

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 30 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21340082

研究課題名（和文） 2層系量子ホール効果におけるジョセフソン・プラズマ共鳴の探索

研究課題名（英文） Search for the Josephson Plasmon Resonance in Bilayer Quantum Hall Effect

研究代表者

澤田 安樹（SAWADA ANJU）

京都大学・低温物質科学研究センター・教授

研究者番号：90115577

研究成果の概要（和文）：

ジョセフソン・プラズマ共鳴を観測するために、2層系独立コンタクト試料を準備し、ゲート電極からマイクロ波を加え、トンネリング電流の変化を調べる実験を行っている。しかし未だにプラズマ共鳴信号を検出できていない。測定装置の改良を行って今後も実験を継続する。本課題の周辺における量子ホール効果の研究も進め、ソリトン格子相、分数量子ホール状態の励起状態、核スピン偏極状態の異方性、核スピン偏極の拡散などの研究で成果を挙げた。

研究成果の概要（英文）：To observe Josephson plasma resonance, we prepared bilayer samples with electrically separated electrodes for each layer. With microwaves irradiation from the gate electrode, we attempted to measure changes in the tunneling current by plasma resonance. However, we have yet to detect the signal. We will improve the measurement system and continue to try to detect Josephson plasma resonance. Advancing research regarding the quantum Hall effect related to this subject, we obtained research results in achievement of the soliton lattice phase, the excited states of fractional quantum Hall effects, anisotropic nuclear polarization, and diffusion of nuclear polarization.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	6,300,000	1,890,000	8,190,000
2010年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2011年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性I

キーワード：量子ホール効果、2次元電子系、2層系、マイクロ波、ソリトン格子、磁気抵抗、ホール抵抗、マクロコヒーレンス

## 1. 研究開始当初の背景

電子と奇数本の磁束量子からなる複合粒子、複合ボソンを想定すると、量子ホール状態自身を複合ボソンのボース凝縮状態と考えることができる。しかし、量子ホール状態は粒子数の揺らぎのない状態であるため、不確定

性関係から位相の不確定性が無限大となり、マクロな位相は確定量とならない。その結果、超伝導体や超流動ヘリウムで観測される巨視的な位相の存在によって生じる超伝導性やジョセフソン効果などは期待できない。従って複合ボソン描像の正当性を明らかにす

ることは、量子凝縮系物理学の残された重要な課題の一つである。2次元電子系を2枚近接配置した2層系量子ホール状態は、層間のクーロン相互作用により2層の電子が互いに協力しあって新しい量子ホール状態を形成する。特に層間相互作用の強い場合、ランダウ準位占有率 $\nu = 1$ および2の量子ホール状態は2層の電子密度差を任意に変えても安定に存在する。この量子ホール状態では密度差の揺らぎが許されるので、位相差の揺らぎが有限となり、巨視的な位相差が観測量となる。その後トンネル実験やドラッグ実験が行われ、2層系 $\nu = 1$ 量子ホール状態では、巨視的量子コヒーレンスが存在すると信じられるようになりつつあった。我々は、2層系 $\nu = 1$ 量子ホール状態に面内磁場を加えることによって、面間の位相差を変える実験を行い、整合相と呼ばれる状態と非整合相と呼ばれる状態の間に、磁気抵抗の増加する新しい状態があることを見つけた。この新しい状態は、擬スピンのエネルギーを表すPokrovsky-Talapovの式から導出される非線形sine-Gordon方程式の解であるソリトン、すなわちソリトン格子相の性質として説明できた。

## 2. 研究の目的

2層系 $\nu = 1$ 量子ホール状態において、巨視的量子コヒーレンスが存在することは、実験的な検証が進められつつあるものの、まだまださまざまな解釈があり、十分検証されたとは言えない。巨視的量子コヒーレンスが存在することは、ACジョセフソン・プラズモン共鳴の観測により、決定的にする必要がある。ACジョセフソン・プラズモン共鳴現象の存在は、江澤らの理論により予想されている。本研究では、巨視的量子コヒーレンスの存在を、マイクロ波によるACジョセフソン・プラズモン共鳴の観測により、明らかにすることを目標とした。2層に独立にコンタクトが取れる試料を準備し、マイクロ波によるジョセフソン接合のトンネル電流の変化、すなわちシャピロ・ステップの観測をすることである。ACジョセフソン・プラズマ共鳴の観測には、2次元電子系のマイクロ波吸収を高感度に観測可能な磁気抵抗検出法が有望であると判断した。

## 3. 研究の方法

本研究は2層系量子ホール状態での層間のトンネリング電流のマイクロ波依存性を測定して、ACジョセフソン・プラズマ共鳴の観測を試みることである。先ずマイクロ波吸収が、ACジョセフソン・プラズモン共鳴であることを確認するためには、トンネリング・エネルギーの異なる試料をいくつか用意し、共鳴周波数に対する依

存性を確かめることが必要である。2層系の $\nu = 1$ 量子ホール状態を観測できるのは、電子移動度 $10^6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 以上の高移動度の試料に限られており、かつトンネリング・ギャップが非常に小さいものが必要で(数 $\mu\text{K} \sim \text{mK}$ )ある。試料を分子線エピタキシー装置を有するグループと共同で試料成長を行うことにした。

ジョセフソン・プラズマ共鳴が起こった際に、シャピロ・ステップを観測可能な、2層各層を独立にコンタクトを取れるデバイス化方法の開発を行うことにした。この場合、ゲート電極を利用して各層をピンチオフする手法を用いるので、特に基板を含む背面層のみにコンタクトを取るには、試料を薄くする必要がある。低温物質科学研究センター内にある、クラス100のクリーンルームを使って作業を行うことにした。

本研究に用いる希釈冷凍機は、最低到達温度6 mK、100 mKでの冷凍能力は $100 \mu\text{W}$ である。試料にマイクロ波を導入するため、高周波域まで小さな減衰でマイクロ波を伝送できる同軸ケーブルを室温部分より導入することにした。また、室温からの熱流入を防ぐため、超伝導同軸ケーブルで、室温からの低減衰同軸ケーブルを接続している。また、マイクロ波の照射強度を変更することなく試料の面内磁場を印加するため、超伝導磁石が設置されたデュワーを回転させる“ベアリング式回転機構”を独自に開発した。本方式により、試料に照射されるマイクロ波の強度分布を乱すことなく、試料に180度方向に渡って、面内磁場を印加できるようにし、デバイス化した試料を用いて、マイクロ波照射による2層系 $\nu = 1$ 量子ホール状態におけるトンネリング電流のACジョセフソン・プラズモン共鳴の観測を試みる。この測定により、新しい試料でのトランスポートに関する性質やトンネリング・ギャップ依存性、巨視的量子コヒーレンスに関連する新規な量子相の存在が明らかにできることを期待した。

## 4. 研究成果

トンネリング電流を測定できる独立コンタクトを持つ2層系試料を準備し、希釈冷凍機で冷やし、トンネリング電流のマイクロ波照射依存性を調べた。しかし現在のところ、ACジョセフソン・プラズモン共鳴に相当する信号は観測されていない。

本研究に関連する量子ホール効果の研究を行い、以下の研究成果を挙げた：A) 2層系 $\nu = 2/3$ 量子ホール状態で、総電子密度と電子密度差をパラメータとして活性化エネルギーの測定を行い、励起状態の異なる相を見つけた。厳密対角化法による計算を行い、励起状態を特定した(図1参照)；B) 量子ホー

ル状態  $\nu=2/3$  におけるスピン偏極度の異なる相間の転移に付随して起こる核スピン偏極の電流方向に対する面内磁場に対する異方性を発見した；C)  $\nu=2/3$  状態の相転移に付随して起きた核スピン偏極が他層へ拡散することを初めて観測した；D) 面内磁場を加えた2層系  $\nu=1$  量子ホール状態の活性化エネルギーの測定を行い、ソリトン格子相が存在することを発見した (図2参照)。

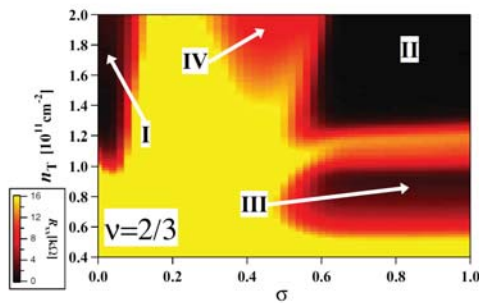


図1. 量子ホール状態  $\nu=2/3$  の活性化エネルギーの電子密度差依存性。

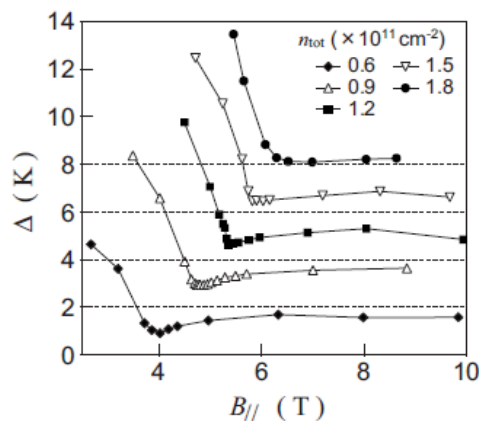


図2. 量子ホール状態  $\nu=1$  における活性化エネルギーの面内磁場依存性。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

- ① Excitation properties of  $\nu=2/3$  bilayer quantum Hall phases investigated by magnetotransport methods, Y.D. Zheng, A. Sawada, Z.F. Ezawa, T. Morikawa, A. Fukuda, D. Terasawa, S. Tsuda, M.H. Nguyen, Physical Review B. **83**, 235330/1-6(2011).  
DOI: 10.1103/PhysRevB.83.235330
- ② Comparison of the Magnetoresistance Hysteresis between Bilayer  $\nu=4/3$  and Monolayer  $\nu=2/3$  Quantum Hall States,

S. Tsuda, A. Fukuda, D. Terasawa, N. Minh-Hai, Y. Ogasawara, Y. D. Zheng, A. Sawada, J. Phys.: Conference Series **334**, 012027/1-4 (2011).

DOI: 10.1088/1742-6596/334/1/012027

- ③ Anisotropy of Magnetoresistance Hysteresis around the  $\nu=2/3$  Quantum Hall State in Tilted Magnetic Field, K. Iwata, M. Morino, A. Fukuda, N. Kumada, Z. F. Ezawa, Y. Hirayama, and A. Sawada, J. Phys. Soc. Japan of **79**, 123701/1-4(2010).  
DOI: 10.1143/JPSJ.79.123701

- ④ Activation study of collective excitations of the soliton-lattice phase in the  $\nu=1$  double-layer quantum Hall state, D. Terasawa, S. Kozumi, A. Fukuda, M. Morino, K. Iwata, N. Kumada, Y. Hirayama, Z. F. Ezawa, and A. Sawada, Phys. Rev. B **81**, 073303/1-4 (2010).  
DOI: 10.1103/PhysRevB.81.073303

- ⑤ Magnetotransport Study in the Layer Imbalanced  $\nu=1$  Bilayer Quantum Hall State, Y. Ogasawara, A. Fukuda, K. Iwata, T. Sekikawa, T. Arai, Y. Hirayama, Z. F. Ezawa and A. Sawada, J. Phys.: Conference Series **150**, 022068/1-4 (2009).  
DOI:10.1088/1742-6596/150/2/022068

- ⑥ Activation Study of the Pseudospin Soliton in the  $\nu=1$  Bilayer Quantum Hall Effect, A. Fukuda, D. Terasawa, M. Morino, K. Iwata, S. Kozumi, T. Sekikawa, Y. Ogasawara, T. Arai, N. Kumada, Y. Hirayama, Z. F. Ezawa and A. Sawada, J. Phys.: Conference Series **150**, 022012 (2009).

DOI:10.1088/1742-6596/150/2/022012

[学会発表] (計15件)

- ① 二層系  $\nu=1$  量子ホール状態における核スピン緩和時間の電子密度差依存性、津田是文、日本物理学会 (関西学院大学) 2012/3/27.
- ② 2層系  $\nu=1$  量子ホール状態における発現温度の異常、寺澤大樹、日本物理学会 (富山大学) 2011/9/24.
- ③ 2層  $\nu=2/3$  量子ホール状態における核スピン偏極の拡散、Nguyen Minh-Hai、日

本物理学会（富山大学）2011/9/24.

- ④ Anomalous behavior of the onset of the activated temperature in the bilayer  $\nu=1$  quantum Hall states with small tunneling energy, D. Terasawa, The 19th international conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (Tallahassee) 2011/7/25.
- ⑤ Investigation of Excitation Properties in the  $\nu=2/3$  Bilayer Quantum Hall Systems, Y. D. Zheng, The 19th international conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (Tallahassee) 2011/7/25.
- ⑥ Interlayer diffusion of nuclear spin polarization in the  $\nu=2/3$  quantum Hall States, S. Tsuda, The 19th international conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (Tallahassee) 2011/7/25.
- ⑦ Anisotropic nuclear spin relaxation and dynamic polarization rates in the  $\nu=2/3$  quantum Hall states, K. Iwata, 26th International Conference on Low Temperature Physics (Beijing) 2011/8/16.
- ⑧ Activated transport in the  $\nu=1$  bilayer quantum Hall states with small tunneling energy  $\Delta_{SAS} = 1$ , A. Fukuda, 26th International Conference on Low Temperature Physics (Beijing) 2011/8/16.
- ⑨ 二層系  $\nu=4/3$  量子ホール状態における核スピン緩和、津田是文、日本物理学会（新潟大学）2011/3/25。
- ⑩ 2層系量子ホール状態における核スピン制御の可能性、寺澤大樹、PASPS15（筑波大学）、2010/12/21.
- ⑪ 二層系  $\nu=4/3$  量子ホール状態におけるヒステリシスの観測、津田是文、日本物理学会（大阪府立大学）、2010/9/24.
- ⑫ 2層  $\nu=2/3$  量子ホール系の基底状態と励起エネルギーの観測、鄭仰東、日本物理学会（大阪府立大学）、2010/9/24.

⑬ Excited States of Spins and Pseudospins in the  $\nu=2/3$  Bilayer Quantum Hall Systems, Y. D. Zheng, 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (Seoul), 2010/7/29.

⑭ Effects of the In-plane Magnetic Fields on Excitations of the  $n=1/3$  Bilayer Quantum Hall States in the Vicinity of Single Layer Limit, A. Fukuda, 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (Seoul), 2010/7/29.

⑮ Activation Energy Gap of the Layer-Imbalanced Bilayer  $\nu=1/3$  Quantum Hall States, A. Fukuda, The 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (Kobe), 2009/7/22.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ltm.kyoto-u.ac.jp/teijigen/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

澤田 安樹 (SAWADA ANJU)

京都大学・低温物質科学研究センター・教授

研究者番号：90115577

### (2) 研究分担者

新井 敏一 (ARAI TOSHIKAZU)

京都大学・低温物質科学研究センター・助教

研究者番号：80333318

福田 昭 (FUKUDA AKIRA)

兵庫医科大学・医学部・准教授

研究者番号：70360633

江澤 潤一 (EZAWA JYUNICHI)

独立行政法人理化学研究所・岩崎先端中間子研究室・客員研究員

研究者番号：90133925