

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01170

研究課題名(和文) 単原子層ヘリウムの超固体性と量子スピン液体状態

研究課題名(英文) Supersolidity and the quantum spin liquid state in monolayer of helium

研究代表者

福山 寛 (FUKUYAMA, Hiroshi)

東京大学・低温科学研究センター・特任研究員

研究者番号：00181298

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：低温でヘリウム原子をグラファイト結晶表面に単原子層吸着させて運動を2次元空間に制限した2次元量子系では、絶対零度でも流動性を保つ新奇な量子液晶相が量子液相と量子固相の間相として実現することが期待されている。本研究では、グラファイト基板を微小振動させたときのヘリウム4吸着膜の力学応答と比熱を同時測定して、量子液晶を強く示唆する特異な超流動状態の観測に成功した。また、同位体のヘリウム3吸着膜で観測される原子核スピンの特異な量子スピン液体磁性も、同じ量子液晶構造を仮定するとよく説明できることが分かった。量子液晶の構造解明を目指す放射光X線回折実験も開始し、予備的ではあるが良好な実験結果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

物質が取り得る状態(相)には気体、液体、固体、液晶、アモルファスの5態ある。ヘリウム原子からなる物質系の場合、量子力学効果が顕在化する絶対零度では液体と固体のみが存在し(それぞれ量子固体と量子液体)、後者は粘性のない超流動状態となる。本研究では、表面吸着したヘリウム単原子層膜に「量子液晶」という物質の新たな状態とその超流動相が存在することを強く示唆する結果が得られた。これは人類の自然界の理解をより豊かなものとし、量子計算機の原理である量子もつれと深く関係する「量子スピン液体」磁性など他分野への波及効果もある。高輝度放射光を利用した極低温研究という新分野にも先鞭をつけることができた。

研究成果の概要(英文)：At low temperatures, helium atoms form a monatomic adsorbed layer on a crystalline graphite surface, where atomic motions are restricted to two dimensions (2D). In this 2D quantum system, the novel quantum liquid-crystal (QLC) phase with finite fluidity even at absolute zero is expected to emerge as an intermediate phase between the quantum liquid and solid phases. In this study, by performing simultaneous measurements of mechanical response of the adsorbed helium-4 film under substrate oscillation and specific heat of the film, we have succeeded in observing an anomalous superfluid state, which strongly supports the QLC hypothesis. In addition, we have shown that the novel quantum spin-liquid magnetism observed in the adsorbed film of helium-3, an isotope of helium-4, can be explained by assuming the QLC structure behind. A preliminary but encouraging result of synchrotron radiation X-ray diffraction experiment aiming for structural identification of the QLC phase was also obtained.

研究分野：低温物理学

キーワード：量子液晶 超固体 スピン液体 単原子層

1. 研究開始当初の背景

空間対称性の破れ(結晶化、液晶化)とゲージ対称性の破れ(超流動性、超伝導性)の共存問題は、1969年の理論予測以来、多くの物理学者の興味を引いてきた未解決問題の一つである。2004年にはHCP相固体ヘリウム4(^4He)が0.2K以下で「超固体」状態になるとの実験報告が現れたが、その後10年以上にわたる集中的な研究がなされ、バルクの性質ではないとの結論に収束しつつあった。しかし我々は、表面吸着したヘリウム4単原子層では、2次元バルクの超流動液晶あるいは超固体状態が実現しているのではないかとこの予測に基づき本研究を立案した。ちょうど同じ頃、1次元冷却原子系で超固体状態を見出したとする実験が報告されたり、高温超伝導体の局在相と超伝導相の中間に現れるネマティック相が電子系の「超伝導液晶」状態と認識され始めるなど、物性物理学のより広い分野では、この問題が新たな展開を迎えていた。一方、磁性の分野に目を転ずると、スピン座標に関する量子液体と見ることもできる「量子スピン液体」の研究が長年精力的に続けられ、電子系で新たな候補物質が多数発見される一方で、理論との統一的な理解には至っておらず、次のブレークスルーが待たれる状況にあった。

2. 研究の目的

原子スケールで平坦なグラファイト表面に物理吸着した ^4He 単原子層は、ほぼ理想的な2次元ボース量子系と考えられる。本研究の目的の第一は、この系では量子液相と量子固相の中間相としての量子液晶(あるいは超流動液晶)や超固体など物質の新しい状態が実現しているであろうという我々自身の予測[1]を検証することである。過去複数のグループ[2]によって当該中間相で有限の超流動応答が観測されたとする報告がなされているが、この種の実験に用いられるグラファイト基板表面には不可避免的に不均一部分が一定量存在している。そのため、先行研究の密度スケールには無視できない不定性があり、当該相が超流動性を示すかどうかの確証は得られていない。第二の目的は、同じくグラファイト表面に吸着した ^3He 単原子層(ほぼ理想的な2次元フェルミ量子系)の核スピン系(スピン1/2)で最近我々が実験的に見出した2種類の特異なギャップレス量子スピン液体[3]の非自明な磁気素励起の正体を解明することと、上記の量子液晶相との関連性を探ることである。

3. 研究の方法

第一の研究目的を達成するため、同一試料に対して熱容量とねじれ振り子応答を同時測定できるユニークな実験装置を開発し、これを使って量子液晶相と目されている中間相(以下、QLC相とよぶ)が超流動性をもつかどうかを調べた。試料が相図上でどの位置に存在するかは熱容量を測定できれば正確に同定できるので、試料密度の不定性に影響されず、各相の超流動応答を正確に決めることができるはずである。

第二の目的達成のため核断熱消磁冷凍機を使ったスピン液体相の帯磁率とスピン-スピン緩和時間の測定を計画していたが、冷凍機の修理と調整に手間取ったため、大阪大学の理論グループとの共同研究を主に推進した。具体的には、量子液晶と量子スピン液体との関連を「構造の量子揺らぎ」という観点から追求した。

量子液晶という新奇量子相の存在を確定するには、その構造特定が不可欠である。当初、国際共同研究で実施する中性子回折実験の将来構想を準備する予定であったが、コロナパンデミックのため方針を変え、国内の高輝度放射光施設(SPring-8)を使ったX線回折実験でこれを行うだけ早く達成すべく、兵庫県立大学と高輝度光科学研究センターのグループとの共同研究に参画して予備実験を実施した。

4. 研究成果

(1) 熱容量とねじれ振り子応答同時測定装置の開発

熱容量とねじれ振り子応答を高精度で同時測定できる実験装置の開発に成功した(図1)[4]。ベリリウム銅合金製ねじれロッドをもつねじれ振り子試料容器内に、 45.7m^2 の吸着表面積をもつグラフォイル基板を格納し、容器壁面にエポキシ樹脂で固定した。グラフォイルは、内部に劈開面を多数もつグラファイト微結晶の連結体(recompressed exfoliated graphite)であり、先行研究のねじれ振り子単独測定[2]でも用いられている。低温での振り子の共鳴周波数は1392 Hz、 Q 値は 5×10^5 である。このねじれ振り子全体を高純度アルミナ支持具で銅製ベースプレート上に堅牢に固定した。アルミナ支持具は、準断熱ヒートパルス法で熱容量測定できる程度の熱絶縁性を有し、かつ、振り子の高い Q 値を減じることのない高い剛性も併せもつ必要があるため、有

限要素法による機械的・熱的シミュレーションと試作を繰り返して、最終的な寸法、形状そして材質を決定した。ただし、アルミナ支持具経由の熱伝導だけでは試料セルを300 mK以下に冷却できないため、並列に直径0.1 mm、長さ100 mmの銅細線を敷設して低温域の熱伝導性を補強した。その他、測温用抵抗温度計や熱容量測定用ヒーターのリード線には超伝導細線を用いてリード線伝いの入熱を遮断した上で、振り子のQ値と安定性を損なわないよう注意深く配線した。

完成した装置は、 $30 \text{ mK} \leq T \leq 1.5 \text{ K}$ の広い温度範囲にわたり同一の ^4He 単原子層試料に対して熱容量とねじれ振り子の共鳴周波数を同時かつ精密に測定可能である。それぞれの測定精度は約0.01 mJ/Kと0.02 mHzである。

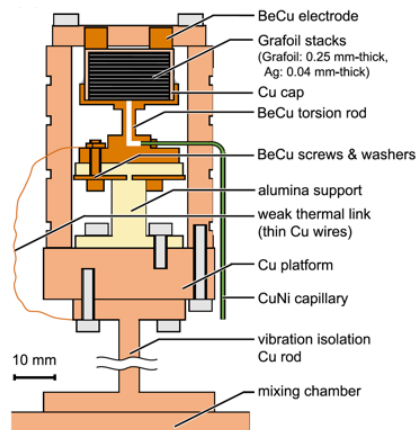


図1. 開発した熱容量とねじれ振り子応答同時測定装置 (文献4より)。

(2) 単原子層 ^4He における新奇量子相の探索

(1)で開発した実験装置を用いて、グラファイト表面上吸着第2層目の単原子層 ^4He の熱容量と超流動応答(超流動に起因する共鳴周波数の変化: Δf で表す)の同時測定を、広い密度範囲にわたり細かな密度ステップで実施した。図2(a)は $T = 30 \text{ mK}$ で観測した Δf の密度依存性で、その上には熱容量の精密単独測定[1]から決定した状態相図を示す。両者を比較すれば、どの量子相がどれだけの超流動性を示すか、これで曖昧さなく判断できる。なお、横軸の密度(ρ)は1層目 ^4He も含めた全面密度である。以下、本研究で初めて明確になった重要な実験事実を低密度から順に列挙する。

- ① 相図上で気液共存域が終わる $\rho = 16.0 \text{ nm}^{-2}$ ではなく、それより高い 17 nm^{-2} から超流動応答が観測され始め、その後は密度に対してほぼ線型に増大する。→2次元超流動で期待される有限の Δf のトビを伴うKosterlitz-Thouless (KT) 転移の予測とは一見異なる。
- ② 液相とQLC相の共存相に入るや否や Δf は急減するが、純粋QLC相でも小さいが有限の Δf が観測される。→液相よりずっと小さいが有限の超流動応答がQLC相で観測されたことから、この中間相は量子流体性をもつことが判明した。
- ③ 固相(1層目 ^4He に対する不整合な三角格子構造をもつ)との共存域に入ると Δf は減少し始め、純粋固相では誤差の範囲で $\Delta f = 0$ となる。→超固体現象は観測されていない。

さらに、図2(c)(d)に示すように、 Δf の温度依存性についても以下の知見が得られた。

- ④ 有限の Δf が観測されるとき温度依存性は、ある温度(見かけ上の転移温度: T_0)以下で温度の対数に比例した緩やかな上昇が始まり、それが最低温度まで続く。→これは $T \geq 30 \text{ mK}$ の範囲に限れば、全ての先行研究[2]で観測されている奇妙な実験事実と符合する。
- ⑤ ただし、本研究では $50 \leq T_0 \leq 500 \text{ mK}$ の範囲で非単調な密度依存性を示す点が先行研究とは異なる(QLC相の方が液相より T_0 が高い)。

以上で最も重要なことは②のQLC相で有限の超流動応答を観測したことであり、この系が基底状態で流動性をもつ「量子液晶」相であることを強く示唆している。

一方、種々の考察から、本研究の装置の場合、 He 試料を導入しない状態で測定したbackgroundの共鳴周波数の温度変化($\Delta f_{\text{BG}}(T)$)に一定数(ζ)を掛けた $\zeta \Delta f_{\text{BG}}(T)$ を測定結果から差し引くことで、超流動応答成分のみを正しく取り出せることが判明した。つまり、観測された Δf の温度依存性には He 試料と基板の剛性の混成効果も付加されている。図2(a)(c)(d)はこの解析に基づく結果である。図2(b)に ζ の密度依存性を示す。純粋液相からQLC相との共存相に入ると ζ が段階的に増加する(つまり剛性が増す)のが分かる。ここには示していないが、低温で超流動応答を示さない ^3He 単原子試料の ζ でも全く同じ振る舞いが観測されたことは、この解析の妥当性を示している。こうした一連の実験事実は、QLC相が何らかの空間秩序を有する相であることを強く示唆している。

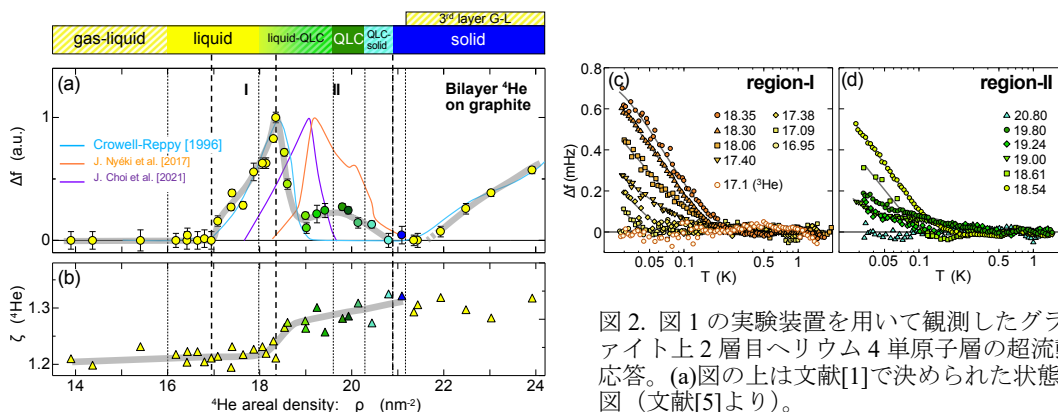


図2. 図1の実験装置を用いて観測したグラファイト上2層目ヘリウム4単原子層の超流動応答。(a)図の上は文献[1]で決められた状態相図(文献[5]より)。

さらに我々は、グラフォイル基板上的単原子層 ^4He が、無数の微小超流動アイランド(大きさはグラファイト微結晶サイズに対応)がランダムに分布した接合強度をもつ Josephson 接合で

結ばれた「Josephson 接合のランダムネットワーク」でモデル化できると考え、単純化した条件の元で Δf の温度依存性と密度依存性を計算したところ、①～⑤全ての実験事実を矛盾なく説明できることが分かった。実験事実①も、このモデルに percolation 理論の考えを併用すれば説明でき、KT 理論とも矛盾しない。

以上のように、(1)で開発した特別な実験装置を使うことで、グラファイト上単原子層 ^4He の量子液相と量子固相の中間密度域に、ある種の“剛性”をもつ新奇な超流動相が存在することが判明した[5]。それは部分的に空間対称性の破れた量子液晶である可能性が高い。

(3) 量子スピン液体と量子液晶の関係

2層系の ^3He 単原子層 ($^3\text{He}/^3\text{He}/\text{gr}$) で知られていた量子スピン液体状態と、最近、我々が詳細な磁気熱容量測定から重水素化水素 (HD) 2分子層上の ^3He 単原子層 ($^3\text{He}/\text{HD}/\text{HD}/\text{gr}$) で見出した2種類別の量子スピン液体状態[3]のうち高密度側のものが基本的に同じ状態相(量子液晶)にあり、同じタイプのギャップレス量子スピン液体状態を作り出していることを、実験データの詳しい解析と理論研究によって明らかにした。

まず、実験データの解析からは、HD上 ^3He 単原子層の場合、QLC相内で7%密度を増すと典型的な交換相互作用の大きさ (J_0) が1/3になるが、この間、磁気比熱の換算温度 (T/J_0) 依存性は全く変わらないことが判明した。これはQLC相が単一相(純粋相)であり、有限の圧縮率をもつことの証拠である。そして2層系 ^3He 単原子層のQLC相の磁気比熱もこれとかなりよく似た換算温度依存性をもつ。他グループによって測定された両系の帯磁率の換算温度依存性に至っては、ほとんど区別がつかない程一致する。両者は同じ量子相であり、同じ量子スピン液体状態をもつと結論できる。

一方、本研究の成果(2)から、2層系 ^4He のQLC相が量子液晶相であることがほぼ確実である。そして2層系は ^4He も ^3He もほぼ同じ状態相図をもつことが知られている[1]ので、このタイプのスピン液体を生むエッセンスは、量子液晶という特異な量子状態にあると推定できる。QLC相の具体的な構造は、回転対称性が6回対称に破れ(転位欠陥が存在)、系のもつ強い量子効果のため絶対零度でも有限密度の転位が量子力学的に運動している「量子ヘキサティック相」である可能性が高い[1]。そこで、この仮説を検証するため、He系で有効とされている4体までの多体のリング交換相互作用を取り入れた三角格子スピンハミルトニアンを基に、これに交換相互作用に一定幅の分布を考える「ランダムリング交換モデル」を考え、その性質を有限系の厳密対角化法で詳しく理論的に調べた(理論計算は阪大グループによる)。その結果、3体交換を繰り返した有効2体交換 (J_2^{eff} : 強磁性的) で規格化したときの4体交換 (J_4 : 反強磁性的) の大きさを0.35とし、 J_2^{eff} と J_4 の分布幅をどちらも $\pm 30\%$ としたとき、現存するほぼ全ての実験データ(ギャップレスな磁気比熱と帯磁率の温度依存性、磁化曲線など)を定量的によく説明できることが判明した[3]。なお、 J_2^{eff} の10%程度の小さな5体および6体交換まで考慮すると、実験との一致は若干良くなるが、本質的な効果ではない。

この研究結果は、核スピン系の ^3He 単原子層だけに留まらず、低温極限で比熱が温度に比例し、帯磁率が一定値に漸近する電子系のギャップレス量子スピン液体物質の場合も構造揺らぎが本質的な役割を果たしている可能性を示唆する。実際、金属絶縁体転移近傍の関連物質で大きな電荷揺らぎが報告されていることから、この研究分野全体のブレイクスルーとなり得る成果である。

(4) 吸着 He 膜の放射光 X 線回折の予備実験

以上(2)(3)の研究結果から、グラファイト上 He 単原子層では、絶対零度において、粒子密度が増加して液相から固相に量子局在する際、量子液晶という中間相を経由することが確実となった。そして、量子液晶の構造は量子ヘキサティック相の可能性が高いことも分かった。しかし、その構造は回折実験で直接観測しなければ実際には分からない。そこで、本研究の最終段階で、SPring-8の高輝度放射光を使ったX線回折法でHe量子液晶相の構造決定を目指す予備研究を、兵庫県立大とSPring-8の研究者と共同で進めた。

共同研究者がすでに製作していたコンパクトな放射光X線回折実験用GM冷凍機に適合する吸着He試料セル等を設計し追加した。吸着基板には、ガラス基板上に直接CVD成長させた配向性が特に高い熱分解グラファイトの薄片(厚さ $50\mu\text{m}$)を採用し、これをポリイミドシート製の放射光導入窓をもつ吸着試料セル内に収めた。試作した装置をSPring-8のBL13XUビームラインに装着し(図3(a))、複数回のビームタイムを得て予備実験を行った結果、以下の成果を得た[6]。

- ① 試料ステージを1.4Kまで冷却でき、その温度を約5時間維持できる(1K potの保持時間)ことを確認した。
- ② XRD測定から求めた吸着基板のモザイク角分布は 0.05° と非常に小さく、表面や吸着膜の構造に敏感なSurface crystal truncation rod (CTR)散乱実験を行う上で、十分な高配向性をもつことが分かった。
- ③ 低温で ^4He ガスを導入してグラファイト基板上に形成した単層及び2層のHe吸着膜由来のCTR信号を初めて観測することに成功した(図3(b))。実験データはモデル計算とも定性的に一致するミラー指数依存性を示す。試料密度に依存したCTR信号の変化も観測できたが、今後、グラファイト基板の面積を増やすなどの改良を施した上で再現性をチェックする予

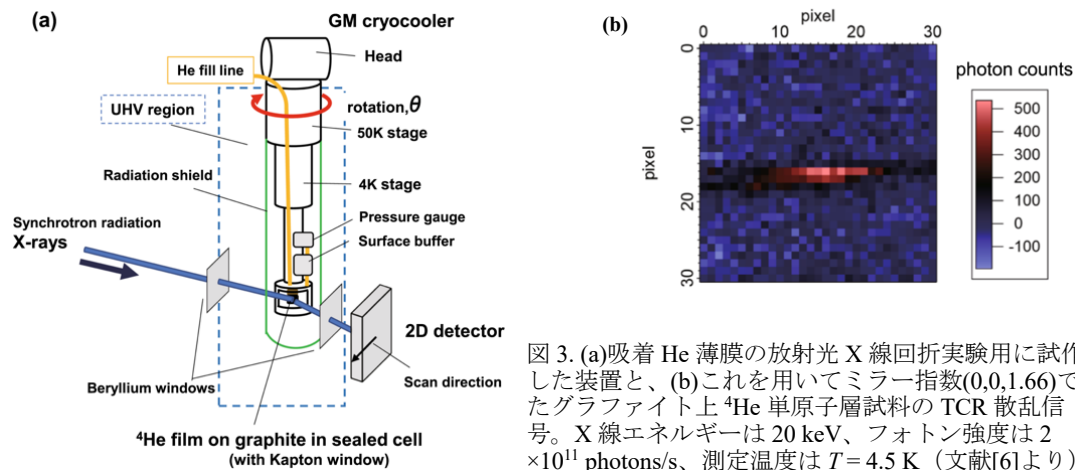


図 3. (a)吸着 He 薄膜の放射光 X 線回折実験用に試作した装置と、(b)これを用いてミラー指数(0,0,1.66)で得たグラファイト上 ${}^4\text{He}$ 単原子層試料の TCR 散乱信号。X 線エネルギーは 20 keV、フォトン強度は 2×10^{11} photons/s、測定温度は $T=4.5$ K (文献[6]より)。

定である。

- ④ 現実的な装置の寸法、形状、材質そしてビーム強度の元で、 $T = 100$ mK における放射光 X 線照射によるグラファイト基板の発熱量と温度分布を有限要素法でシミュレーションした結果、昇温による温度差は 4%程度まで低減できることが分かった。

1 K 以下の極低温での放射光による硬 X 線回折実験は世界的にもほとんど前例がないので、今後数年を要する挑戦的な研究プロジェクトではあるが、以上のように、この測定法は今後有力な低温物理学の研究手段となる期待がある。

参考文献

- [1] S. Nakamura, K. Matsui, T. Matsui, and H. Fukuyama, Phys. Rev. B **94**, 180501 (2016).
 [2] P. Crowell and J. Reppy, Phys. Rev. B **53**, 2701 (1996); Y. Shibayama, H. Fukuyama, and K. Shirahama, J. Phys. Conf. Ser. **150**, 032096 (2009); J. Nyéki, A. Phillis, A. Ho, D. Lee, P. Coleman, J. Parpia, B. Cowan, and J. Saunders, Nat. Phys. **13**, 455 (2017); J. Choi, A.A. Zadorozhko, J. Choi, and E. Kim, Phys. Rev. Lett. **127**, 135301 (2021).
 [3] M. Kamada, R. Nakamura, T. Matsui, K. Uematsu, H. Kawamura, and H. Fukuyama, in preparation.
 [4] J. Usami, R. Toda, S. Nakamura, T. Matsui, and H. Fukuyama, J. Low Temp. Phys. (<https://doi.org/10.1007/s10909-021-02658-9>).
 [5] J. Usami, R. Toda, S. Murakawa, and H. Fukuyama, in preparation.
 [6] A. Yamaguchi, H. Tajiri, A. Kumashita, J. Usami, Y. Yamane, A. Sumiyama, M. Suzuki, T. Minoguchi, Y. Sakurai, H. Fukuyama, J. Low Temp. Phys. (<https://doi.org/10.1007/s10909-021-02652-1>).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Usami Jun, Toda Ryo, Nakamura Sachiko, Matsui Tomohiro, Fukuyama Hiroshi	4. 巻 online
2. 論文標題 A Simple Experimental Setup for Simultaneous Superfluid-Response and Heat-Capacity Measurements for Helium in Confined Geometries	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-021-02658-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yamaguchi Akira, Tajiri Hiroo, Kumashita Atsuki, Usami Jun, Yamane Yu, Sumiyama Akihiko, Suzuki Masaru, Minoguchi Tomoki, Sakurai Yoshiharu, Fukuyama Hiroshi	4. 巻 online
2. 論文標題 Structural Study of Adsorbed Helium Films: New Approach with Synchrotron Radiation X-rays	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-021-02652-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Usami Jun, Tokeshi Koki, Matsui Tomohiro, Fukuyama Hiroshi	4. 巻 203
2. 論文標題 Superconducting Niobium Calorimeter for Studies of Adsorbed Helium Monolayers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 1~10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-020-02558-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Matsui Tomohiro, Sato Hideki, Kita Kazuma, Amend Andre E. B., Fukuyama Hiroshi	4. 巻 123
2. 論文標題 Hexagonal Nanopits with the Zigzag Edge State on Graphite Surfaces Synthesized by Hydrogen-Plasma Etching	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 22665 ~ 22673
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.9b06885	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takimoto S., Toda R., Murakawa S., Fukuyama Hiroshi	4. 巻 201
2. 論文標題 Performances of a Compact Shielded Superconducting Magnet for Continuous Nuclear Demagnetization Refrigerator	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 179 ~ 186
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-019-02331-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakamura Sachiko, Miyafuji Daisuke, Toda Ryo, Matsui Tomohiro, Fukuyama Hiroshi	4. 巻 192
2. 論文標題 Characterization of Pyrolytic Graphite Sheet: A New Type of Adsorption Substrate for Studies of Superfluid Thin Films	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 330 ~ 345
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-018-1983-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakamura Sachiko, Fujii Takenori, Matsukawa Shoji, Katagiri Masayuki, Fukuyama Hiroshi	4. 巻 95
2. 論文標題 Specific heat, thermal conductivity, and magnetic susceptibility of cyanate ester resins - An alternative to commonly used epoxy resins	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Cryogenics	6. 最初と最後の頁 76 ~ 81
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cryogenics.2018.09.001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Usami Jun, Kato Nobuyuki, Matsui Tomohiro, Fukuyama Hiroshi	4. 巻 196
2. 論文標題 The Role of Substrate Roughness in Superfluid Film Flow Velocity	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 52 ~ 59
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-018-02119-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計36件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 12件）

1. 発表者名 A. Yamaguchi, H. Tajiri, A. Kumashita, J. Usami, Y. Yamane, A. Sumiyama, M. Suzuki, T. Minoguchi, Y. Sakurai, and H. Fukuyama
2. 発表標題 Structural study of adsorbed helium films: New approach with synchrotron radiation X-rays
3. 学会等名 International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Takimoto, R. Toda, S. Murakawa, and Hiroshi Fukuyama
2. 発表標題 Construction of Continuous Magnetic Cooling Apparatus with Zinc Soldered PrNi5 Nuclear Stages
3. 学会等名 International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 R. Toda, S. Takimoto, S. Murakawa, and Hiroshi Fukuyama
2. 発表標題 Development of a Superconducting Zinc Heat Switch for the Continuous Nuclear Demagnetization Refrigerator
3. 学会等名 International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A. Kumashita, H. Tajiri, A. Yamaguchi, J. Usami, Y. Yamane, A. Sumiyama, T. Minoguchi, M. Suzuki, Y. Sakurai, and H. Fukuyama
2. 発表標題 Pyrolytic graphite for synchrotron X-ray diffraction of two-dimensional helium films
3. 学会等名 International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 J. Usami, R. Toda, S. Murakawa, and H. Fukuyama
2. 発表標題 Superfluidity Found in the Possible Liquid Crystal Phase of 2D 4He
3. 学会等名 International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 J. Usami, R. Toda, and Hiroshi Fukuyama
2. 発表標題 Possible coexistence of Superfluidity and Spatial Order in Monolayers of Helium-4
3. 学会等名 APS March Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田尻寛男, 山口明, 隈下敦貴, 宇佐美潤, 山根悠, 住山昭彦, 鈴木勝, 蓑口友紀, 福山寛, 櫻井吉晴
2. 発表標題 放射光X線散乱による超低温表面の観察手法開発
3. 学会等名 第35回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 J. Usami, R. Toda, S. Nakamura, T. Matsui, and Hiroshi Fukuyama
2. 発表標題 Simultaneous Measurements of Superfluidity and Heat-capacities of Novel Phases in 4He Monolayers
3. 学会等名 International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 S. Takimoto, R. Toda, S. Murakawa, and Hiroshi Fukuyama
2 . 発表標題 Performances of a Compact Shielded Superconducting Magnet for Continuous Nuclear Demagnetization Refrigerator
3 . 学会等名 International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 M. Kamada, K. Ogawa, R. Nakamura, T. Matsui, and Hiroshi Fukuyama
2 . 発表標題 Substrate Corrugation Effects on Self-Binding of ^3He in Two Dimensions
3 . 学会等名 International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 J. Usami, K. Tokeshi, T. Matsui, and Hiroshi Fukuyama
2 . 発表標題 Niobium Calorimeter for Studies of Adsorbed Helium Monolayers
3 . 学会等名 International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Masahiro Kamada, Ryuji Nakamura, Katsuyoshi Ogawa, Tomohiro Matsui, and Hiroshi Fukuyama
2 . 発表標題 New Quantum Spin Liquids in ^3He Monolayer on Hydrogen Plated Graphite
3 . 学会等名 International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2018) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroshi Fukuyama
2. 発表標題 Novel quantum phases of helium confined in two dimensions from quantum liquid-crystal to spin-liquid
3. 学会等名 12th International Conference on Cryocrystals and Quantum Crystals (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福山寛
2. 発表標題 単原子層ヘリウム3の量子液晶相と量子スピン液体状態
3. 学会等名 物性研究所短期研究会「量子多体効果が生み出す液晶的電子状態」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福山寛
2. 発表標題 単原子層ヘリウム3で見つかった2種類の量子スピン液体状態
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会(招待講演)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 ヘリウムコンテナ	発明者 福山寛	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2021-121403	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 ヘリウム回収装置およびヘリウム回収方法	発明者 福山寛、大越慎一	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2020-063432	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

http://qfs2018.sakura.ne.jp/kelvin/

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	村川 智 (Murakawa Satoshi) (90432004)	東京大学・低温科学研究センター・准教授 (12601)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携 研究者	松井 朋裕 (Matsui Tomohiro) (40466793)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教 (12601)	
連携 研究者	戸田 亮 (Toda Ryo) (20452203)	東京大学・低温科学研究センター・技術専門職員 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------