

機関番号：12601

領域設定期間：令和元年度～令和5年度

領域番号：6101

研究領域名（和文）量子液晶の物性科学

研究領域名（英文）Physical Properties of Quantum Liquid Crystals

領域代表者

芝内 孝禎（SHIBAUCHI Takasada）

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：00251356

交付決定（予定）額（領域設定期間全体）：（直接経費）1,134,000,000円

研究の概要

棒状や円盤状の分子系では、気体・液体・固体の三態のほかに、液晶と呼ばれる状態が現れるが、近年、様々な固体物質において液晶に類似した電子状態が次々と観測され始めている。このような電子状態は、スピン系・強相関金属・超伝導の各分野で独立に研究されてきたが、本新学術領域研究では、これらを「スピン液晶」・「電荷液晶」・「電子対液晶」と整理し、いずれも量子多体効果によって現れる点に着目し、「量子液晶」という新概念によって統一的に取り扱う。

本領域の目的は、既存の分野を超えた新しい連携により、量子液晶の物性を解明すること、またその制御を可能にすることである。特に、量子液晶の基底状態を解明するとともに、様々な量子液晶に現れる普遍性と多様性の基礎学理を探究する。また、先端技術を駆使して量子液晶の素励起の解明と制御を行い、柔軟に変化する液晶の特性と量子性による高速かつ巨大な応答を利用した将来の新技术への基礎を築くことを目指す。

現在までに、様々な新奇量子液晶状態を発見し、今まで以上の多様性が示されたほか、その分類を理論的に整理するための指針を提案するなど、大きな進展があった。さらに、普遍性を議論する上で重要な多体相関を定量化する実験手法を提示した。また、量子液晶揺らぎが超伝導に与える影響も明らかになりつつある。その他、新しい量子物質および研究手法の開発が進んでいる。

研究分野：物性物理学、固体化学、ナノサイエンス、光工学、量子ビーム科学、計算科学

キーワード：量子液晶、対称性の破れ、ネマティック、スピン液晶、電荷液晶、電子対液晶

1. 研究開始当初の背景

棒状や円盤状の構造を持つ分子の集団において、固体と液体の中間状態として、液晶状態が現れることが古くから知られている。ここで、液晶に異方性が現れる一因は、分子の構造が棒状や円盤状といった方向性を持っていることにある。その点で、異方性は構成分子自体に自明に内在している。これに対して、固体中の電子に着目すると、古典的には電子自体は方向性を持たないが、量子力学的なスピン自由度や軌道自由度により方向性が出現し、電子集団全体として非自明な異方性を獲得する場合がある。近年、様々な固体物質の電子状態において、液晶に類似した新奇な電子状態が次々と発見されている。例えば、ある種の強相関金属では、電荷ストライプや電子ネマティックと呼ばれる異方的な電子状態が観測され、結晶構造からは期待されない異方的な金属状態が現れる。磁性絶縁体では、絶対零度まで磁気秩序が現れない量子スピン液体の研究が盛んであるが、そのような状態でも結晶格子の回転対称性を破るスピン状態が示唆されている。また、電子対が形成される超伝導状態においても、非自明な異方性を持つネマティック超伝導や対密度波などの新奇な超伝導状態が盛んに議論されている。

2. 研究の目的

このように様々な物質群で出現している液晶に類似した電子状態については、これまでは各論的に、強相関金属・スピン系・超伝導のそれぞれの分野で独立に研究されていた。本新学術領域研究では、これらを「電荷液晶」・「スピン液晶」・「電子対液晶」と整理し、いずれも量子多体効果によって現れる点に着目し、「量子液晶（Quantum Liquid Crystals, QLC）」という新概念によって統一的に取り扱う。既存の分野を超えた新しい連携により、量子液晶の物性を解明すること、またその制御を可能にすることを目的としている。特に、量子液晶の基底状態を解明するとともに

に、様々な量子液晶に現れる普遍性と多様性の基礎学理を探究する。また、先端技術を駆使して量子液晶の素励起の解明と制御を可能にし、柔軟に変化する液晶の特性と量子性による高速かつ巨大な応答を利用した将来の新技术への基礎を築くことを目指している。

3. 研究の方法

本領域では、研究の方法論により以下の4つの研究項目に分類・組織化し、異なる物質を主な対象としてきた研究者を各項目に配置することで、新しい融合研究を促進する。

- ・研究項目 A01「量子液晶物質の開発」：固体化学の様々な合成手法を駆使して、量子液晶状態の舞台となる新物質の開発を行う。
- ・研究項目 B01「量子液晶の精密計測」：各種先端精密物性計測技術を用いるとともに、異なる技術を組み合わせた新しい測定手法を開発し、量子液晶電子状態の実験的解明を行う。
- ・研究項目 C01「量子液晶の理論構築」：様々な理論的方法を駆使して、種々の量子液晶の秩序パラメータの定式化、その揺らぎが他の物性に与える影響を研究し、物質・機能の設計を行う。
- ・研究項目 D01「量子液晶の制御と機能」：微細加工技術を用いた量子液晶のナノサイエンス、および最近急速に発展してきた超高速光技術による状態制御と機能開拓を行う。

これらの連携研究により、開発した物質を精密計測し、理解した上で制御し、機能開拓への道筋を総合的に探究する舞台を提供することで、量子液晶の物性科学の基礎学理の構築を目指す。

4. 研究の進展状況及び成果

現在までの研究で、量子液晶の多様性・普遍性に関する大きな進展を見せている。一部を紹介すると、まず第1に、いくつかの新奇な量子液晶状態が見いだされ、今までにない量子液晶の多様性が示された。例えば、鉄系超伝導体では今まで最近接の鉄元素を結ぶ方向の量子液晶が知られていたが、それとは45°異なる方向を示す量子液晶状態を発見した。これは、化学組成などを調整することにより、任意の方向に量子液晶の向きを制御できる可能性を示唆する結果である。また別の例では、イリジウム酸化物において、原子間にループ電流が流れ、アナポールと呼ばれる極のないナノ電磁石が実現した量子液晶状態が発見されている。

第2に、多様な量子液晶の分類を理論的に整理するための指針として、量子液晶構造因子・形状因子という物理量が提案され、これにより種々の量子液晶が実現する普遍的機構の理解へつながることが期待される。

第3に、量子液晶の普遍性を考える上で重要な多体効果を具体的に調べる方法として、非平衡伝導特性から多体相関を定量化する実験手法が提示された。

第4に、FeSe系超伝導体の系統的な研究により、量子液晶の揺らぎを発現機構とする非従来型の超伝導が実現することが実験的に示唆された。

これ以外にも、新物質の開発や各種新しい研究手法の開発が進むなど、各研究項目で多角的な研究が順調に遂行されている。本領域の2年間の研究により、多岐にわたる研究成果が得られ、258編の論文、114件の国際会議招待講演などで発表された。本新学術領域の計画研究メンバー間、および公募研究メンバーを含む共同研究も多く実施されており、34編の領域内共同研究論文が出版されている。

初年度末からのコロナ禍の影響により、オンラインでの研究会の開催が不可能となっているが、各種オンラインプラットフォームの活用により、研究会、セミナー国際会議などを主催するとともに、領域動画サイト「QLCチャンネル」にて研究成果の解説ビデオなどを配信し、領域研究の活性化に努めている。また、総括班経費により共同研究の成果としての論文掲載料のサポートを行い、領域内連携を促進している。領域内若手研究者支援として、グループ間の研究者交換プログラムを20件実施し、若手研究奨励賞を2年間で5名に授与した。また、国際活動としては、若手研究者海外渡航を初年度のコロナ禍以前には半年余りで12件支援した。また2021年5月には領域主催の国際会議 International Conference on Quantum Liquid Crystals (QLC2021)をオンライン開催し、8カ国から274名の登録があり、非常に有意義な議論が行われた。

5. 今後の研究計画

本研究領域の特色は、各研究項目内で今まで異なる物質系を研究対象としてきた研究者を混在させることにより、それぞれの研究者がより広い視野を獲得し、連携を図りやすい構成としていくことである。種々の研究手法を得意とする計画研究のメンバー26名に、第1期公募研究の研究代表17名が加わり、古典液晶・ソフトマター、有機導体・分子性物質、ヘリウム超流動などの専門家を含め、カバーする分野の裾野がより広がった構成となった。第2期公募研究でも、更に多角的な研究を展開するために、異分野研究者の交流を促進する。領域内の連携を深めるための現在進行中の種々のプログラムを継続し、2023年度には国際会議 QLC2023 の開催を予定している。

現在までに、既に多くの領域内連携が進行しており、共同研究の成果も着実に結実している。今後も引き続き連携の強化を進める領域運営を行っていく。研究内容としては、C01理論班を中心に構築され始めている、多様な量子液晶を系統的に理解するための理論フレームワークを、多角的な先進測定法を先鋭化することで実験研究により検証するとともに、量子液晶の普遍性の解明と多様性の分類という本新学術領域の学理構築目標に向かって、研究を推進していく予定である。

6. 主な発表論文等（受賞等を含む）

〔論文発表〕全 258 編（うち領域内共同研究 34 編）より抜粋（すべて査読あり）

- 1) H. Murayama, K. Ishida, R. Kurihara, T. Ono, Y. Sato, Y. Kasahara, H. Watanabe, Y. Yanase, G. Cao, Y. Mizukami, T. Shibauchi, *Y. Matsuda, *S. Kasahara, "Bond directional anapole order in a spin-orbit coupled Mott insulator $\text{Sr}_2(\text{Ir}_{1-x}\text{Rh}_x)\text{O}_4$ ", *Phys. Rev. X* **11**, 011021/1-11 (2021). DOI: 10.1103/PhysRevX.11.011021
 - 2) *M. O. Takahashi, M. G. Yamada, D. Takikawa, T. Mizushima, S. Fujimoto, "Topological nematic phase transition in Kitaev magnets under applied magnetic fields" *Phys. Rev. Res.* **3**, 023189/1-11 (2021). DOI: 10.1103/PhysRevResearch.3.023189
 - 3) *T. Hata, Y. Teratani, T. Arakawa, S. Lee, M. Ferrier, R. Deblock, R. Sakano, A. Oguri, *K. Kobayashi, "Three-body correlations in nonlinear response of correlated quantum liquid", *Nat. Commun.* **12**, 3233/1-7 (2021). DOI: 10.1038/s41467-021-23467-4
 - 4) *H. Kontani, Y. Yamakawa, R. Tazai, S. Onari, "Odd-parity spin-loop-current order mediated by transverse spin fluctuations in cuprates and related electron systems", *Phys. Rev. Res.* **3**, 013127/1-12 (2021). DOI: 10.1103/PhysRevResearch.3.013127
 - 5) K. Mukasa, K. Matsuura, M. Qiu, M. Saito, Y. Sugimura, K. Ishida, M. Otani, Y. Onishi, Y. Mizukami, K. Hashimoto, J. Gouchi, R. Kumai, Y. Uwatoko, *T. Shibauchi, "High-pressure phase diagrams of $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$: Correlation between suppressed nematicity and enhanced superconductivity", *Nat. Commun.* **12**, 381/1-7 (2021). DOI: 10.1038/s41467-020-20621-2
 - 6) K. Ishida, M. Tsujii, S. Hosoi, Y. Mizukami, S. Ishida, A. Iyo, H. Eisaki, T. Wolf, K. Grube, H. v. Löhneysen, R. M. Fernandes, *T. Shibauchi, "Novel electronic nematicity in heavily hole-doped iron pnictide superconductors", *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **117**, 6424-6429 (2020). DOI: 10.1073/pnas.1909172117
 - 7) T. Hayashida, Y. Uemura, K. Kimura, S. Matsuoka, D. Morikawa, S. Hirose, K. Tsuda, T. Hasegawa, *T. Kimura, "Visualization of ferroaxial domains in an order-disorder type ferroaxial crystal", *Nature Commun.* **11**, 4582/1-8 (2020). DOI: 10.1038/s41467-020-18408-6
 - 8) *S. Kasahara, Y. Sato, S. Licciardello, M. Čulo, S. Arsenijević, T. Ottenbros, T. Tominaga, J. Böker, I. Eremin, T. Shibauchi, J. Wosnitza, N. E. Hussey, Y. Matsuda, "Evidence for an Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov State with Segmented Vortices in the BCS-BEC-Crossover Superconductor FeSe", *Phys. Rev. Lett.* **124**, 107001/1-6 (2020) 高被引用文献. DOI: 10.1103/PhysRevLett.124.107001
 - 9) *I. Kostylev, *S. Yonezawa, Z. Wang, Y. Ando, Y. Maeno, "Uniaxial-strain control of nematic superconductivity in $\text{Sr}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ", *Nat. Commun.* **11**, 4152/1-8 (2020). DOI: 10.1038/s41467-020-17913-y
 - 10) *T. Sato, N. Abe, S. Kimura, Y. Tokunaga, T.-h. Arima, "Magnetochiral dichroism in a collinear antiferromagnet with no magnetization", *Phys. Rev. Lett.* **124**, 217402/1-5 (2020), Editors' Suggestion. DOI: 10.1103/PhysRevLett.124.217402
 - 11) I. Errea, F. Belli, L. Monacelli, A. Sanna, T. Koretsune, T. Tadano, R. Bianco, M. Calandra, R. Arita, F. Mauri, *J. A. Flores-Livas, "Quantum crystal structure in the 250-kelvin superconducting lanthanum hydride", *Nature* **578**, 66-69 (2020) 高被引用文献. DOI: 10.1038/s41586-020-1955-z
 - 12) *D. Hirobe, *M. Sato, M. Hagihala, Y. Shiomi, T. Masuda, E. Saitoh, "Magnon Pairs and Spin-Nematic Correlation in the Spin Seebeck Effect", *Phys. Rev. Lett.* **123**, 117202/1-7 (2019). DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.117202
- 〔国際会議における招待講演〕全 114 件より抜粋
- 1) K. Ohgushi, "Exploring novel electronic properties near Kitaev spin liquid", 3rd Asia-Pacific Workshop on Quantum Magnetism, Tsung-Dao Lee Institute, Shanghai, China, 2019/11/24, Invited.
 - 2) T. Shibauchi, "Field-angle dependent Majorana gap in a Kitaev spin liquid state of $\alpha\text{-RuCl}_3$ ", American Physical Society (APS), March Meeting, online, 2021/03/15-19, Invited.
 - 3) T. Hanaguri, "Spectroscopic-imaging STM studies of FeSe and related materials", International Conference on Fugaku project Emergence and Functionality of Quantum Matter 2020 (EFQM2020), online, 2020/9/30, Invited.
 - 4) H. Kontani, "Unconventional density waves and novel pairing mechanism in strongly correlated electron systems", International Conference on Electron Correlation in Superconductors and Nanostructures (ECSN-2019), Odessa, Ukraine, 2019/10/8, Invited.
 - 5) K. Kobayashi, "Non-equilibrium Fluctuations in Correlated Quantum Liquids", APW-RIKEN-Tsinghua-Kavli workshop on "Highlights on condensed matter physics", online, 2020/9/4, Invited.
- 〔受賞〕全 28 件より抜粋
- 1) 有田亮太郎, "Highly Cited Researchers 2020", (Clarivate Analytics 社, 2020/11/18).
 - 2) 有馬孝尚, "第 17 回本多フロンティア賞", (公益財団法人本多記念会, 2020/11/6).
 - 3) 木村剛, "2019 Fellow of the American Physical Society", (American Physical Society, 2019/09/18).

ホームページ等

「量子液晶」領域ホームページ <http://qlc.jp>

領域動画サイト「QLC チャンネル」 <https://www.youtube.com/channel/UCT4yhc-2b0hflUjJPLIYNQ>