

領域略称名：量子液晶

領域番号：6101

令和6年度科学研究費助成事業
「新学術領域研究（研究領域提案型）」
に係る研究成果報告書（研究領域）兼
事後評価報告書

「量子液晶の物性科学」

領域設定期間

令和元年度～令和5年度

令和6年6月

領域代表者 東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授・芝内 孝禎

目 次

研究組織

- | | | |
|---|----------------|---|
| 1 | 総括班・総括班以外の計画研究 | 2 |
| 2 | 公募研究 | 3 |

研究領域全体に係る事項

- | | | |
|----|-----------------------------------|----|
| 3 | 交付決定額 | 7 |
| 4 | 研究領域の目的及び概要 | 8 |
| 5 | 審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況 | 10 |
| 6 | 研究目的の達成度及び主な成果 | 12 |
| 7 | 研究発表の状況 | 17 |
| 8 | 研究組織の連携体制 | 22 |
| 9 | 研究費の使用状況 | 23 |
| 10 | 当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況 | 25 |
| 11 | 若手研究者の育成に関する取組実績 | 26 |
| 12 | 総括班評価者による評価 | 27 |

研究組織

(令和6年3月末現在。ただし完了した研究課題は完了時現在、補助事業廃止の研究課題は廃止時現在。)

1 総括班・総括班以外の計画研究

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
X00 総	19H05822 量子液晶の物性科学	令和元年度 ～ 令和5年度	芝内 孝禎	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授	15
A01 計	19H05823 量子液晶物質の開発	令和元年度 ～ 令和5年度	大串 研也	東北大学・理学研究科・教授	6
B01 計	19H05824 量子液晶の精密計測	令和元年度 ～ 令和5年度	花栗 哲郎	国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・チームリーダー	7
C01 計	19H05825 量子液晶の理論構築	令和元年度 ～ 令和5年度	紺谷 浩	名古屋大学・理学研究科・教授	7
D01 計	19H05826 量子液晶の制御と機能	令和元年度 ～ 令和5年度	小林 研介	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授	6
総括班・総括班以外の計画研究 計 5 件 (廃止を含む)					

[1] 総：総括班、国：国際活動支援班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

2 公募研究

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
A01 公	20H05144 分子ダイマーダイポールが創成 する量子スピン／電荷液晶	令和2年度 ～ 令和3年度	佐々木 孝彦	東北大学・金属材料研究 所・教授	1
A01 公	20H05145 チタン酸ストロンチウム電場誘 起伝導表面におけるネマティッ ク超伝導の検証	令和2年度 ～ 令和3年度	野島 勉	東北大学・金属材料研究 所・准教授	1
A01 公	20H05150 スピン軌道結合金属における新 物質開発と電子液晶状態の解明	令和2年度 ～ 令和3年度	廣井 善二	東京大学・物性研究所・教 授	1
A01 公	20H05160 トポロジカル磁気構造に基づく 量子液晶を具現する薄膜物質開 発	令和2年度 ～ 令和3年度	松野 丈夫	大阪大学・理学研究科・教 授	1
A01 公	20H05161 常磁性液晶へのスピン注入によ る新機能創出	令和2年度 ～ 令和3年度	内田 幸明	大阪大学・基礎工学研究 科・准教授	1
B01 公	20H05153 磁気圧電効果を用いた電荷液晶 の観測	令和2年度 ～ 令和3年度	塩見 雄毅	東京大学・大学院総合文化 研究科・准教授	1
B01 公	20H05158 多軸ひずみ同時測定で解明する 量子液晶の異方的自己組織化の 熱力学	令和2年度 ～ 令和3年度	米澤 進吾	京都大学・理学研究科・准 教授	1
B01 公	20H05162 複合自由度を有する超伝導にお ける時間反転対称性の破れの観 測とその制御	令和2年度 ～ 令和3年度	細井 優	大阪大学・院基礎工学研究 科・助教	1
B01 公	20H05164 (廃止) Application of the micro-fabrication technique to the study of nematicity and superconductivity	令和2年度 ～ 令和3年度	孫 悦	青山学院大学・理工学部・ 助教	1
B01 公	20H05165 ミュオンでプローブする対称性 の破れと新奇な電子状態	令和2年度 ～ 令和3年度	足立 匡	上智大学・理工学部・教授	1
C01 公	20H05154 量子液晶におけるトポロジカル 励起と創発現象	令和2年度 ～ 令和3年度	赤城 裕	東京大学・大学院理学系研 究科（理学部）・助教	1
C01 公	20H05157 液晶秩序を発現する古典異方粒 子系における相転移ダイナミク ス	令和2年度 ～ 令和3年度	川崎 猛史	名古屋大学・理学研究科・ 講師	1

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
C01 公	20H05159 現代的な多極子理論による高次多極子・ネマティック相とエキゾチック超伝導の研究	令和2年度 ～ 令和3年度	柳瀬 陽一	京都大学・理学研究科・教授	1
C01 公	20H05163 多彩な対称性の破れが織りなす超伝導液晶の新奇動的応答	令和2年度 ～ 令和3年度	水島 健	大阪大学・基礎工学研究科・准教授	1
D01 公	20H05147 強相関 π 電子がつくる電荷秩序・強誘電ドメインの形成機構解明と光機能探索	令和2年度 ～ 令和3年度	伊藤 弘毅	東北大学・理学研究科・助教	1
D01 公	20H05148 ネマティック超伝導体の薄膜化によるドメイン制御とマヨラナ粒子の観測	令和2年度 ～ 令和3年度	井上 悠	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス 製造領域・研究員	1
D01 公	20H05155 トポロジカルスピン液晶制御と巨大電子散乱現象	令和2年度 ～ 令和3年度	金澤 直也	東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・講師	1
A01 公	22H04459 分子ダイマーダイポールが創成する量子パイ電子液晶	令和4年度 ～ 令和5年度	佐々木 孝彦	東北大学・金属材料研究所・教授	1
A01 公	22H04462 スピン軌道相互作用に由来するスピン液晶相の解明と物質開発	令和4年度 ～ 令和5年度	平井 大悟郎	名古屋大学・工学研究科・准教授	1
A01 公	22H04463 Anisotropic electron gas and memory application from spin-spiral formation	令和4年度 ～ 令和5年度	Hirschberger Maximilian	東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・准教授	1
A01 公	22H04471 分子線エピタキシー成長による人工ネマティック構造の創製	令和4年度 ～ 令和5年度	打田 正輝	東京工業大学・理学院・准教授	1
A01 公	22H04477 光磁気効果測定による液晶中のスピン拡散の機構解明	令和4年度 ～ 令和5年度	内田 幸明	大阪大学・大学院基礎工学研究科・准教授	1
A01 公	22H04478 界面に誘起されるトポロジカル磁気構造の微視的機構解明	令和4年度 ～ 令和5年度	松野 丈夫	大阪大学・大学院理学研究科・教授	1
A01 公	22H04484 軌道自由度による超構造を用いた量子液晶状態の探索	令和4年度 ～ 令和5年度	勝藤 拓郎	早稲田大学・理工学術院・教授	1

研究 項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
B01 公	22H04458 カゴメ遍歴磁性体における強磁場誘起量子液晶相の微視的研究	令和4年度 ～ 令和5年度	井原 慶彦	北海道大学・理学研究院・講師	1
B01 公	22H04464 スピン流でプローブする鉄系超伝導体の電子ネマティック秩序	令和4年度 ～ 令和5年度	塩見 雄毅	東京大学・大学院総合文化研究科・准教授	1
B01 公	22H04466 FFLO超伝導におけるネマティック液晶性の精査	令和4年度 ～ 令和5年度	今城 周作	東京大学・物性研究所・特任助教	1
B01 公	22H04467 パルス強磁場中における磁化と歪み測定によるスピンネマティック相関の検証	令和4年度 ～ 令和5年度	石川 孟	東京大学・物性研究所・助教	1
B01 公	22H04473 ネマティック電子液晶が形成するカイラル超伝導の磁気光学カー効果	令和4年度 ～ 令和5年度	米澤 進吾	京都大学・工学研究科・教授	1
B01 公	22H04474 量子スピン液体における回転対称性の破れとトポロジカル相転移	令和4年度 ～ 令和5年度	末次 祥大	京都大学・理学研究科・助教	1
B01 公	22H04475 3色超格子における超伝導ダイオード効果の探索	令和4年度 ～ 令和5年度	浅場 智也	京都大学・理学研究科・特定准教授	1
B01 公	22H04479 精密反射率測定によるネマティックドメイン及びそのダイナミクスの観測	令和4年度 ～ 令和5年度	中島 正道	大阪大学・大学院理学研究科・助教	1
B01 公	22H04482 磁場による電子対液晶状態の制御及び物性の精密測定	令和4年度 ～ 令和5年度	鄭 国慶	岡山大学・環境生命自然科学学域・教授	1
B01 公	22H04483 希土類化合物における量子液晶の発現と「悪魔の階段」へ導く機能性の解明	令和4年度 ～ 令和5年度	黒田 健太	広島大学・先進理工系科学研究科(理)・准教授	1
B01 公	22H04485 層間抵抗測定と面内磁場を活用した鉄系超伝導体ネマチック相の電子状態研究	令和4年度 ～ 令和5年度	寺嶋 太一	国立研究開発法人物質・材料研究機構・ナノアーキテクトニクス材料研究センター・グループリーダー	1
C01 公	22H04468 時間・空間反転およびゲージ対称性の破れを伴う電子液晶相の研究	令和4年度 ～ 令和5年度	速水 賢	北海道大学・理学研究院・准教授	1

研究 項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
C01 公	22H04469 スピン液晶スキルミオンの開拓 とその創発物性の探求	令和4年度 ～ 令和5年度	赤城 裕	東京大学・大学院理学系研 究科（理学部）・助教	1
C01 公	22H04472 キラル古典異方粒子系における トポロジカル相の制御	令和4年度 ～ 令和5年度	川崎 猛史	名古屋大学・理学研究科・ 講師	1
C01 公	22H04476 超伝導電流による広義電子対液 晶の物性探索・制御	令和4年度 ～ 令和5年度	大同 暁人	京都大学・理学研究科・助 教	1
C01 公	22H04480 超伝導液晶秩序がもたらす新奇 な非平衡現象	令和4年度 ～ 令和5年度	水島 健	大阪大学・大学院基礎工学 研究科・准教授	1
D01 公	22H04461 量子液晶におけるスピン・熱非 相反応答	令和4年度 ～ 令和5年度	小野瀬 佳文	東北大学・金属材料研究 所・教授	1
D01 公	22H04470 トポロジカルスピン液晶に由来 した創発的光機能性の探索	令和4年度 ～ 令和5年度	岡村 嘉大	東京大学・大学院工学系研 究科（工学部）・助教	1
D01 公	22H04481 スピン流を用いたスピン液晶の 磁化制御	令和4年度 ～ 令和5年度	新見 康洋	大阪大学・大学院理学研究 科・教授	1
公募研究 計 43 件（廃止を含む）					

[1] 総：総括班、国：国際活動支援班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

研究領域全体に係る事項

3 交付決定額

年度	合計	直接経費	間接経費
令和元年度	335,010,000 円	257,700,000 円	77,310,000 円
令和2年度	293,540,000 円	225,800,000 円	67,740,000 円
令和3年度	293,410,000 円	225,700,000 円	67,710,000 円
令和4年度	290,550,000 円	223,500,000 円	67,050,000 円
令和5年度	261,690,000 円	201,300,000 円	60,390,000 円
合計	1,474,200,000 円	1,134,000,000 円	340,200,000 円

4 研究領域の目的及び概要

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時の領域計画書を基に、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、どのような点が「革新的・創造的な学術研究の発展が期待される研究領域」であるか、研究の学術的背景や領域設定期間終了後に期待される成果等を明確にすること。

研究の学術的背景

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。この液晶状態は、液体の持つ流動性と固体の持つ異方性を合わせ持つ状態であり、分子の方向が何らかの規則的な秩序構造を持ちながら、容易に形を変えることができる柔軟性を有しているという特徴がある。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。すなわち、量子力学的な粒子が多数集まり、相互作用を及ぼし合うと、新しい状態が創発するのである。特に近年、様々な固体物質の電子状態において、反強磁性や電荷密度波などのよく理解されている秩序ではなく、実体が未解明の秩序が報告されている。これらの新しい秩序は、**電子の液体状態と固体状態の中間的な性質を示すことから、古典的な液晶との強いアナロジーがある。**

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よ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。

本研究領域の目的および全体構想

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**（下図参照）。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、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。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。

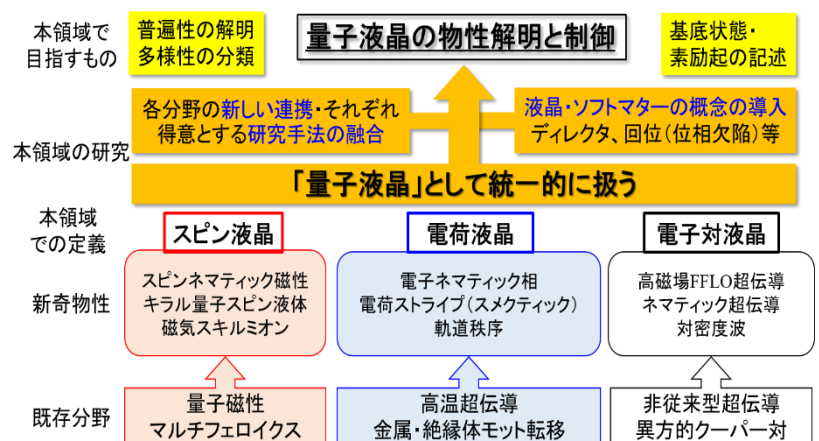
・研究項目 C01「量子液晶の理論構築」

様々な理論的方法を駆使して、種々の量子液晶電子状態の秩序パラメータの定式化、その量子揺らぎが他の物性に与える影響を研究し、物質および機能の設計を行う。

・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。

革新的・創造的な学術研究の発展

液体と液晶を比較すると、流動性を持つという特徴は共通しているが、水などの液体ではどの方向から見ても内部の構造は区別できないという点で対称性が高い状態である。一方で、液晶では見る方向によって見え方が異なり、対称性が低い状態になっている。つまり、「対称性の破れ」によって2つの状態を区別することができる。研究分野の位置づけとしては、**液体を対象とした物理学は「流体力学」**によって記述され発展してきたが、**液晶を対象とした分野はそのパラエティや階層構造の多様性により多岐にわたっており、容易に形を変えることができる柔軟性を有している特徴から「ソフトマター」**という一大物理分野が形成されている。歴史的には、ノーベル物理学賞受賞者の de Gennes らにより、このように複雑な系でも相転移やスケールリングなどの美しい理論解析が可能であることが示され、液晶ディスプレイなど様々な応用がなされている。

一方で、**液体に対して量子力学的な多体効果を取り入れた「量子流体・量子液体」**の科学が近年発展している。ヘリウムを極低温まで冷却しても固体にはならず、量子揺らぎによるゼロ点振動の効果により液体状態を保つことが知られている。さらに、固体物質中に多数含まれる電子についても、極低温において液体と類似の流動性を持った状態が実現する。例えば、金属では電子は自由に動き回ることができ、電子間のクーロン反発力はスクリーニングされ、「フェルミ液体」論で記述できる状態となる。また、絶縁体においては、各サイトに局在した電子のスピンの向きが秩序だって固定される強磁性や反強磁性などの状態は、流動性がないスピンの固体状態としてとらえられるが、例えば反強磁性的な相互作用を持つスピンを三角形に配置しようとしてもフラストレーションが生じるなどの理由により、特殊な状況ではスピンの向きが絶対零度まで固定されない量子スピン液体の状態も起こりうる。このような量子多体効果が重要な「量子流体・量子液体」の分野では、超伝導や量子ホール効果などの重要な概念が生み出され、確立されており、量子液体の研究は物性物理学において大きな役割を果たしてきたといえる。

本領域の研究対象である「**量子液晶**」は、**量子液体に対して、回転対称性や並進対称性の破れを導入した状態であり、液体と液晶を区別する「対称性の破れ」と液体と量子液体を区別する「量子多体効果」の両方を含んだ学術領域**と考えることができる。このような新しい学術領域を開拓することにより、革新的・創造的な学術研究の発展が期待される。

領域設定期間終了後に期待される成果

本新学術領域「量子液晶」では、量子多体効果により出現する、異方的で容易に形を変えることができる柔軟性を有する電子状態に関する新しい**普遍現象を理解し、豊かな多様性を探究するとともに、新規物性の開拓**を進める。対象とする物質群は、銅系・鉄系高温超伝導体、 $4d$ 、 $5d$ 、 f 電子系物質、有機伝導体、フラストレーションを持つスピン液晶候補物質、キタエフ型スピン液体、スキルミオン物質、マルチフェロイック物質など広範囲にわたる。これらの様々な系に共通する物理概念の構築と、それぞれに特徴的な多様性の理解が進むことにより、期間終了後には、特に物性物理学の分野で「量子液晶」という言葉が当たり前用いられるようになることが期待される。また、上で述べたような研究分野の位置づけから、「量子液晶」の研究は、ソフトマター分野の量子版と位置付けることができ、**量子液晶の学理が構築**されれば、それ自体が学術的に大きな意義を持つ。量子液体における流動性を保ちながら、対称性を破った液晶との類似性が現れる電子状態を広く研究することで、量子液体とは異なった新しい概念や機能が生まれることが期待される。

また、新しい基底状態を解明し、素励起を制御することは、量子効果を利用した将来の新技术への基礎を築くものである。古典液晶では、柔軟性を生かした偏光制御などの応用がなされているが、その速度は分子の回転運動によって律速される。一方で、電子の多体効果による量子液晶では、外場により電子状態そのものが容易に変化し、**超高速かつ巨大な応答**が期待される。このように量子液晶は、固体中に実現したソフトな電子状態として捉えることが可能であり、古典液晶を超えた機能を示すポテンシャルがある。

期待される成果の具体例としては、量子液晶の素励起を媒介とした新しい電子対形成が可能であることが示せれば、通常の超伝導とは異なる高温超伝導の設計指針が与えられる可能性がある。また、キタエフ型スピン液体で発見されたマヨラナ粒子は、トポロジカル量子コンピュータ実現への重要な鍵と考えられており、それを基にした対称性を破る量子液晶では、マヨラナ粒子の新たな制御技術に結びつく可能性がある。さらに、量子液晶の異方性を高速制御することにより、量子波ダイオードなどの応用が考えられ、量子情報伝達に役立つ新機能の開拓が期待される。

5 審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況

研究領域全体を通じ、審査結果の所見及び中間評価結果の所見において指摘を受けた事項があった場合には、当該指摘及びその対応状況等について、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

(審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況)

(審査結果の所見) <公表分>

本研究領域は様々な物質群で発見されている液晶的な電子状態に着目し、量子多体効果による電子系の自己組織化現象を統一的に取り扱う基礎学理を明らかにすることを目指している。絶縁体、強相関金属、超伝導体などの幅広い物質系において古典液晶系と類似の空間的変調を伴う現象を取り上げ、それらを「スピン液晶」、「電荷液晶」、「電子対液晶」という新奇現象に分類し、これら3種類の液晶状態を「量子液晶」という言葉でまとめ、統一概念を形成することは、物性物理学分野において日本発の潮流を生む学理として期待できる。さらに、量子多体効果により出現する異方的で柔らかな量子液晶の電子状態は外場に敏感に変化し、超高速な巨大応答が期待できるデバイスが出現すると予想され、応用面でも波及効果が期待される。

量子液晶という新概念の世界的な浸透を目的とし、量子液晶チャンネル(QLC channel)というホームページ上でのビデオ配信を含めた情報配信が予定されており一定の成果が期待される。

研究組織は物質開発、現象の精密測定、理論、制御と機能探索の四つの計画研究から構成され、量子液晶の物理を多面的に研究する構成となっている。一方で、古典液晶物理学の研究者層を厚くし、電子物性物理学と古典液晶物理学の相乗効果により新奇概念を構築することが望まれる。

所見に対する対応状況

審査結果の所見にて、一定の成果が期待されると評価された情報発信については、計画通り「量子液晶チャンネル(QLC channel)」というビデオ配信サイトを初年度から立ち上げ、新学術領域の内容の説明、公募説明会の内容、領域メンバーによる研究成果の平易な解説を随時公開している。現在までに、量子液晶の一般的な説明を含む解説、英語による成果解説、および研究室の実験デモなどを含めて合計44本のビデオを常時配信し、合計の視聴回数は約24,000回となっている。複数のSNSや、日本物理学会の講演などでもこのQLCチャンネルの取り組みや配信動画が取り上げられ、量子液晶の概念はかなり浸透した。

また、所見で指摘を受けた古典液晶物理学の研究者層を厚くすることに関しては、第1期および第2期公募研究の通算4年間において、**古典液晶の実験研究(A01 内田) および理論研究(C01 川崎)を迎え**、研究会などで相互理解を深める活発な議論を行った。また、日本液晶学会に所属する内田を通して、本領域の取り組みについて、年4回発行されている**日本液晶学会誌「液晶」の2021年7月号にて、「量子液晶」特集**を組み、領域メンバー8名(芝内、大串、木村、花栗、佐藤卓、紺谷、求、有馬)による5つの解説が掲載された。これらの取り組みにより、古典・量子液晶の共通点、相違点がより明確となった。

(留意事項) <未公表分>

・研究内容は主として電子系の研究からの発展であるため、もう一方の柱であると思われる古典液晶物性側からのアプローチを有効にする、かつ、無機物質系だけではなく有機物質系における量子液晶状態についても研究の裾野を広げることを介して、異分野研究者や若手研究者などを公募研究等で積極的に取り込むなど、開かれた領域運営が望まれる。

・空間軸、時間軸の観測装置が、量子液晶の本質をつかむために十分な性能を、5年間で引き出せるかがキーポイントになる。特に空間的なヘテロジニティが本質的に内在される場合や、高速な揺らぎによって平均化が起こっているようなケースの場合、観測に引っかけられない可能性も危惧されることから、観測装置の性能の再検証を行い、設計・製作・観測の綿密な年次計画に基づいた確実な実行が必要である。

留意事項に対する対応状況

留意事項前半に関しては、第1期および第2期公募研究において、**無機固体物質系以外を主な研究対象としている研究者6名が参入**し、本新学術領域研究でカバーできる分野の範囲が大きく広がった。上で述べた古典液晶・ソフトマターの研究者2名(実験、理論研究者それぞれ1名)のほか、有機物質・分子性物質の物性研究を専門とする実験研究者3名(A01 佐々木、B01 今城、D01 伊藤)、さらにヘリウム超流動を含む量子液体をベースとする理論研究を行っているC01 水島の参加により、領域研究のすそ野が広がり、より広い視野での議論が可能となった。また、令和2年度よりC01 池田が受け入れた博士研究員(渡部)は有機物質を主な対象とした理論研究を専門としており、有機物質系の実験・理論の連携も可能な体制となった。また、第1期公募研究では、参入した17名の研究代表者のうち、39歳以下の**若手**

研究者は 8 名に、第 2 期では 26 名中 14 名に上る。また、このうち 3 名は外国人研究者であり、本研究領域のダイバーシティを強化できたと考えている。

留意事項後半に関しては、**精密測定、および制御と機能を担当する B01、D01 班の計 7 名が空間・時間軸の観測装置の開発・計測を行い、様々な新しい測定が可能**となっている。特に、B01 花栗により、原子レベルの空間分解能を有する希釈冷凍機中走査型トンネル顕微鏡 (STM) を用いた、極低温磁場中の超高エネルギー分解能電子状態観測が可能となり、0.1 meV 以下の分解能で準粒子干渉 (QPI) スペクトロスコピーを用いた研究を推進した。また、量子液晶の時空間構造を計測するため、D01 石坂により、パルスレーザーとフォトカソード電子銃を用いたポンププローブ型の超高速時間分解電子顕微鏡の開発を行い、明視野像計測で時間分解能 5 ps、空間分解能 3 nm を達成した。また、ローレンツ像計測による磁気イメージングで、時間分解能 10 ns、空間分解能 30 nm を達成している。さらに、量子液晶が示す空間的なヘテロジニティとダイナミクスの研究では、D01 戸川による透過型電子顕微鏡を用いたナノスケール (空間分解能 ~1 nm) での実空間観察とナノスケールの微小試料での 40 GHz までのダイナミクス計測の研究が進み、D01 小林および B01 清水により、ダイヤモンド中の窒素空孔結晶欠陥 (NV センタ) を用いた量子スピン顕微鏡の開発が行われ、試料表面の磁場・温度を分解能 1 μ T 以下、空間分解能 1 μ m 以下、温度 1 K 以下でのイメージングが可能となった。

(中間評価結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況)

(評価結果)

A+ (研究領域の設定目的に照らして、期待以上の進展が認められる)

(評価結果の所見) <公表分>

本研究領域では、固体物質中に現れる液晶に類似した電子状態である「量子液晶」に着目し、量子液晶ならではの特異な電子物性における普遍性の解明や多様性を分類することで新しい学理を構築するとともに、量子液晶状態を計測する新技術開発と制御の基礎を築くことを目的としている。

本研究領域では理論と実験が巧く連携し、これまでの物性物理研究を「量子液晶」という概念で捉え直すことで、量子液晶の配向制御、アナポールや量子液晶波の発見などユニークかつ卓越した研究成果が既にいくつか得られており、量子液晶に関する統一的な理解へも進んでいることから期待以上の進展が認められる。また、世界的に認知されつつあるネマティック電子状態的な概念を 4 つの秩序相にカテゴライズできることを理論的に見出すなど、共通学理構築に向けた展開を明確に示している点も高く評価できる。

国際的な連携・共同研究が順調に進んでおり国際的にも十分認知されていると判断できる。今後は研究分野の広がりや他分野への波及効果の観点でより一層の発展を期待したい。

(留意事項) <未公表分>

物質の学理研究から、何らかの材料としての機能が見出されることを期待する。

所見・留意事項に対する対応状況

中間評価では、本領域の取り組みに対して高い評価をいただいた。今後の研究分野の広がりを促進するため、2022 年度より開始した国際スーパーネットワーク Quantum Materials Accelnet に日本を代表して参画し、若手研究者の国際交流など、終了後も**引き続き国際共同研究を促進する取り組み**を続けている。

また、指摘のあった**材料の機能として、様々な新しい方向性が見出されている**。特に、物質開発を担当した A01 班では、永崎により磁性高温超伝導体において超伝導磁束により磁気層のスピンを制御を可能とし、高速・低消費電力のオール超伝導回路に向けた要素開発を行ったことや、木村による 3 段階の調光機能を有する反強磁性体の開発、島川による巨大圧力熱量効果を示す新物質開発により熱制御に利用できることを実証したことなどが例として挙げられる。さらに、量子液晶の制御と機能を担当した D01 班では、石坂により異方的な軌道秩序を持つ強相関モット絶縁体において、光照射誘起の強い方向性を持つ歪の発生が見いだされ、思い通りの偏極を持つ光音響波 (MHz~GHz) の発生への提案がなされた。また、戸川によりカイラルスピン物質がサブテラヘルツ帯で動作する材料として機能することが示され、数百 GHz のサブテラヘルツ帯にも及ぶ広帯域で可変な共鳴特性により、現行の 5G 通信技術を超える次世代通信システムへの技術開発につながることを期待される。公募研究の金澤は、非磁性絶縁体 FeSi において新しいトポロジカル表面状態を発見し、電流による磁化制御機能を実現した。希少元素を使用しない磁気メモリ (MRAM) への応用が期待できる[金澤ら, 特願 2022-030135]。

6 研究目的の達成度及び主な成果

(1) 領域設定期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか、(2) 本研究領域により得られた成果について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。(1)は研究項目ごと、(2)は研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で記載すること。なお、本研究領域内の共同研究等による成果の場合はその旨を明確にすること。

(1) 領域設定期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか

本新学術領域研究では、強相関金属、磁性絶縁体、超伝導体など、様々な固体物質中に出現する、液晶と類似した電子状態をそれぞれ電荷液晶、スピン液晶、電子対液晶と整理し、「量子液晶」と統一的にとらえることにより、その普遍性の解明と多様性の分類を通して、物性を解明し、状態制御による機能開拓を目指し、量子液晶の基礎学理を構築することを目的としている。

本領域研究により、**量子液晶の多様性・普遍性に関する大きな進展**があった。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、イリジウム酸化物やカゴメ超伝導体において、原子間にループ電流が流れるナノ電磁石が実現した量子液晶状態が発見された。その他、超伝導体における電子対液晶状態や、メゾスコピックスケールの量子液晶波の観測、さらにはノーダルライン半金属における量子液晶など、様々な新奇量子液晶が見つかった。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**が示された。量子液晶秩序の空間反転対称性および時間反転対称性の有無により、4つの秩序に分類し、定量解析を可能とする**量子液晶構造因子・形状因子という物理量が提案**された。第3に、**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**することを実験的に検証することに成功した。量子液晶の量子臨界点近傍で、揺らぎの増大に付随した電子対増強を示す結果が得られ、高温超伝導の新しい機構として注目されている。第4に、キタエフ磁性体における**量子スピン液体において、マヨラナ準粒子励起の証拠**が示され、さらに**磁場誘起型の量子液晶状態へのトポロジカル転移**の存在が、実験および理論により示唆された。この結果により、量子液晶とトポロジーという研究領域の融合に向けて、新たな展開につながることを期待される。

さらに、様々な量子液晶および関連物質の開発や、各種新しい研究手法の開発が進むことにより、前ページや下記に具体的に述べるような**様々な量子液晶関連物質における新しい機能の提案**が示された。

研究項目 A01 非自明な対称性の破れを示す新奇量子液晶物質の開発を進め、様々な新奇な電子状態の開拓に成功している。**電荷液晶として**、 $\text{NdCu}_3\text{Fe}_4\text{O}_{12}$ の電荷移動現象、梯子型鉄系化合物のキラル軌道秩序、 CsW_2O_6 の電荷秩序など、**スピン液晶として**、 $\text{Pb}(\text{TiO})\text{Cu}_4(\text{PO}_4)_4$ 、 BaMn_2As_2 の磁気四極子秩序、 $\text{LiInCr}_4\text{S}_8$ 、 AgCrS_2 の巨大磁場誘起歪など、**エキゾチック超伝導として**、 $\text{Mg}_2\text{Ir}_3\text{Si}$ 、 $\text{Sc}_{20}\text{C}_{8-x}\text{B}_x\text{C}_{20}$ 、Ca フリー銅酸化物、 Sc_6MTe_2 、 $\text{Pt}(\text{Bi}_{1-x}\text{Ch}_x)_2$ などが発見された。計画した三つのマイルストーン(**新しい金属絶縁体転移系・導電性マルチフェロイクス・室温量子液晶物質**)に関しても順調な進展があった。新しい金属絶縁体転移系としては、キタエフスピン液体と強相関半金属の間を繋ぐ系 $\text{RuBr}_3\text{-RuI}_3$ の開発、導電性マルチフェロイクス BaMn_2As_2 の同定に成功した。さらに、室温量子液晶物質としては、室温付近で電荷移動に伴う巨大な潜熱を示す $\text{NdCu}_3\text{Fe}_4\text{O}_{12}$ 、室温で原子配置の回転歪みで特徴づけられる秩序「フェロアキシシャル秩序」を示す NiTiO_3 など、複数の物質の発見に成功した。

研究項目 B01 量子液晶の構造・素励起・ダイナミクスを空間的・時間的な階層の中で実験的に解明し、量子液晶の科学の体系化に資する質の高い実験データを取得することを目標とした。そのため、量子液晶の代表的な三つの形態である電荷液晶・スピン液晶・電子対液晶を班全体で包括するように個別のテーマ設定を行い、各班員が有する様々な精密物性計測技術を糾合して研究を行った。また、新しい量子液晶の探索や新しい計測技術開発も行った。その結果、**鉄系超伝導体・キタエフ量子スピン系を中心に量子液晶の理解が大きく進み**、トポロジカル量子物性などの周辺分野との関係も明らかになりつつある。また、**分光イメージング測定、熱輸送・比熱測定、超高速測定などの実験技術を大きく進展**させることができた。

研究項目 C01 多彩な量子液晶の根底にある普遍的機構の解明を目指し、物質横断的な統一的理論体系を構築することで、量子液晶の物性科学の発展に寄与するとともに、他の実験班に対する理論的サポートを行う。その実現に向けて、具体的には、**(a)電荷液晶・電子対液晶の発現機構、および創発現象の研究 (b)スピン液晶秩序の発現機構、および創発現象の研究 (c) 動的性質・非平衡現象・観測理論の確立 (d)**

第一原理理論による量子液晶の物質設計の研究を計画的に遂行し、着実な進展を見せた。また量子液晶における量子効果の重要性を明らかにするため、古典液晶の研究も遂行した。

研究項目 D01 ナノサイエンスによる電気的アプローチと超高速光技術に基づく分光的アプローチを組み合わせ量子液晶研究を推進した。領域設定期間の最終目的は、量子液体という特異な柔軟性を持つ電子状態の巨視的な性質を制御する手法を確立し、物性科学の新しい可能性を創出することである。そのために、具体的には **(a) 量子液晶の制御と機能開拓のための先端技術開発、(b) 量子液晶の制御の実証：素励起と配向性、(c) 量子液晶の機能開拓=量子液晶テクノロジー**の3項目に沿って研究活動を展開した。実際、以下に示すようにそれぞれにおいて着実な成果を得た。

(2) 本研究領域により得られた成果

本領域の5年間の研究により、多岐にわたる研究成果が得られ、**768編の論文、318件の国際会議基調・招待講演**などで発表された。公表された論文は、*Nature* (5編) *Science* (5編) *Nat. Mater.* (1編) *Nat. Nanotechnol.* (1編) *Nat. Phys.* (5編) *Nat. Commun.* (33編) *Sci. Adv.* (11編) *Adv. Mater.* (1編) *Adv. Func. Mater.* (2編) *ACS Nano* (2編) *JACS* (6編) *Nano Lett.* (5編) *PNAS* (12編) *Phys. Rev. X* (9編) *Phys. Rev. Lett.* (34編) などハイインパクトジャーナルに多く掲載された。**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、103編の共同研究論文が出版**されている。これらの結果に関し、113件のプレスリリースを行い、78件の新聞記事を含む163件のメディア報道につながった。以下、各研究項目の具体的な研究成果について述べる。

研究項目 A01

計画研究 (6名) 大串は、高圧合成法を駆使することで新しい蜂の巣格子化合物 $\text{Ru}(\text{Br}_{1-x}\text{I}_x)_3$ を合成し、バンド幅制御型金属絶縁体転移においてアニオン間の化学結合形成と準粒子の有効質量増大が重要な役割を担っていることを明らかにした。また、奇パリティ磁気多極子秩序系 $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Mn}_2\text{As}_2$ において電気磁気効果と密接な関係のある異方的磁気抵抗効果を発見した。さらに、梯子型鉄系化合物 $\text{BaFe}_2(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)$ の包括的な電子相図を描き、キラル軌道秩序/ブロック反強磁性と強軌道秩序/ストライプ反強磁性が安定化機構を解明した。**永崎**は、磁性高温超伝導体 $\text{EuRbFe}_4\text{As}_4$ において、磁束量子の向きによってスピンの向きが決まる現象を発見し、これを利用したスピン配列の制御に成功するとともに、超伝導電子対の秩序変数が空間的に変調したPDW状態となっていることを明らかにした。また、銅酸化物高温超伝導体で最も高い転移温度を有する $(\text{Hg,Re})\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+d}$ の大型単結晶試料育成法を確立した。さらに、新規アンチペロブスカイト型超伝導体 APd_3X ($A = \text{La, Ca, Sr, Ba, Eu, X} = \text{P, As}$) を発見した。**岡本**は、 d 電子が電子物性を担う新超伝導体を10個以上発見した。 Sc_6MTe_2 は遷移金属の特徴が超伝導の性質に現れるユニークな系である。 CaAgP において、ノーダルラインに起因する超高移動度電子キャリアの存在と表面超伝導の実現を示唆する結果を得た。 Cr を含む磁性体が、新しい機構に基づく巨大磁場誘起体積変化を示すことを明らかにした。パイロクロア CsW_2O_6 が、分数価数の電荷秩序と分子形成を伴う新しいタイプの電子自己組織化現象を示すことを見出した。**木村**は、自らのグループで構築した電場・偏光変調イメージング法を利用した光学特性測定系をフェロアキシヤル物質・マルチフェロイック物質・キラル物質に適用し、物質に特有の光学応答(フェロアキシヤル物質における電気旋光効果、マルチフェロイック物質における電場誘起ファラデー効果・電場誘起円二色性、キラル物質におけるレーザー照射キラル反転の観測など)を実験的に明らかにした。**工藤**は、三角形ネットワークを持つ超伝導体 $\text{Pt}_{1+x}\text{Bi}_2$ 、 $\text{Pt}(\text{Bi}_{1-x}\text{Ch}_x)_2$ ($\text{Ch} = \text{Se, Te}$) を発見した。極性非極性構造相転移の近傍で超伝導転移温度が上昇する。また、ハニカムネットワークを持つ BaPtAs 、 BaPtSb の超伝導が電子格子相互作用では説明できないことを示唆する結果を得た。さらに、カゴメネットワークを持つ超伝導体 $\text{Mg}_2\text{Ir}_3\text{Si}$ 、 $\text{Mg}_2\text{Ir}_{2.3}\text{Ge}_{1.7}$ を発見した。化学置換によって2種類の原子位置が入れ替わり、転移温度が著しく上昇する。**島川**は、異常高原子価遷移金属イオンを含む酸化物において、その電子的不安定性を解消するために起こる電荷転移が、電荷—スピン—格子と強く相関し、おのおののエントロピー変化が重畳することで巨大な応答となることを発見した。この巨大なエントロピー変化は熱量効果として熱制御に利用できることも実証した。また、特異なAサイト磁性を示す $\text{CaFe}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ では、埋もれたカゴメ格子での長距離磁気相互作用の拮抗により、3つの反強磁性スピン副格子が直交した極めて珍しい磁気秩序が現れることを明らかにした。

公募研究 (令和2-3年度:5名、令和4-5年度:7名) 佐々木は、量子スピン液体候補物質 $\text{k}(\text{BEDT-TTF})_2\text{Cu}_2(\text{CN})_3$ の中性子非弾性散乱の実験から、ダイマーモット絶縁体状態におけるパイ電子のスピン・電荷の自由度とダイマー構造に特徴的な特定フォノンモードとの結合を見出し、低温異常の起源を提案した。**平井**は、精密な回折実験によって RuP において分子状クラスターが形成されること、高温では量

子液晶的な相が存在することを明らかにした。また、 $5d$ 遷移金属化合物 $A_2\text{Re}_2\text{O}_7$ ($A=\text{Cd}, \text{Pb}$) におけるネマティック秩序の詳細を解明した。**ヒルシュベルガー**は、伝導電子と磁気テクスチャーとの相互作用について探索を行い、揺らぎの効果に起因した電氣的ホール効果と熱電ネルンスト効果の発現機構について微視的な知見を得た。**打田**は、分子線エピタキシー法により高品質な $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ 薄膜の作製に成功した。基板からの巨大な引張歪みによって面直方向の Ru-Ru 間距離が大きく減少し、ネマティック秩序を伴うメタ磁性転移がゼロ磁場まで移動し、強磁性基底状態が安定化することを明らかにした。**内田**は、液晶を用いたスピン機能の創出について研究を行い、イオン伝導性を有するニトロキシドラジカル液晶等の合成と物性について報告した。さらに、液晶を用いたナノシート合成法を確立した。**松野**は、スピン軌道相互作用の大きい $5d$ 電子系酸化物と強磁性体の二層膜を作製し、スピン軌道トルク測定により $5d$ 電子系がスピントロニクス標準物質である Pt や W と同程度の高い電流-スピン流変換効率を示すことを明らかにした。**勝藤**は、NaCl 構造をとる $\text{VO}_x, \text{TiO}_x$ の大型単結晶試料を作製することに世界で初めて成功し、カチオンの欠損が物性に大きな影響を与えていることを明らかにした。**野島**は、 $\text{SrTiO}_3(100)$ 電場誘起表面の低キャリア密度領域において、強誘電性と 2 次元的金属性が共存すると、非相反性を伴う特異な輸送特性現象が現れることを見出した。**廣井**は、スピン軌道結合金属であるパイロクロア酸化物 $\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$ において、ピエゾ素子を用いた正方晶ドメインの制御を行い、奇パリティ多極子相の格子及び電気伝導性の異方性を明らかにした。また、2つの低温正方晶相の間に斜方晶が存在する事を見出した。

研究項目 B01

計画研究 (7名) **花栗**は、分光イメージング STM を用いて鉄系超伝導体 $\text{Fe}(\text{Se}, \text{Te})$ における電荷液晶・超伝導・バンドトポロジーの関係を明らかにした。また、 GdRu_2Si_2 における様々な磁気相の空間構造を明らかにした。さらに、 $\text{BaNiS}_2, \text{ZrSiS}, \text{NaAlSi}$ といったノーダルライン半金属において、新奇な電子ネマティック状態を発見した。**笠原**は、強磁場中での熱輸送特性・磁気トルク測定により量子液晶状態の探索研究を行った。38 T までの強磁場下で熱伝導度の精密測定を可能にし、 FeSe におけるフルド-フェレル-ラーキン-オフチニコフ (FFLO) 状態の証拠を得た。また、磁気トルク測定から、イリジウム酸化物においてアナポール秩序を発見した。**佐藤**は、中性子散乱による研究を展開した。キタエフ量子スピン系 RuCl_3 の類縁物質である RuBr_3 の結晶構造・磁気構造・磁氣的相互作用を解明し、キタエフ量子スピン系候補であることを示した。また、交流電流下での中性子小角散乱実験からカイラル磁性体 MnSi におけるスキルミオンダイナミクスに関する知見を得た。**芝内**は、様々な量子液晶の低エネルギー励起の特徴を明らかにした。 $\text{Fe}(\text{S}, \text{S}, \text{Te})$ に現れる多彩な超伝導相と電子ネマティック状態の関係を様々な精密測定によって明らかにした。また、 RuCl_3 において、マヨラナ準粒子励起の存在を示す比熱の磁場方向依存性を見出した他、高磁場領域で新たな量子液晶相を発見した。**清水**は、NMR を用いた量子液晶の磁気励起の特徴解明を行った。 RuCl_3 においてマグノンの励起とマヨラナ準粒子励起が共存することを明らかにした他、化学置換による基底状態の変化を観測した。また、三角格子分子性物質 $\kappa\text{-(ET)}_2\text{B}(\text{CN})_4$ においてギャップレス量子スピン液体相の出現を示唆する結果を得た。**廣理**は、低温強磁場下で動作する THz-STM の開発を行った。超伝導磁石内に設置した STM に導いた THz パルスによって、平均トンネル電流 30 pA と時間分解能 250 fs を実現した。また、THz 電場パルスと螺旋状金属メタマテリアルを用いて 1 T を超える強磁場パルスの発生に成功し、磁性研究へ応用した。**和達**は、超高速スピン観測技術開発を行った。時間分解磁気光学 Kerr 顕微鏡を開発し NiCo_2O_4 薄膜における 0.4 ps の超高速消磁を観測した。また、ポンププローブ法による超高速消磁の観測に元素選択性を付与するには従来放射光の利用が不可欠だったが、パルスレーザーの高調波を利用して実験室での観測を可能にした。

公募研究 (令和 2-3 年度 : 5 名、令和 4-5 年度 : 11 名) 公募班には、計画班メンバーと相補的なアプローチを志向する研究者計 14 名が参画して研究を行った。**塩見**は、スピンゼーベック効果を用いたスピン流生成をプローブとして量子液晶の特徴を調べる手法を提案し、 $\text{LiCuVO}_4, \text{CuGeO}_3, \text{BaNi}_2\text{V}_2\text{O}_8$ に適用した。**米澤**は、ファイバブラッググレーチング法による URhGe におけるピエゾ磁気効果の検出、磁気光学 Kerr 効果測定によるカゴメ物質 CsV_3Sb_5 の時間反転対称性破れの検出を行った。**細井**は、Bi のバレーが応力に敏感なことを利用して電子状態を制御することに成功した。**孫**は、対破壊電流密度の測定から鉄系超伝導体 $\text{Fe}(\text{Se}, \text{Te})$ の電子状態を調べた。**足立**は、ミュオンスピン緩和 (μSR) 実験を行い、 $\text{BaPtAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ がカイラル d 波超伝導である可能性を指摘した他、 $\text{FeSe}_{1-x}\text{S}_x$ のスピンゆらぎについても調べた。**井原**は、カゴメネットワークを持つ遍歴磁性体の電子状態を調べ、磁気秩序の有無やバンド構造に関して知見を得た。**今城**は、パルス強磁場中での超音波測定を行い、擬二次元有機超伝導体における FFLO 状態を示唆する結果を得るとともに、その不純物効果を明らかにした。**石川**は、パルス強磁場下での磁化・磁歪の測定を行い、ボルボサイト化合物におけるスピンネマティック状態の特徴を明らかにした。**末次**は、 RuCl_3 の比熱・熱伝導度・熱ホール効果の測定から、相転移

やマヨラナ準粒子に関する知見を得た。**浅場**は、数原子層の厚さを持つ希土類化合物の人工超格子構造を作製し、超伝導電子対が有限の運動量を持つヘリカル超伝導の証拠を得た。**中島**は、直線偏光を用いた反射率測定から鉄系超伝導体の母物質 BaFe₂As₂ ネマティックドメイン可視化に成功した。**鄭**は、角度分解 NMR・帯磁率測定を行い、Cu_xBi₂Se₃ の電子対液晶の方向を外部磁場によって制御することに成功した。**黒田**は CeSb の「悪魔の階段」と呼ばれる長周期反強磁性逐次転移に伴う電子状態変化を角度分解光電子分光測定によって調べるとともに、スピン・角度分解光電子分光技術の開発を行った。**寺嶋**は、鉄系超伝導体 CaFeAsF、FeSe の層間電気抵抗の面内磁場角度依存性を詳細に測定し、ネマティシティ、磁束ピン止めに関する知見を得た。

研究項目 C01

研究計画 (7名) **紺谷**は、電荷液晶の発現機構や安定性を明らかにするため、従来の平均場的理論を超えた多電子理論を構築した。構築した理論に基づき、以下の具体的な研究成果をあげて、電荷液晶に対する統一的理解に貢献した。(i)ねじれ 2 層グラフェンにおけるネマティック秩序の機構解明。(ii) Dirac 半金属 BaNiS₂における有限エネルギー・ネマティック相の解明。(iii)幾何学的フラストレーションを有する強相関金属であるカゴメ金属 AV₃Sb₅(A=Cs,Rb,K)における、ループ電流秩序をはじめとする多重量子液晶相の解明。**求**は、スピン液晶に関して、非自明な磁気秩序状態と量子スピン液体という異なる角度からのアプローチを行なった。前者については、スピンモアレという概念を提案し、磁気秩序だけでなくトポロジカルな性質や創発電磁場を有効に制御できることから、新規量子相の探索・設計に有効であることを示した。後者については、スピン 1 の拡張キタエフ模型において、スピン液体とスピン液晶の競合による新規量子相を発見した。さらに、機械学習で用いられる自動微分を活用した逆問題の新しい解法を構築した。**有田**は、超高压下で室温に近い温度で超伝導転移温度を起こす水素化物について、第一原理経路積分分子動力学シミュレーションを行い、量子効果と有限温度の効果が超伝導に有利な対称性の高い結晶構造を実現することを示した。また、ニッケル超伝導体の発見をうけ、パラジウム酸化物超伝導体の物質設計を行なった。磁性体については、効率的な磁気構造予測法を開発し、第一原理ハイスループット計算と組み合わせ、FeS と MnAlPt が近年話題となっている交替磁性体であることを示した。**池田**は、銅酸化物のネマティシティと高温超伝導の関係に関して、変分モンテカルロ法に基づく研究を遂行した。また LDA+DMFT および LDA+FLEX のコード開発を行い、強相関効果やスピンゆらぎを取り込んだバンド構造の変形効果を考慮した第一原理計算の汎用コードを構築した。さらに、カイラリティ誘起スピン選択性で注目されるカイラル物質やフェロアキシシャル物質を特徴づける自由度として、電子カイラリティの密度分布や電子スピンに起因する電気分極の重要性を明らかにした。**遠山**は、「富岳」等のスパコンを用いた大規模数値計算により、強相関電子系や量子スピン系における量子液晶関連状態での動的・非平衡現象を明らかにした。特に、銅酸化物高温超伝導体のストライプ状態における非弾性中性子散乱スペクトル構造の再現や、ループ状のスピン流の発現条件を解明した。ポンプ光照射により生じる非平衡現象について、モット絶縁体の動的スピン構造因子やマグノンラマン散乱の時間変化を計算し、時間分解非弾性共鳴 X 線散乱実験に対する重要な提案を行った。**佐藤**は、(a)温度勾配、(b)レーザー、(c)強電場で誘導されるスピン液晶、スピン液体、超伝導体における非平衡状態や新機能を予言した。具体的には、(a)磁性体 LiCuVO₄やキタエフスピン系の液体相におけるスピnzeーバック効果。(b)周期外場中の散逸量子系の非平衡定常状態の理論構築、反転対称性が破れたスピン液体や磁気秩序相における光スピン流整流の予言。(c)モット絶縁体に強電場を印加してトポロジカル磁気欠陥(スキルミオンやヘッジホッグなど)を生成する方法の提案。**Shannon** は、(a)スピン-1 磁性体の数値シミュレーションのための新手法開発、(b)スピン-1 キタエフ系へのこの手法の応用、(c) 量子液晶における重力波のアナログを実現するための提案を実施した。(a),(b)は現在非常に活発な研究分野であり、インパクトは大きい。(c)は重力波天文学で研究されている疑問と、非従来型磁性体や冷却原子の卓上実験とを結びつける学際的な側面を強く持つ。

公募研究 (令和 2-3 年度：4 名、令和 4-5 年度：5 名) **川崎**は、異方的な立体斥力やキラルな相互作用をもつ古典分子動力学模型の構築に成功した。その結果、半スキルミオンなどの特徴的なトポロジカル構造が古典的な熱平衡状態において普遍的に生じることを世界で初めて示した。さらに、ねじれたバクテリアなどを模した「アクティブマター」に本系を拡張した。**速水**は、時間・空間反転およびゲージ対称性の破れた電荷・スピン・電子対液晶相の理論形式をマイクロな多極子の立場から表現し、新しいタイプの電子秩序相であるフェロアキシシャル秩序相が示す非線形横磁化応答、非線形磁気歪み応答、非従来型ホー

ル効果といった新規非対角応答現象を明らかにした。**水島**は、キタエフスピン液体における 2 つの格子欠陥の間のスピン相関が、マヨラナ量子テレポーテーションの性質を反映することを示し、その検出方法を提案した。また、テラヘルツ光渦を用いた超伝導の非線形光学応答について、光渦の軌道角運動量が超伝導へ転写されるメカニズムを明らかにした。**赤城**は、 $S=1$ の bilinear-biquadratic(BBQ)モデルに基づき、一般化容易面磁気異方性項を加える事で、トポロジカル電荷が $1/3$ となるスピン液晶分数スキルミオンが現れる事を見出した。さらに一般化 Dzyaloshinskii-守谷相互作用項を加える事で、スピン液晶スキルミオン結晶が現れる事を明らかにした。**柳瀬**は、実験グループと共同で発表した超伝導ダイオード効果の内因的メカニズムを解明した。また、内因的超伝導ダイオード効果によりヘリカル超伝導相を実験的に検出する方法を見出した。さらに、超伝導電流が格子変形を誘起する超伝導圧電効果を定式化した。**大同**は、内因的超伝導ダイオード効果の理論を発展させ、多層系に特有のダイオード効果の振動現象を見出した。また、内因的超伝導ダイオード効果だけでなく超伝導転移温度近傍の非相反電荷輸送によってもヘリカル超伝導相を見出せることを明らかにした。

研究項目 D01

計画研究 (6名) **小林**は、量子ドットにおける近藤効果を定量的に調べることによって、量子液体を構成する粒子間の三体相関を検出した。また、ダイヤモンド量子センサを用いた量子スピン顕微鏡を開発し、超伝導体における量子渦の定量的可視化を行い、熱伝導やマグノンの実空間観測に成功した。**有馬**は、量子スピン液体の外場に対する柔軟性に着目し、量子スピン液体物質に対して共鳴 X 線散乱や中性子散乱を行った。その結果、絶縁体量子スピン液体の磁気スキルミオン相が大きな熱ホール効果を示すことを発見した。また、本研究領域内の共同研究によって、スピン $3/2$ 反強磁性体の磁場印加リエントラント現象を開拓した。**石坂**は、超高速時間分解電子顕微鏡による量子液晶物質の時空間計測を行った。電荷密度波物質が示す超高速ダイナミクスと特異な音響フォノン生成および伝搬過程を明らかにした。スピン液晶物質において、磁気スキルミオンがナノ秒~マイクロ秒スケールで分裂・変形・運動し再結合する様子を可視化することに成功した。**岡崎**は、カゴメ超伝導体 $\text{Cs}(\text{V}_{0.93}\text{Nb}_{0.07})_3\text{Sb}_5(T_c \sim 4.4 \text{ K})$ および $\text{Cs}(\text{V}_{0.86}\text{Ta}_{0.14})_3\text{Sb}_5(T_c \sim 5.2 \text{ K})$ における超伝導ギャップ異方性の観測に成功した。光によるネマティック電子状態の制御を実現するために、波長可変な中赤外光をポンプ光とした時間・角度分解光電子分光装置の開発を行い、 $1,200 \text{ nm}$ から $2,400 \text{ nm}$ までの中赤外光をポンプ光として利用可能にした。**戸川**は、量子液晶の物質機能を開拓するため、透過型電子顕微鏡を用いて透過型位相コントラスト法を開発し、スピン液晶物質の応力応答や 2 次元系に特有の渦・反渦対形成の観察に成功した。スピン液晶の高周波集団励起特性を解明し、5G 通信技術を超える次世代通信技術に貢献しうること示した。**戸田**は、電荷液晶物性が発現する銅酸化物高温超伝導体の擬ギャップ電子状態に着目し、光誘起準粒子応答観測を通して面外無秩序性の高い制御性を実証した。またトポロジカル光波を制御光とする秩序形成ダイナミクス観測手法を確立し、超伝導および擬ギャップ電子状態の時空間制御へと発展させた。

公募研究 (令和 2-3 年度 : 3 名、令和 4-5 年度 : 3 名) **伊藤**は、超高速な多電子ダイナミクス研究のためにテラヘルツ時間分解測定を行った。電子型強誘電体において、光励起後サブピコ秒で短距離電荷秩序が増強されることを見出した。強誘電ドメイン壁を光励起すると周期ピコ秒程度の振動が生じることも見出した。**井上**は、薄膜ネマティック超伝導の制御に向けて、電気化学的な手法でトポロジカル絶縁体薄膜に化学ドーピングを行う手法を開発し、その制御に成功した。また、反強磁性カゴメ金属と酸化物半導体の超構造界面にフラットバンドを形成し、これを観測することに成功した。**金澤**は、スピントクスチャに注目した。実空間スキルミオン紐のゆらぎダイナミクスに起因した非対称電子散乱現象を発見した。また運動量空間スピン分裂による表面スピントロニクス機能を開拓した。**小野瀬**は、スピントロニクス応用を目指して、室温らせん磁性体 MnAu_2 におけるキラリティのスイッチングおよび検出を実証した。また、マルチフェロイクスの高温動作を目指して、 $\text{Tb}_2(\text{MoO}_4)_3$ の電気磁気効果を測定し、 430 K における強誘電極の磁氣的制御を達成した。**岡村**は、磁気スキルミオンの示す創発磁場による磁気光学効果の観測を目指した。スキルミオン物質の Gd_2PdSi_3 において広帯域の磁気光学分光を行い、特定の光子エネルギーにおいて、スキルミオン形成とともに、磁気光学効果が数倍にも増強されることを明らかにした。**新見**は、スピン液晶をスピン流で制御することを目指した。らせん磁性体 CrNb_3S_6 において、特有のスピン蓄積信号の検出に成功し、シミュレーションを用いてその発現機構を解明した。また三角格子反強磁性体 Ag_2CrO_2 で異常ホールを測定し、高伝導率領域で 4% という巨大ホール角を得た。

7 研究発表の状況

研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で、本研究領域により得られた研究成果の発表の状況（主な雑誌論文、学会発表、書籍、産業財産権、ホームページ、主催シンポジウム、一般向けアウトリーチ活動等の状況。令和6年6月末までに掲載等が確定しているものに限る。）について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。なお、雑誌論文の記述に当たっては、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究代表者（発表当時、以下同様。）には二重下線、研究分担者には一重下線、corresponding author には左に*印を付すこと。

<論文発表、全768（うち領域内共同研究103編）より抜粋>（すべて査読あり）

A01 計画研究 量子液晶物質の開発

1. *T. Aoyama, K. Ohgushi, “Piezomagnetic properties in altermagnetic MnTe”, *Phys. Rev. Mater.* **8**, L041402 (2024).
2. *K. Kimura, T. Kimura, “Nonvolatile switching of large nonreciprocal optical absorption at shortwave infrared wavelengths”, *Phys. Rev. Lett.* **132**, 036901 (2024), Editors’ Suggestion, [プレスリリース](#).
3. T. Hayashida, K. Kimura, *T. Kimura, “Electric field-induced magnetochiral dichroism in a ferroaxial crystal”, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **120**, e2303251120 (2023), [プレスリリース](#) [[video](#)].
4. H. Zhao, R. Blackwell, M. Thinel, T. Handa, S. Ishida, X. Zhu, A. Iyo, H. Eisaki, *A. N. Pasupathy, *K. Fujita, “Smectic pair-density-wave order in EuRbFe₄As₄”, *Nature* **618**, 940-945 (2023).
5. T. Ogawa, K. Manabe, T. Takeuchi, T. Kida, H. Kuroe, M. Hagiwara, J. Goryo, T. Adachi, *K. Kudo, “Non-monotonic variation of superconducting transition temperature in BaPtAs–BaPtSb solid solution”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **91**, 123702 (2022).
6. *H. Narita, J. Ishizuka, R. Kawarazaki, D. Kan, Y. Shiota, T. Moriyama, Y. Shimakawa, A. V. Ognev, A. S. Samardak, Y. Yanase, *T. Ono, “Field-free superconducting diode effect in noncentrosymmetric superconductor/ferromagnet multilayers” *Nat. Nanotechnol.* **17**, 823-828 (2022), [プレスリリース](#).
7. *K. Kimura, Y. Otake, T. Kimura, “Visualizing rotation and reversal of the Néel vector through antiferromagnetic trichroism” *Nat. Commun.* **13**, 697 (2022), [プレスリリース](#) [[video](#)].
8. *S. Ishida, D. Kagerbauer, S. Holleis, K. Iida, K. Munakata, A. Nakao, A. Iyo, H. Ogino, K. Kawashima, M. Eisterer, and H. Eisaki, “Superconductivity-driven ferromagnetism and spin manipulation using vortices in the magnetic superconductor EuRbFe₄As₄”, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **118**, e2101101118 (2021), [プレスリリース](#) [[video](#)].
9. Y. Kosugi, M. Goto, Z. Tan, A. Fujita, T. Saito, T. Kamiyama, W.-T. Chen, Y.-C. Chuang, H.-S. Sheu, D. Kan, *Y. Shimakawa, “Colossal barocaloric effect by large latent heat produced by first-order intersite-charge-transfer transition”, *Adv. Func. Mater.* **2021**, 2009476(2021), [プレスリリース](#) [[video](#)], 融合研究.
10. 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”, *Nat. Commun.* **11**, 4582 (2020), [プレスリリース](#).
11. *K. Kimura, T. Katsuyoshi, Y. Sawada, S. Kimura, T. Kimura, “Imaging switchable magnetoelectric quadrupole domains via nonreciprocal linear dichroism” *Commun. Mater.* **1**, 39 (2020), [プレスリリース](#) [[video](#)].
12. *Y. Okamoto, H. Amano, N. Katayama, H. Sawa, K. Niki, R. Mitoka, H. Harima, T. Hasegawa, N. Ogita, Y. Tanaka, M. Takigawa, Y. Yokoyama, K. Takehana, Y. Imanaka, Y. Nakamura, H. Kishida, K. Takenaka, “Regular-triangle trimer and charge order preserving the Anderson condition in the pyrochlore structure of CsW₂O₆”, *Nat. Commun.* **11**, 3144 (2020), [プレスリリース](#) [[video](#)].

A01 公募研究

13. *L. Spitz, T. Nomoto, S. Kitou, H. Nakao, A. Kikkawa, S. Francoual, Y. Taguchi, R. Arita, Y. Tokura, T.-h. Arima, *M. Hirschberger, “Entropy-assisted, long-period stacking of honeycomb layers in an AlB₂-type silicide”, *J. Am. Chem. Soc.* **144**, 16866-16871 (2022), 融合研究.
14. K. Sasaki, T. Okue, T. Nakai, *Y. Uchida, N. Nishiyama, “Lateral Growth of Uniformly Thin Gold Nanosheets Facilitated by Two-dimensional Precursor Supply”, *Langmuir* **37**, 5872–5877 (2021), Supplementary Cover.
15. *T. Yamada, D. Hirai, H. Yamane, Z. Hiroi, “Superconductivity in the Topological Nodal-line Semimetal NaAlSi”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **90**, 034710 (2021), Editors’ Choice.

B01 計画研究 量子液晶の精密計測

16. K. Imamura, S. Suetsugu, Y. Mizukami, Y. Yoshida, K. Hashimoto, K. Ohtsuka, Y. Kasahara, N. Kurita, H. Tanaka, P. Noh, J. Nasu, E.-G. Moon, Y. Matsuda, *T. Shibauchi, “Majorana-fermion origin of the planar thermal Hall effect in the Kitaev magnet α -RuCl₃”, *Sci. Adv.* **10**, eadk3539 (2024), [プレスリリース](#) [[Physics World](#)].
17. T. Asaba, A. Onishi, Y. Kageyama, T. Kiyosue, K. Ohtsuka, S. Suetsugu, Y. Kohsaka, T. Gaggli, Y. Kasahara, H. Murayama, K. Hashimoto, R. Tazai, H. Kontani, B. Ortiz, S. Wilson, Q. Li, H. Wen, *T. Shibauchi, *Y. Matsuda, “Evidence for an odd-parity nematic phase above the charge density wave transition in a kagome metal”, *Nat. Phys.* **20**, 40-46 (2024), [プレスリリース](#).
18. *K. Ishihara, M. Roppongi, M. Kobayashi, K. Imamura, Y. Mizukami, H. Sakai, P. Opletal, Y. Tokiwa, Y. Haga, K. Hashimoto, *T. Shibauchi, “Chiral superconductivity in UTe₂ probed by anisotropic low-energy excitations”, *Nat. Commun.* **14**, 2966 (2023), [プレスリリース](#) [[video](#)].

19. Z. Zhang, F. Sekiguchi, T. Moriyama, S. C. Furuya, M. Sato, T. Satoh, Y. Mukai, K. Tanaka, T. Yamamoto, H. Kageyama, *Y. Kanemitsu, *H. Hirori, “Generation of third-harmonic spin oscillation from strong spin precession induced by terahertz magnetic near fields”, *Nat. Commun.* **14**, 1795 (2023), [プレスリリース](#).
20. K. Mukasa, *K. Ishida, S. Imajo, M. Qiu, M. Saito, K. Matsuura, Y. Sugimura, S. Liu, Y. Uezono, T. Otsuka, M. Čulo, S. Kasahara, Y. Matsuda, N. E. Hussey, T. Watanabe, K. Kindo, *T. Shibauchi, “Enhanced superconducting pairing strength near a pure nematic quantum critical point”, *Phys. Rev. X* **13**, 011032 (2023), [プレスリリース](#).
21. *C. J. Butler, Y. Kohsaka, Y. Yamakawa, M. S. Bahramy, S. Onari, H. Kontani, *T. Hanaguri, S. Shamoto, “Correlation-driven electronic nematicity in the Dirac semimetal BaNiS₂”, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **119**, e2212730119 (2022), [プレスリリース](#) [video].
22. *K. Ishida, Y. Onishi, M. Tsujii, K. Mukasa, M. Qiu, M. Saito, Y. Sugimura, K. Matsuura, Y. Mizukami, K. Hashimoto, and *T. Shibauchi, “Pure nematic quantum critical point accompanied by a superconducting dome”, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **119**, e2110501119 (2022), [プレスリリース](#).
23. K. Yamamoto, T. Tsuyama, S. Ito, K. Takubo, I. Matsuda, N. Pontius, C. Schüler-Langeheine, M. Minohara, H. Kumigashira, Y. Yamasaki, H. Nakao, Y. Murakami, T. Katase, T. Kamiya, H. Wadati, “Photoinduced transient states of antiferromagnetic orderings in La_{1/3}Sr_{2/3}FeO₃ and SrFeO₃ thin films observed through time-resolved resonant soft X-ray scattering”, *New J. Phys.* **24**, 043012 (2022), [物性研ニュース](#) [video].
24. *Y. Zhang, T. Katayama, A. Chikamatsu, C. Schüßler-Langeheine, N. Pontius, Y. Hirata, K. Takubo, K. Yamagami, K. Ikeda, K. Yamamoto, T. Hasegawa, H. Wadati, “Photo-induced antiferromagnetic-ferromagnetic and spin-state transition in a double-perovskite cobalt oxide thin film”, *Commun. Phys.* **5**, 50 (2022), [プレスリリース](#) [video].
25. O. Tanaka, *Y. Mizukami, R. Harasawa, K. Hashimoto, K. Hwang, N. Kurita, H. Tanaka, S. Fujimoto, Y. Matsuda, E.-G. Moon, *T. Shibauchi, “Thermodynamic evidence for field-angle dependent Majorana gap in a Kitaev spin liquid”, *Nat. Phys.* **18**, 429-435 (2022), News & Views, [プレスリリース](#) [video].
26. *S. Kasahara, H. Suzuki, T. Machida, Y. Sato, Y. Ukai, H. Murayama, S. Suetsugu, Y. Kasahara, T. Shibauchi, T. Hanaguri, Y. Matsuda, “Quasiparticle nodal plane in the Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov state of FeSe”, *Phys. Rev. Lett.* **127**, 257001 (2021).
27. *T. Shimojima, Y. Motoyui, T. Taniuchi, C. Bareille, S. Onari, H. Kontani, M. Nakajima, S. Kasahara, T. Shibauchi, Y. Matsuda, *S. Shin, “Discovery of mesoscopic nematicity wave in iron-based superconductors”, *Science* **373**, 1122-1125 (2021), [プレスリリース](#).
28. T. Yokoi, S. Ma, Y. Kasahara, S. Kasahara, T. Shibauchi, N. Kurita, H. Tanaka, J. Nasu, Y. Motome, C. Hickey, S. Trebst, and *Y. Matsuda, “Half-integer quantized anomalous thermal Hall effect in the Kitaev material candidate α -RuCl₃”, *Science* **373**, 568-572 (2021), [プレスリリース](#).
29. T. Takenaka, K. Ishihara, M. Roppongi, Y. Miao, Y. Mizukami, T. Makita, J. Tsurumi, S. Watanabe, J. Takeya, M. Yamashita, K. Torizuka, Y. Uwatoko, T. Sasaki, X. Huang, W. Xu, D. Zhu, N. Su, J.-G. Cheng, *T. Shibauchi, *K. Hashimoto, “Strongly correlated superconductivity in a copper-based metal-organic framework with a perfect Kagome lattice”, *Sci. Adv.* **7**, eabf3996 (2021), [プレスリリース](#).
30. 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 Sr₂(Ir_{1-x}Rh_x)O₄”, *Phys. Rev. X* **11**, 011021 (2021), [プレスリリース](#) [video].
31. 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 FeSe_{1-x}Tex: Correlation between suppressed nematicity and enhanced superconductivity”, *Nat. Commun.* **12**, 381 (2021), [プレスリリース](#) [video].
32. *Y. Yasui, *C. J. Butler, N. D. Khanh, S. Hayami, T. Nomoto, *T. Hanaguri, Y. Motome, R. Arita, T.-h. Arima, Y. Tokura, S. Seki, “Imaging the coupling between itinerant electrons and localised moments in the centrosymmetric skyrmion magnet GdRu₂Si₂”, *Nat. Commun.* **11**, 5925 (2020), [プレスリリース](#) [video].
33. *T. Shibauchi, T. Hanaguri, Y. Matsuda, “Exotic superconducting states in FeSe-based materials”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **89**, 102002 (2020), **Invited Review Paper**, Featured in JPS Hot Topics [video].
34. Y. Sanari, T. Otake, *Y. Kanemitsu, *H. Hirori, “Modifying angular and polarization selection rules of high-order harmonics by controlling electron trajectories in k-space”, *Nat. Commun.* **11**, 3069 (2020), [プレスリリース](#).
35. 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”, *PNAS* **117**, 6424-6429 (2020), [プレスリリース](#) [video].
36. Y. Yip, K. O. Ho, K. Y. Yu, Y. Chen, W. Zhang, S. Kasahara, Y. Mizukami, T. Shibauchi, Y. Matsuda, *S. K. Goh, *S. Yang, “Measuring magnetic field texture in correlated electron systems under extreme conditions”, *Science* **366**, 1355-1359 (2019), [Perspective](#), [融合研究](#).

B01 公募研究

37. *T. Asaba, M. Naritsuka, H. Asaeda, Y. Kosuge, S. Ikemori, S. Suetsugu, Y. Kasahara, Y. Kohsaka, T. Terashima, A. Daido, Y. Yanase, *Y. Matsuda, “Evidence for a finite-momentum Cooper pair in tricolor *d*-wave superconducting superlattices”, *Nat. Commun.* **15**, 3861 (2024), [プレスリリース](#).
38. *H. Ishikawa, S. Imajo, H. Takeda, M. Kakegawa, M. Yamashita, J. Yamaura, K. Kindo, “ $J_{\text{eff}} = 1/2$ hyperoctagon lattice in cobalt oxalate metal-organic framework” *Phys. Rev. Lett.* **132**, 156702 (2024), [プレスリリース](#).

39. *T. Asaba, L. Peng, T. Ono, S. Akutagawa, I. Tanaka, H. Murayama, S. Suetsugu, A. Razpopov, Y. Kasahara, T. Terashima, Y. Kohsaka, T. Shibauchi, M. Ichikawa, R. Valenti, S. Sasa, *Y. Matsuda“, Growth of self-integrated atomic quantum wires and junctions of a Mott semiconductor”, *Sci. Adv.* **9**, eabq5561 (2023), [プレスリリース](#).
40. *T. Yokouchi, Y. Ikeda, T. Morimoto, Y. Shiomi, “Giant magnetochiral anisotropy in Weyl semimetal WTe₂ induced by diverging Berry curvature”, *Phys. Rev. Lett.* **130**, 136301 (2023), Editors’ suggestion.
41. *S. Imajo, T. Nomura, Y. Kohama, K. Kindo, “Emergent anisotropy in the Fulde–Ferrell–Larkin–Ovchinnikov state”, *Nat. Commun.* **13**, 5590 (2022), [プレスリリース](#) [video].
42. *I. Kostylev, *S. Yonezawa, Z. Wang, Y. Ando, Y. Maeno, “Uniaxial-strain control of nematic superconductivity in Sr_xBi₂Se₃”, *Nat. Commun.* **11**, 4152 (2020), Editors' Highlights, [プレスリリース](#).
- C01 計画研究 量子液晶の理論構築
43. *R. Tazai, *Y. Yamakawa, H. Kontani, “Drastic magnetic-field-induced chiral current order and emergent current-bond-field interplay in kagome metals”, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **121**, e303476121 (2024), [プレスリリース](#) [video].
44. *R. Tazai, Y. Yamakawa, H. Kontani, “Charge-loop current order and Z₃ nematicity mediated by bond order fluctuations in kagome metals”, *Nat. Commun.* **14**, 7845 (2023), [プレスリリース](#).
45. *K. Kobayashi, Y. Motome, “Thermally-robust spatiotemporal parallel reservoir computing by frequency filtering in frustrated magnets”, *Sci. Rep.* **13**, 15123 (2023), [プレスリリース](#) [video], 融合研究.
46. S. Hoshino, M.-T. Suzuki, H. Ikeda, “Spin-derived electric polarization and chirality density inherent in localized electron orbitals”, *Phys. Rev. Lett.* **130**, 256801 (2023), Editors’ Suggestion.
47. *K. Inui, Y. Motome, “Inverse Hamiltonian design by automatic differentiation”, *Commun. Phys.* **6**, 37 (2023), [プレスリリース](#) [video].
48. R. Tazai, S. Matsubara, Y. Yamakawa, S. Onari, *H. Kontani, “Rigorous formalism for unconventional symmetry breaking in Fermi liquid theory and its application to nematicity in FeSe”, *Phys. Rev. B* **107**, 035137 (2023).
49. R. Tazai, Y. Yamakawa, S. Onari, H. Kontani, “Mechanism of exotic density-wave and beyond-Migdal unconventional superconductivity in kagome metal AV₃Sb₅”, *Sci. Adv.* **8**, eabj4108 (2022), [プレスリリース](#).
50. Y. Arai, *K. Kuroda, T. Nomoto, Z. H. Tin, S. Sakuragi, C. Bareille, S. Akebi, K. Kurokawa, Y. Kinoshita, W.-L. Zhang, S. Shin, M. Tokunaga, H. Kitazawa, Y. Haga, H. S. Suzuki, S. Miyasaka, S. Tajima, K. Iwasa, R. Arita, T. Kondo, “Multipole polaron in the devil’s staircase of CeSb”, *Nat. Mater.* **21**, 410-415 (2022), [プレスリリース](#).
51. *H. Kontani, R. Tazai, Y. Yamakawa, S. Onari, “Unconventional density waves and superconductivities in Fe-based superconductors and other strongly correlated electron systems”, **Invited Review Paper**, *Adv. Phys.* **70**, 355 (2021).
52. *S. Hayami, T. Okubo, Y. Motome, “Phase shift in skyrmion crystals”, *Nat. Commun.* **12**, 6927 (2021), [プレスリリース](#).
53. Y. Chen, *M. Sato, Y. Tang, Y. Shiomi, K. Oyanagi, T. Masuda, Y. Nambu, M. Fujita, *E. Saitoh, “Triplon current generation in solids”, *Nat. Commun.* **12**, 5199 (2021), [プレスリリース](#).
54. *K. Tsutsui, K. Shinjo, *T. Tohyama, “Antiphase oscillation in time-resolved spin structure factor of a photoexcited Mott insulator”, *Phys. Rev. Lett.* **126**, 127404 (2021), [プレスリリース](#).
55. *M.-T. Huebsch, T. Nomoto, M.-T. Suzuki, R. Arita, “Benchmark for *ab initio* prediction of magnetic structures based on cluster-multipole theory”, *Phys. Rev. X* **11**, 011031 (2021), [プレスリリース](#) [video].
56. S. Kunisada, S. Isono, Y. Kohama, S. Sakai, C. Bareille, S. Sakuragi, R. Noguchi, K. Kurokawa, K. Kuroda, Y. Ishida, S. Adachi, R. Sekine, T. K. Kim, C. Cacho, S. Shin, T. Tohyama, *K. Tokiwa, *T. Kondo, “Observation of small Fermi pockets protected by clean CuO₂ sheets of a high-T_c superconductor”, *Science* **369**, 833-838 (2020), [Perspective](#), [プレスリリース](#).
57. *T. N. Ikeda, *M. Sato, “General description for nonequilibrium steady states in periodically driven dissipative quantum systems”, *Sci. Adv.* **6**, eabb4019 (2020), [プレスリリース](#).
58. A. Sakai, S. Minami, T. Koretsune, T. Chen, T. Higo, Y. Wang, T. Nomoto, M. Hirayama, S. Miwa, D. Nishio-Yamane, F. Ishii, R. Arita, *S. Nakatsuji, “Iron-based binary ferromagnets for transverse thermoelectric conversion”, *Nature* **581**, 53-57 (2020), [プレスリリース](#).
59. 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), [プレスリリース](#) [video].
60. *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 (2019), [プレスリリース](#) [video].
- C01 公募研究
61. *H. Yoshimochi, R. Takagi, J. Ju, N. D. Khanh, H. Saito, H. Sagayama, H. Nakao, S. Itoh, Y. Tokura, T. Arima, S. Hayami, T. Nakajima, *S. Seki, “Multistep topological transitions among meron and skyrmion crystals in a centrosymmetric magnet”, *Nat. Phys.* **20**, 1001-1008 (2024), [プレスリリース](#).
62. *T. Kitamura, A. Daido, Y. Yanase, “Spin-triplet superconductivity from quantum-geometry-induced ferromagnetic fluctuation”, *Phys. Rev. Lett.* **132**, 036001 (2024), [プレスリリース](#).
63. *K. Takae, *T. Kawasaki, “Emergent elastic fields induced by topological phase transitions: Impact of molecular chirality and steric anisotropy”, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **119**, e2118492119 (2022), [プレスリリース](#), 融合研究.

64. *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 (2021).
65. Y. Akagi, Y. Amari, N. Sawado, Y. Shnir, “Isolated Skyrmions in the CP^2 nonlinear sigma-model with a Dzyaloshinskii-Moriya type interaction”, *Phys. Rev. D* **103**, 065008 (2021). [融合研究](#).
66. *H. Watanabe, Y. Yanase, “Chiral photocurrent in parity-violating magnet and enhanced response in topological antiferromagnet”, *Phys. Rev. X* **11**, 011001 (2021).
67. J. W. Yu, *S. H. E. Rahbari, T. Kawasaki, H. Park, *W. B. Lee, “Active microrheology of a bulk metallic glass”, *Sci. Adv.* **6**, eaba8766 (2020).

D01 計画研究_量子液晶の制御と機能

68. Y. Zhong, J. Liu, X. Wu, Z. Guguchia, J.-X. Yin, A. Mine, Y. Li, S. Najafzadeh, D. Das, C. Mielke III, R. Khasanov, H. Luetkens, T. Suzuki, K. Liu, X. Han, T. Kondo, J. Hu, S. Shin, *Z. Wang, *X. Shi, Y. Yao, *K. Okazaki, “Nodeless electron pairing in CsV₃Sb₅-derived kagome superconductors”, *Nature* **617**, 488-492 (2023), [プレスリリース](#) [\[video\]](#).
69. *Y. Watanabe, A. Miyake, M. Gen, Y. Mizukami, K. Hashimoto, T. Shibauchi, A. Ikeda, M. Tokunaga, T. Kurumaji, Y. Tokunaga, *T. Arima, “Double dome structure of the Bose-Einstein condensation in diluted $S=3/2$ quantum magnet”, *Nat. Commun.* **14**, 1260 (2023), [プレスリリース](#).
70. *Y. Shimamoto, Y. Matsushima, T. Hasegawa, Y. Kousaka, I. Proskurin, J. Kishine, A. S. Ovchinnikov, F. J. T. Goncalves, Y. Togawa, “Observation of collective resonance modes in a chiral spin soliton lattice with tunable magnon dispersion”, *Phys. Rev. Lett.* **128**, 247203 (2022), [プレスリリース](#) [\[video\]](#).
71. *T. Suzuki, Y. Kubota, A. Nakamura, T. Shimojima, K. Takubo, S. Ito, K. Yamamoto, S. Michimae, H. Sato, H. Hiramatsu, H. Hosono, T. Togashi, M. Yabashi, H. Wadati, I. Matsuda, *S. Shin, *K. Okazaki, “Ultrafast optical stress on BaFe₂As₂”, *Phys. Rev. Res.* **3**, 033222 (2021), [プレスリリース](#) [\[video\]](#).
72. *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 (2021), [プレスリリース](#) [\[video\]](#).
73. T. Hashimoto, Y. Ota, A. Tsuzuki, T. Nagashima, A. Fukushima, S. Kasahara, Y. Matsuda, K. Matsuura, Y. Mizukami, T. Shibauchi, S. Shin, *K. Okazaki, “Bose-Einstein condensation superconductivity induced by disappearance of the nematic state”, *Sci. Adv.* **6**, eabb9052 (2020), [プレスリリース](#).
74. M. Yokoi, S. Fujiwara, T. Kawamura, T. Arakawa, K. Aoyama, H. Fukuyama, K. Kobayashi, *Y. Niimi, “Negative resistance state in superconducting NbSe₂ induced by surface acoustic waves”, *Sci. Adv.* **6**, eaba1377 (2020), [プレスリリース](#).
75. *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 (2020), Editors' Suggestion, [プレスリリース](#) [\[video\]](#).
76. *N. Mitsuishi, Y. Sugita, M. S. Bahramy, M. Kamitani, T. Sonobe, M. Sakano, T. Shimojima, H. Takahashi, H. Sakai, K. Horiba, H. Kumigashira, K. Taguchi, K. Miyamoto, T. Okuda, S. Ishiwata, Y. Motome, *K. Ishizaka, “Switching of band inversion and topological surface states by charge density wave”, *Nat. Commun.* **11**, 2466 (2020), [プレスリリース](#).
77. *T. Suzuki, T. Someya, T. Hashimoto, S. Michimae, M. Watanabe, M. Fujisawa, T. Kanai, N. Ishii, J. Itatani, S. Kasahara, Y. Matsuda, T. Shibauchi, *K. Okazaki, *S. Shin, “Photoinduced possible superconducting state with long-lived disproportionate band filling in FeSe”, *Commun. Phys.* **2**, 115 (2019), [プレスリリース](#) [\[video\]](#).

D01 公募研究

78. *H. Masuda, *T. Seki, J. Ohe, Y. Nii, H. Masuda, K. Takanashi, *Y. Onose, “Room temperature chirality switching and detection in a helimagnetic MnAu₂ thin film”, *Nat. Commun.* **15**, 1999 (2024), [プレスリリース](#).
79. Y. D. Kato, *Y. Okamura, M. Hirschberger, Y. Tokura, *Y. Takahashi, “Topological magneto-optical effect from skyrmion lattice”, *Nat. Commun.* **14**, 5416 (2023), [プレスリリース](#).
80. Y. Ohtsuka, *N. Kanazawa, M. Hirayama, A. Matsui, T. Nomoto, R. Arita, T. Nakajima, T. Hanashima, V. Ukleev, H. Aoki, M. Mogi, K. Fujiwara, A. Tsukazaki, M. Ichikawa, M. Kawasaki, Y. Tokura, “Emergence of spin-orbit coupled ferromagnetic surface state derived from Zak phase in a nonmagnetic insulator FeSi”, *Sci. Adv.* **7**, eabj0498 (2021), [プレスリリース](#).
81. M. Han, H. Inoue, S. Fang, C. John, L. Ye, M. K. Chan, D. Graf, T. Suzuki, M. P. Ghimire, W. J. Cho, E. Kaxiras, *J. G. Checkelsky, “Evidence of two-dimensional flat band at the surface of antiferromagnetic kagome metal FeSn”, *Nat. Commun.* **12**, 5345 (2021).

<国際学会における招待講演、全 318 件より抜粋>

- (A01 計画) K. Ohgushi, “Piezomagnetic effect in altermagnets”, Quantum Materials Symposium 2024, Yongpyong, Korea, 2024/2/17-19.
- (A01 計画) T. Kimura, “Optical microscope imaging of antiferromagnetic domains via linear magnetoelectric effect”, International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2023 (SCES2023), Incheon, Korea, 2023/7/2-7.
- (A01 計画) K. Kudo, “Development of New Superconductors with Ordered Laves Phase Structures”, The 33rd International Symposium on Superconductivity (ISS2020), Tsukuba, Ibaraki, Japan & Online, 2020/12/1-3.

4. (A01 公募) J. Matsuno, “Emergent phenomena at oxide interfaces with strong spin-orbit coupling”, 2020 MRS Spring/Fall Meeting & Exhibit, online, 2020/11/27-2020/12/4..
5. (B01 計画) T. Shibauchi, “Nematic quantum critical points and unconventional superconducting states in Fe(Se/S/Te)”, Superstripes 2023 Quantum in Complex Matter, Ischia, Italy, 2023/6/26-7/01, [Plenary].
6. (B01 計画) T. Hanaguri, “Superconductivity, nematicity and topology in Fe(S,Se,Te)”, 13th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity & High Temperature Superconductors 2022 (M2S2022), Vancouver, Canada, 2022/7/17-22.
7. (B01 計画) T. Shibauchi, “Field-angle dependent Majorana gap in a Kitaev spin liquid state of α -RuCl₃”, American Physical Society (APS) March Meeting 2021, online, 2021/03/15-19.
8. (B01 公募) S. Suetsugu, “Fully gapped pairing state in spin-triplet superconductor UTe₂”, APS March Meeting 2024, Minneapolis, USA, 2024/3/3-8.
9. (B01 公募) G. Zheng, “Tuning the nematic director in spin-triplet superconductors Cu_xBi₂Se₃ and K₂Cr₃As₃”, Conference of Condensed Matter Physics (CCMP) 2023, Liyang, China, 2023/08/6-11.
10. (C01 計画) H. Kontani, “Even- and odd-parity density waves and superconductivity in kagome metals and other strongly correlated metals”, Superstripes 2023 Quantum in Complex Matter, Ischia, Italy, 2023/6/26-7/01, [Plenary].
11. (C01 計画) Y. Motome, “Kitaev magnets as a Majorana platform”, 8th International Conference on Superconductivity and Magnetism (ICSM2023), Fethiye, Turkey, 2023/5/4-11.
12. (C01 計画) N. Shannon, “A route to finding fractons? Rank-2 U(1) spin liquid on the breathing pyrochlore lattice”, Correlated Electron Virtual International Seminar (CEVIS), online, 2020/7/2, Invited.
13. (C01 公募) A. Daido, “Intrinsic superconducting diode effect”, APS March Meeting 2023, Las Vegas, USA, 2023/3/5-10.
14. (C01 公募) T. Mizushima, “Pair density waves in confined superfluid ³He”, 29th International Conference on Low Temperature Physics (LT29), Sapporo, Japan / Online, 2022/8/18-24.
15. (D01 計画) T. Arima, “Multiple-wavevector magnetic order”, 4th Asia-Oceania Conference on Neutron Scattering, Dongguan, China, 2023/12/2-8, [Plenary].
16. (D01 計画) K. Kobayashi, “Three-body correlation in nonequilibrium quantum liquid”, 29th International Conference on Low Temperature Physics (LT29), Sapporo, Japan / Online, 2022/8/18-24.
17. (D01 公募) Y. Onose, “Magnetic domain control by the inverse of nonreciprocal response”, Conference of condensed matter physics 2023, Liyang, China, 2023/8/6-11.
18. (D01 公募) N. Kanazawa, “Emergence of spin-orbit coupled ferromagnetic surface state derived from Zak phase in a nonmagnetic insulator FeSi”, APS March Meeting 2022, Chicago, USA / online, 2022/3/14-18.

<主催シンポジウム等>

1. 領域キックオフミーティング, 2019/8/19, 東京大学浅野キャンパス (東京都文京区)
2. 公募研究説明会, 2019/9/9, 名古屋大学東山キャンパス (愛知県名古屋市)
3. QLC Topical Workshop on Elastoresistance in Correlated Materials, 2019/9/30, 東大柏キャンパス (千葉県柏市)
4. QLC Topical Workshop on Quantum Magnetism and Neutron scattering, 2019/11/8, 東北大多元研(宮城県仙台市)
5. 令和元年度領域研究会, 2020/3/26-27 (中止)、初年度 (2019 年度) 成果報告書を発行
6. 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」公募研究キックオフミーティング, 2020/5/19, 6/23, 7/9, 8/4, online
7. 令和 2 年度領域研究会, 2020/12/21-25, online
8. International Conference on Quantum Liquid Crystals 2021 (QLC2021), 2021/5/11-13, online
9. 第 2 期 (令和 4-5 年度) 公募研究説明会, 2021/9/7, online
10. 日本物理学会共催シンポジウム「鉄系超伝導研究の新展開--ネマティシティと新規超伝導」2021/9/21 online
11. 令和 3 年度領域研究会, 2022/2/17-19, online
12. 第 2 期公募研究キックオフミーティング, 2022/6/17-18, 東京大学柏キャンパス (千葉県柏市) / online
13. 令和 4 年度領域研究会, 2022/12/8-10, 名古屋大学東山キャンパス (愛知県名古屋市)
14. 第 2 回量子物質開発フォーラム, 2023/1/6-1/7, 東北大学青葉山北キャンパス (宮城県仙台市) / online
15. 日本物理学会共催シンポジウム「金属、スピン系、超伝導体における様々な量子液晶状態」2023/3/24 online
16. International Conference on Quantum Liquid Crystals 2023 (QLC2023), 2023/8/8-10, 北海道大 (北海道札幌市)
17. 令和 5 年度領域研究会, 2023/12/26-28, 東京大学柏キャンパス (千葉県柏市)
18. QLC セミナー (令和元年度 14 回、2 年度 5 回、3 年度 11 回、4 年度 8 回、5 年度 6 回、計 44 回開催)
19. QLC 若手コロキウム (2 年度 1 回、3 年度 5 回、4 年度 3 回、5 年度 3 回、計 12 回開催、講演者 38 名)

<一般向けのアウトリーチ活動等、全 262 件より抜粋>

1. 量子液晶の物性科学 ホームページ開設 : <http://qlc.jp/>
2. 動画共有サイト「[Quantum Liquid Crystals チャンネル](#)」開設 (研究成果解説など配信動画 : 44 本)
3. ニュースレター (量子液晶の物性科学 News Letter Vol.1-10)、領域ホームページへの掲載及び発送

8 研究組織の連携体制

研究領域全体を通じ、本研究領域内の研究項目間、計画研究及び公募研究間の連携体制について、図表などを用いて具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

本研究領域では、今まであまり直接的な研究交流がなかった、主に絶縁体のスピン系を取り扱う研究者と、主に強相関超伝導体を取り扱う研究者の有機かつ直接的な研究交流を推進する形で、これら幅広い物質群に現れる新しい電子状態である「量子液晶」の新学理を構築することを目的とした。

そのために、**従来の研究対象物質群による枠組みを外し**、電荷液晶、スピン液晶、電子対液晶を統一的に扱い、新電子物性物理の体系化に結び付ける。各計画研究項目は実施計画の方法論により分類・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し、シナジー効果を狙っている。量子液晶の舞台となる物質の開発と純良試料の作製を行う A01「量子液晶物質の開発」、最先端の測定技術と世界的に見てもオリジナリティの高い計測手法を用いて、電子状態の精密計測により基底状態と励起状態を解明する B01「量子液晶の精密計測」、各実験研究に対して方向性を示唆し、結果を統合して実験へのフィードバック・予測・提言を行う C01「量子液晶の理論構築」、さらにナノテクノロジーを用いた微細加工や、光照射と時間分解測定技術の開発により量子液晶の状態制御や機能開拓を目指す D01「量子液晶の制御と機能」の研究項目を組織した。これら4つの研究項目がそれぞれの役割を担い、総括班主導によるギアがかみ合った連携（右図）を構築する。



計画研究のメンバー構成は、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が混在しており、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る。公募研究では、計画研究では手薄であった有機化合物を専門とする研究者や、固体物質以外の対象を取り扱う古典液晶・ソフトマターの研究者および超流動ヘリウムをベースとする関連研究を行っている研究者を含む研究代表者を迎え入れ、より多岐にわたる議論・連携が可能になった。

本新学術領域研究では、後で述べるような若手研究者支援の取り組みをはじめとした総括班主導の共同研究企画や研究会等の領域メンバーの交流を通じて、多くの領域内連携が始まった。計画研究のメンバー26名、第1期公募研究17名、第2期公募研究26名に加え、PD・特任研究員9名が有機的に連携し、共同研究を推進した結果、**発表された領域内共同研究論文は103報にのぼる。これらの論文に係る各研究項目内、研究項目間のそれぞれの共同研究件数（合計125件）を下表に示す。**すべての研究項目内および研究項目間で共同研究成果が結実している。特に、精密計測を担当するB01班を中心とした連携が進んでいる。なお、3つの研究項目をまたいだ連携研究も行われており、例えば、磁気スキルミオン構造を持つ磁性体における走査型トンネル顕微鏡を用いた電子構造の研究では、磁性研究の専門家のD01有馬らにより作製された試料を用いて、金属電子状態を専門とするB01花栗らが測定を行い、C01班の磁性専門家の求および第一原理計算を得意とする有田が理論的なサポートを行うことにより、磁気構造の情報を伝導電子の構造から研究するといった新しい研究が展開した。また、第1期および第2期公募研究の研究者を含んだ連携も複数進行した。また、物性物理学と素粒子物理学や、物性物理学と化学工学などの異分野融合により得られた成果も34編の論文として出版された。本領域で始まった連携は、領域終了後も引き続き活発に行われることが期待される。

	A01 (物質開発)	B01 (精密計測)	C01 (理論構築)	D01 (制御と機能)
A01 (物質開発)	6 (うち公募5)	15 (うち公募8)	6 (うち公募3)	9 (うち公募8)
B01 (精密計測)	15 (うち公募8)	45 (うち公募18)	17 (うち公募8)	8 (うち公募4)
C01 (理論構築)	6 (うち公募3)	17 (うち公募8)	7 (うち公募4)	9 (うち公募3)
D01 (制御と機能)	9 (うち公募8)	8 (うち公募4)	9 (うち公募3)	3 (うち公募2)
計	36 (うち公募24)	85 (うち公募38)	39 (うち公募18)	29 (うち公募17)

9 研究費の使用状況

研究領域全体を通じ、研究費の使用状況や効果的使用の工夫、設備等（本研究領域内で共用する設備・装置の購入・開発・運用、実験資料・資材の提供など）の活用状況について、総括班研究課題の活動状況と併せて具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。また、領域設定期間最終年度の繰越しが承認された計画研究（総括班・国際活動支援班を含む。）がある場合は、その内容を記述すること。

研究費の使用状況

本新学術領域研究では、各研究項目において必要な設備を整備し、研究を進めるとともに、総括班において共通設備を整備し、共同利用を促進し領域内の連携を進めるものである。初年度末からのコロナ禍の影響による納期の遅延などにより、各研究計画で研究費の繰越しがいくつか発生し、一時的な遅れは発生したものの、研究計画の遂行に大幅な変更はなく、全体としては設備関係についての**研究費使用状況に関する大きな支障は生じていない**。なお、最終年度の繰越しはない。総括班では、共通性の高い大型装置を共通設備として設置、整備し、領域内外に広く門戸を開くことで、共同利用を促進し、量子液晶研究者の連携を進めた。総括班に関する研究計画の遂行については、新型コロナウイルス感染症拡大の影響による人的移動の制限のため、海外派遣等で予定していた旅費はかなり減少したが、以下で述べる**オンラインプラットフォームの整備や、論文掲載料のサポートなどの効果的な研究費の使用**により、研究推進に関する大幅な変更はなく、全体としては大きな支障は生じていないと考えている。

コロナ禍の影響を特に受けたものは、人的移動の制限によるオンラインでの研究会の開催が不可能になった点である。特に、2020年3月に東京大学柏キャンパスにて開催を予定していた令和元年度領域研究会を直前に中止せざるを得なくなり、研究会開催費用として総括班で予定していた研究費の実行ができなくなった。この中止にあたっては、あらかじめ学術調査官を通して文部科学省に相談の上、総括班研究費の一部である65万円を令和2年度に繰り越した。中止した令和元年度領域研究会で発表予定であった領域メンバーの研究成果の内容をまとめ、56ページにわたる初年度(2019年度)成果報告集を作成し、領域ホームページにて公開するとともに、ニュースレターvol.2として関係者に送付した。繰り越し研究費の多くはこの成果報告書の費用に充てた。令和2年度以降については、人が集まるイベントが実質的に禁止され、オンライン開催が困難な状況が約2年間継続し、**研究会、セミナー、国際会議ともインターネットを用いてオンライン開催**した。ここで、口頭発表についてはZoom、ポスター発表についてはRemoというプラットフォームを用いることで、バーチャルな空間での議論が可能となった。Remoで発生した使用料を総括班経費で賄い、Zoomはメンバーの所属する各研究機関のアカウントを使用したため、使用料が発生していない。オンラインでの交流は不可能な一方で、旅費不要のため海外からの参加も容易となり、発表についてはスライドの英語化を必須とすることで、国際的な議論が可能となった。

令和4年度に入り、ようやくコロナ感染症も落ち着き、2022年6月の第2期公募研究キックオフミーティング以降は、現地開催が可能となり、令和4年度の領域主催の会議は、一部オンラインも併用するハイブリッド形式をとった。令和5年度では、国際会議、領域会議とも現地開催のみの通常形式に戻し、懇談会の開催も可能となった。特に2023年8月に主催した国際会議 International Conference on Quantum Liquid Crystals (QLC2023)では、北海道大学にて開催し、海外5カ国からの参加者11名を含む170名を超える研究者が一堂に会した。入国規制の完全撤廃が同年4月末だったため、海外からの参加者は限定的だったが、いずれのセッションも活発な議論が繰り広げられた。

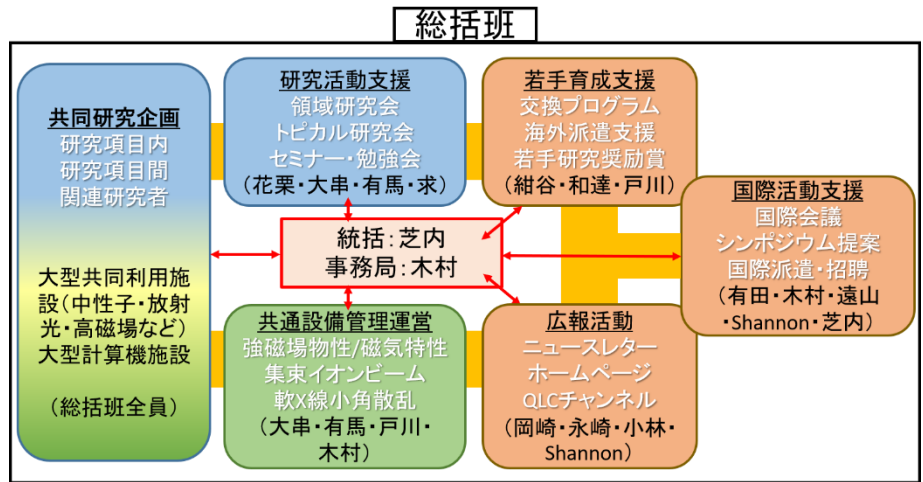
若手研究者支援では、コロナ禍前の令和元年度には、半年余りで12件の海外渡航支援を行い、国際共同研究の実施や国際会議での発表に対するサポートを行った。コロナ禍中の令和2年度には、海外渡航が事実上不可能となり、オンライン国際会議の参加登録料の支援を9件行った。令和4年度、5年度からは海外渡航支援を再開し、それぞれ12件、5件の支援を実施した。

研究費の効果的使用の工夫

上述の計画段階では予期しなかったコロナ禍に関連する変更を除いては、基本的には、研究計画調書にほぼ沿って研究費の執行を行った。研究会や国際会議、および若手研究者海外派遣プログラムに関する総括班の研究費を有効に活用するため、総括班での論文掲載料のサポートを開始した。領域内の連携を強化するのに役立つために、**領域内共同研究の成果としての論文掲載料のサポート**を優先とし、プレスリリースやQLCチャンネルでの動画解説とリンクさせ、総括班で審査の上、支援を実行した。研究期間全体で、26編の論文(Nat. Phys. 1編、Nat. Commun. 5編、Sci. Adv. 3編、Phys. Rev. X 4編、PNAS 4編、Commun. Mater. 1編、Commun. Phys. 3編など)に対して支援を行い、うち19編はオープンアクセスジャーナルの論文である。特に、オープンアクセスジャーナルでは、論文掲載料が高騰しているため、こ

の支援により、領域メンバーは、それぞれの予算を研究実施のための経費に集中させて運用することができ、掲載料を気にせずハイインパクトジャーナルにトライすることが可能になったと考えている。

総括班では、共同研究の企画、支援を行うとともに、右図のような5つの支援部会を組織し、それぞれ効果的な施策を講じた。研究活動支援、若手育成支援および国際活動支援では、特にコロナ禍で対面会議や若手研究者の海外派遣が困難な時期が生じたため、若手研究者による令和2年度より**QLC 若手コロキウム**を新たに企画し、計38名にオンラインで講演を行ってもらったとともに、広報活動支援班と協力して、「実験室・研究室から」と題して若手研究者の実験風景の動画を QLC チャンネルにて公開した。これらの工夫により、領域内の交流を深めることに尽力した。



広報活動の一環として、ニュースレターを各年度2回、計5年間で10巻発行し、それぞれ領域内外の関係者に送付するとともに、ホームページにて公開した。また、公募研究で強化した、古典液晶・ソフトマターの研究分野との連携について、液晶実験の研究者であるA01公募研究の内田が提案者となり、2021年7月発行の日本液晶学会誌「液晶」にて、本領域の**量子液晶の研究に関する特集**が生まれ、領域メンバー8名（芝内、大串、木村、花栗、佐藤卓、紺谷、求、有馬）による5つの解説が掲載された。この別刷りをニュースレターvol.5とともに関係者に発送した。また、領域代表の芝内により執筆された量子液晶の考え方を平易に解説した記事が、日本物理学会誌第76巻 第12号の**現代物理のキーワード**「固体におけるネマティックの物理 (Keyword: ネマティック)」に掲載され、その別刷りを2022年2月ニュースレターvol.6とともに関係者に送付した。

国際活動を強化するために、2022年度よりスタートした**量子物質の物性科学に関する国際スーパーネットワーク Quantum Materials Accelnet (QMAC)**に本領域が日本の研究ネットワークを代表して参画した。この取り組みにより本領域終了後も、国際的な若手研究者の国際交流を実現でき、量子液晶を含む量子物性に関する国際共同研究を可能とした。2023年12月にサンタバーバラで行われたQMACの会議で領域代表の芝内が招待講演を行い、量子液晶の概念を説明し、この枠組みによりRice大学の博士研究員が東京大学に3か月滞在するなどの国際交流・共同研究につながっている。

設備等の活用状況

本領域内の連携を高めるために、比較的共用性の高い実験設備を総括班で整備した。まず令和元年度末に東北大学に共通設備である基礎物性測定装置を導入した。装置は順調に稼働し、電気抵抗率・ホール係数・誘電率の測定が迅速な形で進んだ。また、令和元年度末より、東京大学柏キャンパスにおいて、**使用されていない磁気特性測定システムを借り受けることが可能となったため、本新学術領域の共用装置の一つとして運用**した。これにより極低温高磁場領域の磁気特性の測定が可能になり、A01木村、B01芝内、D01有馬の3グループが定常的に活用するとともに、共同研究のための試料評価として領域メンバーで利用している。これらの共用装置の運用に必要な寒剤（液体ヘリウム）などの消耗品の一部を、総括班経費にて支援した。また、令和3年度には大阪府立大学に集束イオンビーム加工装置を導入し、老朽化した現有設備を置き換え、試料の微細加工が可能となった。次世代高輝度放射光施設が設置された場合に令和4年度に設置を予定していた軟X線小角散乱装置は、施設供用の遅れのため、導入を断念し、より一般的な計測装置の充実化にあてることとした。

各研究計画における大型装置としては、A01班にて、東京大学にレーザー加熱式浮遊帯熔融炉を導入し、従来のランプ加熱式の炉では合成が困難であった単結晶試料を含む多様な単結晶試料の合成が可能となった。例として、時間および空間反転対称性の破れた反強磁性体 Bi_2CuO_4 の単結晶試料の作製に成功し、可視光領域における巨大な非相反光学応答を観測するなどの成果を得ている。その他、B01およびD01の実験班では、超伝導磁石、フェムト秒レーザー、走査型トンネル顕微鏡を導入し、これらの装置の稼働により様々な成果につながった。

10 当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況

研究領域全体を通じ、本研究領域の成果が当該学問分野や関連学問分野に与えたインパクトや波及効果などについて、「革新的・創造的な学術研究の発展」の観点から、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、応募時に「①既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成を目指すもの」、「②当該領域の格段の発展・飛躍的な展開を目指すもの」のどちらを選択したか、また、どの程度達成できたかを明確にすること。

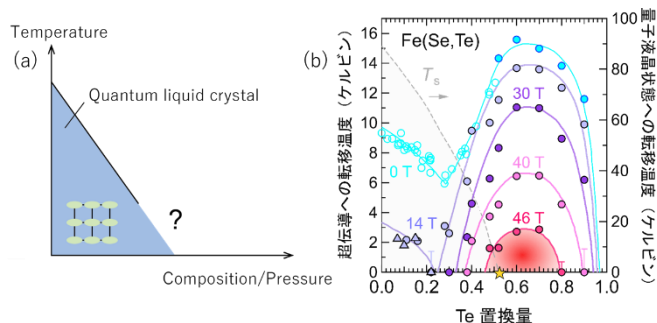
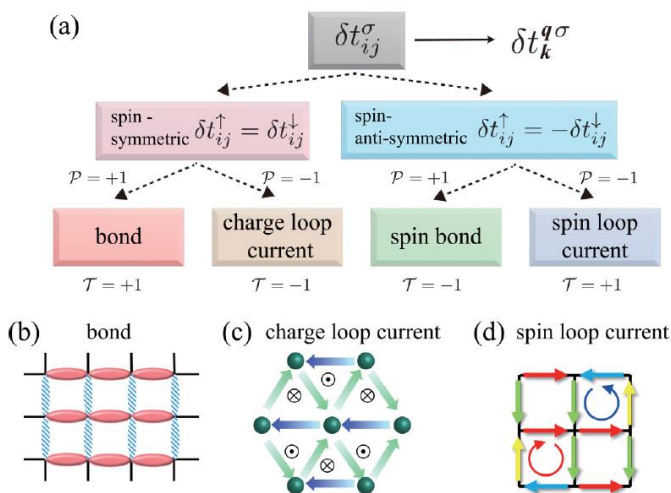
本新学術研究は、現代の物性物理学の中核をなす磁性・金属絶縁体転移・超伝導のそれぞれの分野において独立に研究され始めている、液晶に類似した「スピン液晶」、「電荷液晶」、「電子対液晶」と言うべき新しい電子状態に着目し、これらを体系化した「量子液晶」の学理を構築し、物性物理学の格段の発展・飛躍的な展開を目指したものである。本研究を通して、我々が造語として用いた「**量子液晶**」の概念が浸透し、物性物理学において明確な位置づけができたと考えている。古典的な液体と液晶の違いは対称性の破れにより区別できるが、固体中の電子系においては量子多体効果が顕著な量子液体・量子流体の研究が盛んにおこなわれており、金属におけるフェルミ液体論をはじめ、超伝導・超流動や量子ホール効果など、この量子液体の分野で新しい概念が次々と生まれている。本領域で構築した「量子液晶」分野は、上図のマトリックスの右下部分をカバーするものであり、量子液体に対称性の破れを導入した電子状態を広く対象とし、一大分野を形成しつつあると考えている。

このような新しい学術領域で、本報告書で示した様々な成果が得られているが、当初目指した**多様性と普遍性の理解が格段に進んだことで、今後の更なる発展につながるもの**と期待している。特に、量子液晶の多様性を分類する理論的な枠組みが整理され、右図のように空間反転対称性 P と時間反転対称性 T の偶奇により新たな量子液晶状態の記述が可能となった[研究発表論文 48, 51]。実際に P および T の両方が奇となる電荷ループ電流状態が、本領域の実験研究によりイリジウム酸化物やカゴメ超伝導体で発見されている。さらに、未発見のスピンループ電流状態の研究に発展することが期待される。また、キタエフ磁性体において、量子液晶状態へのトポロジカル相転移が示唆されたことは[論文 25, 64]、近年急速に発展してきた**トポロジカル物性の研究分野と量子液晶研究分野との融合領域**という、**新たな展開へとつながるもの**である。

また、量子液晶のもたらす新しい側面も明らかとなった。それは、量子液晶の量子揺らぎが新たな非従来型超伝導メカニズムとして実験的に検証されたことである[論文 20, 22, 31]。今まで、磁気秩序が消失する磁気量子臨界点近傍で増大するスピン揺らぎを媒介とした電子対形成が、主に重い電子系超伝導体などで議論されてきた。本領域研究で右図のように量子液晶が消失する物質系を見出し、その量子臨界点近傍での強磁場測定により、**量子液晶ゆらぎを媒介とした新規超伝導**が実現していることが明らかとなった。これは高温超伝導機構の研究にも重要な示唆を与えるものである。

本領域「量子液晶」は国際的にも認知されており、2022年度より Institute for Complex Adaptive Matter (ICAM)による支援が始まった、量子物質科学の日欧米の10の研究プロジェクトから組織された国際スーパーネットワーク [Quantum Materials Accelnet \(QMAC\)](#)に日本で唯一参加している。量子物性の若手研究者の国際交流や国際共同研究を推進・支援する取り組みで、本領域を核として、我が国の量子物質の研究の発展に資するものである。本研究期間終了後もこの取り組みは継続するため、更なる発展が期待される。

以上のように、本研究により物性研究の大きな分野が形成され、飛躍的な展開をもたらしたと考える。



11 若手研究者の育成に関する取組実績

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究遂行に携わった若手研究者（令和6年3月末現在で39歳以下。研究協力者やポスドク、途中で追加・削除した者を含む。）の育成に係る取組の実績について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

若手研究者の育成に係る取り組みについて、まず第1期公募研究では17件中8件、第2期では26件中14件の公募研究の研究代表者が39歳以下の若手研究者であった。また、本新学術領域研究により雇用したポスドク研究員は合計9名であり、公募によりB01班で実験系研究員3名、およびC01班で理論系研究員6名を採用した。さらに、各計画研究、公募研究のメンバーのそれぞれの研究室所属の助教や大学院生を含む若手研究者を対象に、総括班を中心に、**若手研究者交換プログラム、海外派遣プログラム、若手研究奨励賞の支援活動**を推進した。また、2020年3月以降については、新型コロナウイルス感染症の拡大に伴い、若手研究者交換プログラムおよび海外派遣プログラムによる国内外の移動が困難な状況になったことに対する対応策として、オンラインプラットフォームを活用した、**若手コロキウムやQLCチャンネルでの若手研究者の育成活動を開始**した。また、国際的な若手研究者交流のさらなる強化のために、**国際スーパーネットワーク QMAC**に参画した。以下それぞれの活動状況について説明する。

若手研究者交換プログラム 各研究項目内、項目間での連携強化のため、領域メンバーのグループ内の若手研究者（助教、ポスドク研究員、大学院生などを含む）が、領域内の他のグループに訪問し、共同研究を実施することを促進するものである。コロナ禍により人の移動が制限され、当初の予定より困難な運営を余儀なくされたが、同一キャンパス内交換3件を含む**計26件（うち異なる研究項目間18件）の共同研究**を実施した。

海外派遣プログラム 若手研究者の国際的な研究活動を支援するために、海外の研究機関との共同研究や、海外で開催される国際会議やワークショップへの参加に対して、総括班から渡航費等の支援を行っている。初年度の令和元年度には、大学院生および若手研究者を5か国（スイスチューリッヒにおいてセミナーツアーおよび共同研究打ち合わせ、カナダバンクーバーにて μ SR共同実験、オランダナイメーヘンにて高磁場共同実験、北京および台湾にて研究成果発表）に派遣し、国際共同研究の実施や国際会議での発表など、海外渡航支援を半年余りで計12件支援した。令和2年度には、事実上海外渡航が不可能となり、**オンライン国際会議への参加登録料支援を9件**行った。令和4年度から海外渡航支援を復活させ、令和4年度に計12件、令和5年度に計5件、令和元年度分と合わせて**合計29件の海外渡航支援**を行った。各渡航について、報告書を提出してもらい、ニュースレターにて公開した。

若手研究奨励賞 各年度若手研究者に募集を行い、若手研究奨励賞の受賞者の選定、および授与を行っている。初年度は、若手奨励賞の募集開始後に領域研究会がコロナ禍により中止となったため、書類審査と面接審査を経て2名の受賞者を選定し、令和2年度オンラインキックオフミーティングにて授賞式を行った。2年目以降は、領域研究会でのポスター発表を採点し、毎年2、3名を選定し、同研究会にて発表・表彰した。5年間で**合計12名に若手研究奨励賞を授与**し、ホームページでアナウンスした。また、北海道大学で開催した国際会議QLC2023では、若手研究者のポスター発表に投票を行い、**2名に Young Researcher Award を授与**した。

QLC 若手コロキウム コロナ禍により渡航が制限されたため、若手研究者支援を別の形で強化するためのQLC若手コロキウムを開始した。これは、大学院生やポスドク研究員などの若手研究者が、自分の研究を他分野の若手研究者にわかりやすく解説するオンラインの取り組みであり、相互理解を促進するものであり、領域計画書には記載のない新しいプログラムである。計12回開催し、若手研究奨励賞受賞者を含む**38名の若手研究者がコロキウムで発表**を行い、毎回若手研究者同士で活発な議論が行われた。

QLC チャンネル オンラインを活用した若手研究者育成の取り組みとして、若手研究者による研究成果のわかりやすい解説を依頼して、領域の動画サイト「QLCチャンネル」にてビデオ配信している。現在までに公開している44本の動画のうち、**25本の「研究解説」と4本の「実験室・研究室から」は若手研究者が作成、解説**を行っているものである。短い時間でわかりやすくプレゼンテーションを行う能力の向上に役立つものと考えている。

国際スーパーネットワーク QMAC 2022年度より、国際スーパーネットワーク QMACに参画し、若手研究者の国際交流を強化した。この枠組みにより、東京大学の助教がプリンストン大に訪問、Rice大学の博士研究員が東京大学に3か月滞在するなど、国際交流・共同研究の発展に寄与した。

12 総括班評価者による評価

研究領域全体を通じ、総括班評価者による評価体制（総括班評価者の氏名や所属等）や本研究領域に対する評価コメントについて、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

本領域発足時から、国内3名、海外2名の顕著な学術業績を持つシニア研究者に総括班評価委員をお願いした。国内委員には、キックオフミーティング、領域研究会、国際会議に参加いただき、海外委員には、英語の資料を送付し、国際会議に参加いただいた。以下、各委員からの評価コメントを示す。

藤森淳（国立清華大学客員教授、東京大学名誉教授）

本領域は、電子系・スピン系・超伝導対系で回転対称性が自発的に破れた状態を「量子液晶」と捉え、量子液晶の形成機構解明と新たな量子液晶の探索を目標として発足した。5年の研究期間で、新物質探索・理論研究・物性発現機構解明・物性精密測定で多くの注目すべき成果を挙げた。回転対称性の破れに関連して、電荷・スピン・ボンド・ループ電流秩序等による並進対称性・時間反転対称性の破れも含む統一的な理論を構築し、予言した現象のいくつかは実験的検証に成功した。回転対称性の破れの前駆現象である量子液晶揺らぎに関しても、鉄系高温超伝導体の発現を担っていることを実験的に示した。また、領域発足の頃から重要な課題となっていたキタエフ量子スピン液体に関して、候補物質の精密物性測定で先駆的な業績を挙げた。さらに、期間の途中で海外で発見され大きな注目を集め始めたカゴメ金属超伝導体について、理論研究・物性精密測定で分野の先頭を走る成果を挙げた。スピン系に関しては、クラスター多重極秩序の理論、フェロアクシアル結晶の電場誘起磁気カイラル効果、カイラル結晶を流れる電流のスピン分極の観測などの先導的な成果を挙げた。本領域は成果の発信にも力を入れ、ハイインパクトジャーナルへの多くの論文掲載、主要国際会議での多くの招待講演を行ってきた。領域の成果の集大成と言える2回の国際会議を開催し、国際的に大きな存在感を示した。領域主催の全体研究会、トピック別研究会、オンライン・セミナーも活発に行われ、緊密な情報交換、情報発信を恒常的に行ってきた。若手研究者の育成にも成功しており、若手研究奨励賞はこれを扶ける役割を果たしてきた。本領域の活動によって確立された量子液晶研究グループ間の連携は、既に周辺分野も取り込んで発展しており、今後は上記の成果を更に進展させるとともに、新たな分野の創成につながる成果を挙げる事が期待される。

川村光（第73,74期日本物理学会会長、大阪大学名誉教授）

本新学術領域「量子液晶の物性科学」は、古くより知られている分子液晶の概念の発展形として近年磁性体や電子系、超伝導体等を舞台に研究が進んできた「液晶的な」秩序状態を対象に、これらの系・分野を横断的に捉え「量子液晶」として統一的に扱うことによって、その基礎学理と応用の格段の深化と展開を図ろうとするものである。その際、結晶と液体の中間に位置する液晶状態を捨象化した「対称性の部分的な破れ」という概念を旗印として掲げることで、現代物性科学のフロントとなっている多くの重要問題を取り込もうとする方向性は、正に時宜に合ったものであった。領域前半では、世界的な新型コロナの予期せぬ大流行が勃発し、異なる専門分野間の相互交流を重要な柱とする本領域にとってはかなりの痛手であったことと推察するが、オンラインでの各種セミナーや研究会の開催を通してこの困難を切り抜けられ、特に期間最後の1年間に行われた札幌での領域国際会議ならびに東大柏キャンパスでの領域会議の盛り上がり・充実度は、特筆すべきものであった。それぞれの分野においても、例えば当プロジェクトの本道とも言うべき超伝導に対しては、電子ネマティック揺らぎが担う非従来型の超伝導の予言と観測、あるいは電子ネマティック秩序に付随した電子のうねり（波）の観測といった特筆すべき成果が上がった。評価者として最も印象的だったのは、「量子液晶概念」に触発されて様々なエキゾチックな新奇状態・新奇秩序が、様々な分野・系・物質を対象に、理論・実験双方から次々と提案され、極めて精力的にその探査が進められた点にある。この内のどれが、真の意味で将来を切り拓く重要な成果として残るのかを判断するには今少し時間が必要かもしれないが、既に多くの新しい成果が生み出され、今後に関わっていくのではないかと感じる。

田島節子（第77,78期日本物理学会会長、大阪大学名誉教授）

本領域は、物質の性質を決める新しい電子状態として「液晶」という概念を導入し、電荷液晶、スピン液晶、超伝導対液晶を統一的に理解する学理の構築という壮大な目標を掲げた。量子液晶とは何か、どんな物質でどんな場合に発現する状態なのか、それを制御することはできるのか。この5年間で、これらの問いに果敢に挑戦し、多くの成果を得ることができた。ネマティック揺らぎに起因する超伝導や量子液晶状態における新しい性質・状態の発見のほか、STM, ARPES, 中性子散乱など各種実験手法の先鋭化

による液晶状態の観測は、当初心配された時間的空間的分解能の限界を破るものとなった。パルス光やパルス電流、磁場などによる液晶状態の制御も行われ、道半ばの部分もあるが、今後が大いに期待される。研究成果はトップジャーナルに数多くの論文として出版され、高く評価できる。研究会や国際会議のほか、QLC チャンネルという動画配信や班員間の共同研究も活発に行われ、領域形成の効果が十分確認できる。また若手育成のための研究会や海外研修制度も十分に成果をあげた。Quantum Material Accelnet という国際研究ネットワークに加わって、欧米や韓国など世界各国の研究プロジェクトと交流したことも特筆すべきことである。

Andrey V. Chubukov (Professor, University of Minnesota; Recipient of 2018 John Bardeen Prize)

In my view, this project was a total success. The goal of the proposed work was to find commonalities in the underlying physics and common organizing principles in various realizations of Quantum Liquid Crystals (QLCs) in condensed matter systems. The materials studied within the QLC grant activity included spin liquid crystals (spin nematics), made of localized and itinerant fermions, charge liquid crystals (charge nematics), e.g., the systems with orbital order, like FeSe, and pair liquid crystals, which are superconductors with either spatially non-homogeneous order parameter (a pair density wave order), or systems in which superconductivity either co-exists with a nematic order or induces it. This research resulted in several ground-breaking discoveries, which propelled the team to the very top in the field of QLCs. The closest to my research interests was the set of discoveries of novel superconductivity in doped FeSe, which does not fit into a “conventional” scenario of spin-mediated pairing. It is highly likely that the novel superconducting states have non-trivial topological properties, like Majorana modes in the vortex cores. The research groups involved in this activity published a large (exceptionally large!) number of high-quality papers in prestigious peer-reviewed journals. One of my favorites is “Two superconducting states with broken time-reversal symmetry in FeSe_{1-x}S_x” by K. Matsuura *et al.*, *PNAS* **120**, e2208276120 (2023), in which the authors (a number of PIs of the grant) presented extraordinarily compelling evidence for two superconducting domes with notably different properties. The full list of publications over the grant period is truly impressive as well as the number of junior researchers involved (students and postdocs). In 2021 and 2024, Prof. Shibauchi and his colleagues organized successful International Conferences on QLC, with talks from researchers from around the world. I participated in both conferences and very much enjoyed high-quality talks on all pillars of the grant-sponsored research. Overall, I strongly believe that this project is an immense success. It is rare when all the goals of the proposed work have been achieved, but this is clearly the case with this grant.

Peter J. Hirschfeld (Distinguished Professor, University of Florida; Recipient of 2022 John Bardeen Prize)

Let me begin by saying that the publication output is prodigious even for a team of ~50 researchers who receive funding from the QLC project. The publications are not only numerous, but have appeared almost exclusively in highest quality journals, from JPSJ to Nature, to Science and APS journals. There is clearly wide collaboration among the different subgroups, sharing samples, theoretical knowhow, and experimental techniques to attack a wide variety of frontline quantum problems. There is no doubt that this excellent group of researchers is collectively having an enormous collective impact on the field of quantum materials. I know that in the fields in which I work that the quantum papers produced by many of these workers are highly respected and should be cited often. An interesting subset of all papers listed appear to me to be directly related to the stated goals of understanding “quantum liquid crystals”. Of course this term is somewhat nebulous, but I take it to mean studies of electronic nematicity, strong symmetry-breaking correlations driven by electronic interactions, as well as the effect on electronic properties of applied strain. The signature achievements directly in this area include the discovery of remarkable effects on superconductivity near the pressure- or doping-driven nematic critical point in Fe-based superconductors, possibly driven by the elusive Bose-Einstein condensate, by nematic fluctuations, or by topological transitions leading to Bogoliubov Fermi surfaces. These discoveries have stimulated a great deal of interest in the quantum materials and superconductivity community, including theoreticians who have developed new concepts in order to explain these observations. More generally, this effort led to discoveries of several new examples of QLC’s, involving collaborative efforts between thrusts A01 & B01, with theoretical support from C01; such that the overall synergy of the effort was evident. The degree of cross-fertilization is remarkable, and it indeed appears that, as I anticipated three years ago, those researchers who had been studying problems of the quantum liquid crystal state shared their expertise, leading to those from outside this subfield becoming increasingly motivated to study these problems. Overall, progress and impact of the JP19H05824 project in the past five years has been extremely impressive.