

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24740214

研究課題名(和文) 電荷密度波の超流動性の探索

研究課題名(英文) Investigation of Superfluidity of Charge Density Waves

研究代表者

松浦 徹 (Matsuura, Toru)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：60534758

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：電荷密度波(CDW)の超流動性について研究を行った。当初、低次元導体TaS₃、NbS₃の微小リング結晶に磁場を通し誘導起電力による応答を機械振動子素子により検出する予定であったが、コマーシャル品の機械振動子素子では検出が難しいことがわかり、厚さ1マイクロメートル以下で固い擬一次元導体その物を機械共振子とみなし、その機械的振動を電流によって検知する基礎研究を行った。また、TaS₃結晶のCDWダイナミクスを詳しく調べた結果、TaS₃のCDW状態では2の位相ソリトンが多数、液体状態のようにランダムな配置をとる可能性を提案した [Europhys. Lett. 109, 27005 (2015)]。

研究成果の概要(英文)：We investigated superfluidity of charge density waves (CDWs) in ring-shaped crystals of TaS₃ and NbS₃. Initially, we were planning to use a mechanical cantilever technique to detect a signal of CDW current through ring. However, accuracy of commercial sensors was not sufficient. Then we investigated mechanical detection of using CDW materials of whisker crystals. We also investigated CDW in TaS₃ whisker crystals, and found that there are many 2 phase solitons at random in the CDW state of TaS₃ [Europhys. Lett. 109, 27005 (2015)].

研究分野：凝縮系物理学

キーワード：電荷密度波 量子干渉効果 アハラノフボーム効果 非線形伝導 ソリトン 機械振動子

1. 研究開始当初の背景

電荷密度波 (Charge Density Wave: CDW) は、超伝導・超流動と同じく電子の巨視的な量子状態であるが、CDW は離散並進対称性を持つため、超流動性を示さず絶縁体化する。CDW は電子密度の並進対称性の破れを伴うため、電子集団が固体のように振る舞う。このとき、固体ヘリウム 4 で存在が期待される超流動 (超固体) の性質を持つ可能性はないだろうか？

電荷密度波の運動に起因する量子干渉効果が、擬一次元導体 TaS₃ のリング状結晶において近年実験的に観測された [Tsubota, et al., Europhys. Lett. 97, 57011 (2012)]。この電荷密度波干渉効果は、80 K と比較的高い温度においても観測された。このように、一次元 CDW 物質 (NbS₃, TaS₃, NbSe₃) のリング状結晶は、円環に閉じた CDW が実現しており、CDW のマクロ波動関数としての性質が顕著に発現する可能性がある。

2. 研究の目的

本研究は、リング状 CDW 物質と機械振動素子 (マイクロカンチレバー) を組み合わせ、CDW の超流動 (超固体) 性を実験的に探索することを目的とする。

3. 研究の方法

高感度の機械共振器を利用することで、従来の輸送測定では検出できない CDW 固体超流動の信号を測定することを目指す。

また、CDW リング・CDW ワイヤーに二端子電極を取り付け、電子輸送測定を行い、CDW ダイナミクス基礎測定を行う。

4. 研究成果

電荷密度波 (CDW) の超流動性について研究を行った。当初、低次元導体 TaS₃、NbS₃ の微小リング結晶に磁場を通し誘導起電力による応答を機械振動子素子により検出す

る予定であった。しかしコマーシャル品の機械振動子素子の共振周波数が 1MHz 以下と低いため、より高い周波数を持ち、高い Q 値を持つ自己検知型機械振動子を作成する必要があることがわかった。そのため、厚さ 1 マイクロメートル以下で固い性質を持つ擬一次元導体その物を機械共振子とみなし、その機械的振動を電流によって検知する基礎研究を行った。この研究は現在進行途中であり今後も引き続き行う。

TaS₃ リング状結晶に二端子電極を取り付け、CDW 電流の時間揺らぎを測定した。その結果、CDW 電流が二つの電流状態の間を数秒ごとに行き来すること、揺らぎには 2 つのモードがあり印加電圧によってモード間の遷移が起きること、モードの遷移には電圧ヒステリシスがあることを発見した。この複数の電流状態、揺らぎのモードは、CDW がリング結晶内に閉じ込められるために付加される境界条件に起因すると考えられる。(論文投稿準備中)

リングではなく直線の TaS₃ 結晶の CDW ダイナミクスを詳しく調べた結果、TaS₃ の CDW 状態では 2 の位相ソリトンが多数、液体状態のようにランダムな配置をとって存在している可能性を示した。

電荷密度波 (CDW) の位相ソリトンは、擬一次元 CDW 系において電気伝導に寄与すると考えられている。斜方晶 TaS₃ の CDW に対して行われた放射光 X 線回折実験により、整合と不整合の CDW 衛星反射が共存していることが明らかとなっている [Inagaki et al., J. Phys. Soc. Jpn. 77, 093708 (2008)]。この結果は、斜方晶 TaS₃ の CDW が、位相ソリトンのような非一様な空間構造を持つことを示している。

斜方晶 TaS₃ の整合・不整合 CDW の共存状態での直流・交流干渉 (Shapiro 効果) を測

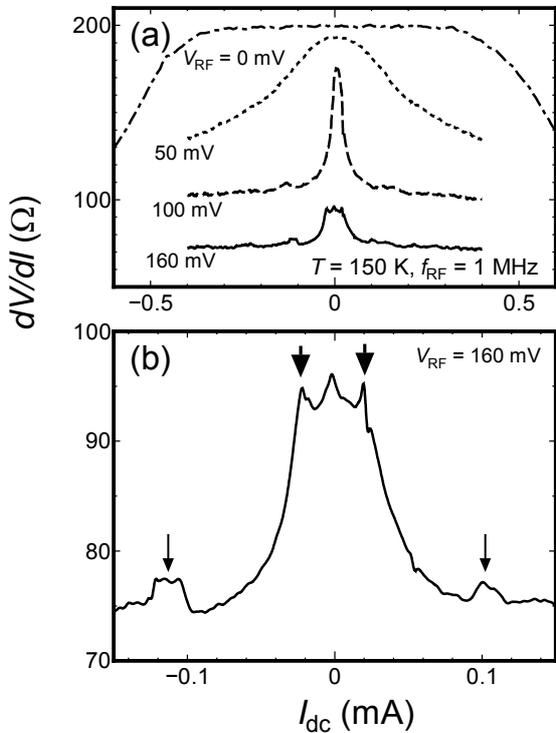


図 1 (a) o-TaS₃ の微分抵抗の直流電流依存性。T = 150 K において、1 MHz の交流バイアス(V_{RF})を印加している。(b) $V_{RF} = 160$ mV の場合の拡大図。

定した。その結果、CDW スライディングによる通常の Shapiro ステップ (図 1 (b) の細矢印で示した微分抵抗のピーク) の他に、閾電場付近において新しい微分抵抗のピーク構造 (太矢印で示した微分抵抗のピーク) を発見した。

CDW のダイナミクスと異常と整合・不整合 CDW の共存はどのように関係しているのかを明らかにするために、位相ソリトンを含む一次元 CDW モデルから衛星反射の構造と直流交流電場下のダイナミクスを、数値計算によって求めた。その結果、(1) 2 の位相ソリトンがランダムに配置していると整合・不整合共存を説明できること、(2) ソリトンが低電場下で CDW 全体のスライディングより先に動くことで、微分抵抗構造の異常が再現されることが分かった。これらの結果より、斜方晶 TaS₃ の中に多数の位相ソリトンが、格子を組むのではなく液体

状態で存在していると考えられる。そこで、ソリトンが CDW ダイナミクスに与える影響を数値シミュレーションによって示した。この結果は Europhysics Letters 誌にて発表を行った [T. Matsuura, et al., Europhys. Lett. 109, 27005 (2015)]。この論文で提案したソリトン液体モデルは、他の電荷密度波系においてもソリトンによる流動特性があることを示唆する。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

[1] “Charge density wave soliton liquid”, T. Matsuura, J. Hara, K. Inagaki, M. Tsubota, T. Hosokawa, and S. Tanda, *Europhys. Lett.* 109, 27005 (2015). (査読有)

[2] “Melted discommensuration of charge density waves”, T. Matsuura, J. Hara, K. Inagaki, M. Tsubota, T. Hosokawa, S. Tanda, *Physica B: Condensed Matter* 460, 30-33 (2015). (査読有・国際学会proceeding)

[3] “Hysteretic current switching phenomena in TaS₃ ring crystals”, T. Hosokawa, T. Matsuura, M. Tsubota, S. Tanda, *Physica B: Condensed Matter* 460, 171-173 (2015). (査読有・国際学会proceeding)

[4] “Dynamical incommensurate-commensurate crossover in TaS₃”, T. Matsuura, J. Hara, M. Tsubota, T. Hosokawa and S. Tanda, *Topologica* Vol.3 accepted (査読有・国際学会proceeding)

[5] “Current switching phenomenon with hysteresis in TaS₃ ring crystals”, T. Hosokawa, T. Matsuura, M. Tsubota, and S. Tanda, *Topologica* Vol.3 accepted (査読有・国際学会proceeding)

[6] “Cycloid crystals by topology change”, T. Matsuura, T. Matsuyama and S. Tanda, *Journal of Crystal Growth* 371, 17-22 (2013). (査読有)

〔学会発表〕(計 9 件)

【国際学会】

- [1] “Melted discommensuration of charge density waves”, T. Matsuura, J. Hara, K. Inagaki, M. Tsubota, T. Hosokawa, S. Tanda, *International School and Workshop on Electronic Crystals ECRYS-2014*, the Institute of Scientific Studies, Cargese, France, August 11-23, 2014, (招待講演)
- [2] “Charge density wave transport in ring-shaped crystals”, T. Matsuura, *International Workshop on Spintronic Nano Materials 2012*, Hokkaido university, Sapporo, Japan, November 5, 2012 (招待講演)
- [3] “Topology change surgery for topological crystals”, T. Matsuura, *The 1st Global Networking of Frontier Scientist Workshop*, Grand Intercontinental Seoul Parnas, Seoul, South Korea, December 27, 2012 (招待講演)
- [4] “Dynamical incommensurate-commensurate crossover in TaS₃”, T. Matsuura, J. Hara, M. Tsubota, T. Hosokawa and S. Tanda, *International Workshop on “Phase Transition, Critical Phenomena and Related Topics in Complex Networks”*, September 9-11, 2013, Hokkaido university, Sapporo (ポスター発表)
- [5] “Current switching phenomenon with hysteresis in TaS₃ ring crystals”, T. Hosokawa, T. Matsuura, M. Tsubota, and

S. Tanda, *International Workshop on “Phase Transition, Critical Phenomena and Related Topics in Complex Networks”*, Hokkaido university, Sapporo, Japan, September 9-11, 2013 (ポスター発表)

[6] “Creation of Topological Crystals and Topology-Change Surgery”, T. Matsuura, T. Tsuneta, T. Matsuyama, and S. Tanda, *The Topological Fluid Dynamics (IUTAM Symposium) workshop*, Newton Institute, Cambridge, UK, July 23-27, 2012 (ポスター発表)

【国内学会】

- [7] “電荷密度波におけるソリトン液体状態”、松浦徹, 原淳, 稲垣克彦, 坪田雅功, 細川匠, 丹田聡, 日本物理学会第 70 回年次大会, 早稲田大学, 東京, 2015 年 3 月 21-24 日
- [8] “NbS₃ リングにおける室温量子効果”, 松浦徹, 常田琢, 細川匠, 坪田雅功, 丹田聡, 日本物理学会第 68 回年次大会, 広島大学, 広島, 2013 年 3 月 26 - 29 日
- [9] “TaS₃ リング結晶における電荷密度波アハラノフ・ボーム効果のメカニズム”, 細川匠, 松浦徹, 坪田雅功, 丹田聡, 日本物理学会第 68 回年次大会, 広島大学, 広島, 2013 年 3 月 26 - 29 日

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://exp-ap.eng.hokudai.ac.jp/~matsuura/>

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

松浦 徹 (Toru Matsuura)
北海道大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号：60534758