層を繋ぐという革新的研究を推進し、新しい物質科学の領域を開拓する。

6. 主な発表論文等(受賞等を含む、論文はすべて査読有)

- [1] 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).
- [2] H. Ohnishi, *F. Sakuma and T. Takahashi, "Hadron Physics at J-PARC", *Prog. Part. Nucl. Phys.* (2020) 103773. **招待レビュー記事**
- [3] 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).
- [4] *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** **プレスリリース**
- [5] S. Leblond, F. M. Marques, T. Nakamura, Y. Kondo, et al., "First Observation of ^{20}B and ^{21}B ", *Phys. Rev. Lett.* **121**, 262502 (2018).
- [6] *F. Schäfer, T. Fukuhara, S. Sugawa, Y. Takasu, and Y. Takahashi, "Tools for quantum simulation with ultracold atoms in optical lattices", *Nature Reviews Physics*, accepted (2020). **招待レビュー記事**
- [7] F. Schäfer, N. Mizukami, P. Yu, S. Koibuchi, A. Bouscal, and Y. Takahashi, "Experimental realization of ultracold Yb-7Li mixtures in mixed dimensions", *Phys. Rev. A* **98**, 051602(R)1-6(2018). **Editors' Suggestion**,
- [8] *S. Taie, T. Ichinose, H. Ozawa and Y. Takahashi, "Spatial adiabatic passage of massive quantum particles in an optical Lieb lattice", *Nature Communications*, **11**, 257-1-6(2020).
- [9] *M. Horikoshi and M. Kuwata-Gonokami, "Cold Atom Quantum Simulator for Dilute Neutron Matter", *International Journal of Modern Physics E*, **28**, 1930001 (2019).
- [10] Y. Chen, *M. Horikoshi, K. Yoshioka, M. Kuwata-Gonokami, "Dynamical Critical Behavior of Attractive Bose-Einstein Condensate Phase Transition", *Phys. Rev. Lett.* **122** 040406 (2019).
- [11] *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).
- [12] *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). **プレスリリース**
- [13] *E. Hiyama, R. Lazauskas, F.M. Marques, J. Carbonell, "Modeling ^{19}B as a ^{17}B -n-n three-body system in the unitary limit", *Phys. Rev. C* **100**, 011603 (2019).
- [14] Pascal Naidon, Ludovic Pricoupenko, "Width and shift of Fano-Feshbach resonances for van der Waals Interactions", *Phys. Rev. A* **100**, 042710 (2019).
- [15] **受賞** : 肥山詠美子 平成 31 年科学技術分野の文部科学大臣表彰「科学技術賞」
- [16] **受賞** : 関口仁子 第 3 回東北大学優秀女性研究者賞「紫千代萩賞」
- [17] **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)