

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540319

研究課題名(和文) 2層系  $\nu = 1$  量子ホール状態におけるトンネル電流のマイクロ波依存性研究課題名(英文) Micro wave dependence of the tunneling current in the bilayer quantum Hall system at the total filling  $\nu = 1$ 

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・名誉教授

研究者番号：90115577

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：2層系量子ホール状態  $\nu = 1$  において、ジョセフソン効果に相当する現象が起こることを予測し、研究を推し進めた。臨界電流の計算を行い、実験データを説明した。ACジョセフソン効果の実験を行う予定であったが、試料に不具合があり、新しい試料を準備中である。この間に  $\nu = 2/3$  量子ホール状態で大電流を流すことで起こる抵抗増大状態の研究を進め、1) 抵抗増大状態は負の温度依存性を持つ、2) 直流では抵抗増大は起きない、3) ホール抵抗は抵抗増大状態においても量子化値を保っている、4) 充填率をずらして電流ポンプすると量子化値もシフトするなどの新しい知見を得た。この結果を用いて抵抗増大状態の新しいモデルを提案した。

研究成果の概要(英文)：We investigate Josephson tunneling in the bilayer quantum Hall system at the total filling  $\nu = 1$ . We show the existence of the critical current for the tunneling current to be coherent and dissipationless. Our results explain recent experiments. We were going to experiment on the AC Josephson effect, but the sample was defective, and we had to prepare a new sample. During this time, we went ahead with a study of the huge longitudinal resistance (HLR) state by increasing the electric current at the filling  $\nu = 2/3$  quantum Hall state. We obtained the following new experimental results: 1) the HLR state exhibits the negative temperature dependence; 2) the HLR state is formed by AC current, not by DC current; 3) the Hall resistance retains the plateau shape even in the HLR state; and 4) the Hall resistance value shifts depending on the filling value position of the current pumping. We construct a new model of the HLR state by using the new experimental results.

研究分野：半導体物理学

キーワード：量子ホール効果 複合ボソン ボース凝縮 巨視的コヒーレンス ジョセフソン効果 分数量子ホール効果 抵抗増大現象

## 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妥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。2層系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 (A. Sawada *et al.*, PRL 80, 4534 (1998)). 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る。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 (A. Fukuda *et al.*, PRL 100, 016801 (2008)). 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る。

## 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な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、まだ様々な解釈があり、実験的に十分検証されたとは言えない。ACジョセフソン効果の測定により巨視的量子コヒーレンスの存在を決定的にする必要がある。ACジョセフソン効果の存在は、江澤らの理論 (Z.F.Ezawa, and A. Iwazaki, Phys. Rev B 47, 7295 (1993).) により、予想されてい

る。本研究の申請期間、3年間の間に、マイクロ波によるACジョセフソン効果の測定を行い、巨視的量子コヒーレンスの存在を確かなものにする。この測定では、2層に独立に電極を接続をした試料が必要である。現在マックスプランク研究所との共同研究で、2層へ独立コンタクトした試料を用いてゼロバイアス・トンネル電流の臨界電流を測定しているため、この試料を実験に使用して電子密度をコントロールするゲートに40GHz程度のマイクロ波を加えることにより、ゼロバイアス・トンネル電流の変化(シャピロ・ステップ)の観測をする。更に試料を磁場に対して傾けて擬スピン・ソリトン格子相での測定を行う。ACジョセフソン効果の観測にはゼロバイアス・トンネル電流の測定が有効と考えられるが、その他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や、高いQ値を持つ空洞共振器や高感度なマイクロ波検出器も有効なので、平行して装置開発をしてマイクロ波の直接吸収実験も試みる。

## 3. 研究の方法

デバイス化されたトンネリング・エネルギーの小さな試料を用いて、マイクロ波による2層系  $\nu = 1$  量子ホール状態におけるACジョセフソン効果の測定を試みる。ACジョセフソン効果を観測するためには、ミリケルビン領域の温度環境と9テスラの磁場を必要とする。本研究においては、希釈冷凍機を用いて低温を得、9テスラ・スプリット横型超電導マグネットにより試料に磁場を加える。希釈冷凍機は、最低到達温度6mK, 100mKでの冷凍能力は100 $\mu$ 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した。希釈冷凍機セル内は、超伝導同軸ケーブルで、コンデンサーを介して電子密度コントロール・ゲートと接続する。試料には、試料前面層から電流  $I$  を注入し、背面層から排出させる。電流は抵抗間の電位を測ることにより計測でき、トンネル電流  $I_t$  は層間のバイパス電流  $I_b$  を差し引いた  $I - I_b$  より算出される。ゲートから加えたマイクロ波の効果により、臨界電流を越えた領域で  $eV = h$  を満たしたときに共鳴トンネル電流が流れる現象が期待される。更にこの現象を面内磁場を加えて行うために、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”を独自に開発して、マイクロ波の照射強度を変更することなく測定できるようにした。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、試料へ左右90度方向に渡って、磁場を傾けることができるようになる。また別な希釈冷凍機システムに試料を取り付け、磁気抵抗型共鳴検出法を用いてACジョセフソン効果の探索を行う。磁気抵抗型検出法は、2次元のような電子数の少ない場合においても、非常に高感度に観測を行える可能性がある。実際、初期的な段階ではあるが、2層2次元電子系試料のマイクロ波応答に対する磁気抵抗の変化が観測できている。次の段階として、空洞共振器を用いた、量子ホール効果試料のマイクロ波吸収の高感度測定も試みる。この場合には、高いQ値を持つ空洞共振器の開発や、高感度のマイクロ波検出器の開発が必須となってくる。

#### 4. 研究成果

- (1) 臨界電流の理論計算を行い、ドイツのグループが行った実験結果を説明した。(雑誌論文, )
- (2) 共同研究グループであるマックスプランク研究所から提供された試料の端子に不具合が見つかったので、再度作成を依頼した。
- (3)  $\nu=2/3$  の抵抗増大実験を行い、以下の新たな知見を得、抵抗増強状態の新しいモデルを提案した。
  - ・抵抗増強状態は図1あるように、負の温度依存性を持つ。(学会発表, )

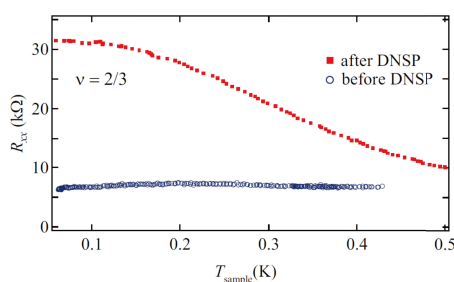


図1. 抵抗増大状態の温度依存性。赤は抵抗増大状態、青は参考のために図示した増大前の状態である。

- ・抵抗増強状態においてもホール抵抗は量子化値を保つ。(学会発表, )
- ・直流でポンプすると抵抗増強は起こらない。(学会発表, , , )
- ・充填率を変えてポンプすると、ホール抵

抗値がずれる。(学会発表, )

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計12件)

M.H. Nguyen, S. Tsuda, D. Terasawa, A. Fukuda, Y.D. Zheng, A. Sawada, Interlayer diffusion of nuclear spin polarization in  $\nu=2/3$  quantum Hall states, Phys. Rev. B, 89, 2014, 041403/1-5, 査読有

DOI: 10.1103/PhysRevB.89.041403

S. Tsuda, Minh-Hai Nguyen, D. Terasawa, A. Fukuda, Z. F. Ezawa, and A. Sawada, Nuclear spin relaxation in the SU(4) spin-pseudospin intertwined skyrmion regime in the  $\nu=1$  bilayer quantum Hall state, Phys. Rev. B, 88, 2013, 205103/1-5, 査読有

DOI: 10.1103/PhysRevB.88.205103

S. Yamanaka, A. Arai, A. Sawada, A. Fukuda, H. Yayama, Low Temperature Physics, 39, 2013, 842-850, 査読有

DOI: 10.1063/1.4823489

R. Nishinakagawa, K. Matsuda, T. Arai, A. Sawada and T. Terashima, Raman spectroscopy investigations of chemically derived zigzag edge graphene nanoribbons, AIP ADVANCES, 3, 2013, 092111/1-5. 査読有

DOI: 10.1063/1.4821281

Y.D. Zheng, A. Sawada, Z.F. Ezawa, Theoretical approach to ground states of the  $\nu=2/3$  bilayer fractional quantum Hall systems, Solid State Commun., 155, 2012, 82-87 査読有

DOI: 10.1016/j.ssc.2012.10.019

D. Terasawa, A. Fukuda, T. Morikawa, Y.D. Zheng, A. Sawada, Z.F. Ezawa, Onset temperature for the Kosterlitz-Thouless transition in the  $\nu_t=1$  bilayer quantum Hall state, Phys. Rev. B, 86, 2012, 165320/1-6. 査読有

DOI: 10.1103/PhysRevB.86.165320

S. Yamanaka, A. Arai, A. Sawada, A. Fukuda, H. Yayama, Incompressible

edge wave in classical two-dimensional electron liquid on helium surface, Europhys. Lett. 100, 2012, 2009/1-5 査読有  
DOI: 10.1209/5075/100/17009

Z.F. Ezawa, G. Tsitsishvili, A. Sawada, Interlayer phase coherence and Josephson effects in bilayer quantum Hall systems, European Physical Journal B, 85, 2012, 270/1-18. 査読有  
DOI: 10.1140/epjb/e2012-30026-2

Z.F. Ezawa, G. Tsitsishvili, A. Sawada, Josephson tunneling in bilayer quantum Hall system, Phys. Lett. A, 376, 2012, 2430-2434. 査読有  
DOI: 10.1016/j.physleta.2012.06.011

A. Fukuda, D. Terasawa, T. Morikawa, Y.D. Zheng, T. Arai, Z.F. Ezawa, A. Sawada, Activated transport in the bilayer quantum Hall states with small tunneling energy  $D(SAS)=1K$ , Journal of Physics Conference Series 400, 2012, 042008/1-4. 査読有  
DOI:10.1088/1742-6596/400/4/042008

K. Iwata, A. Fukuda, M. Morino, A. Sawada, Anisotropic nuclear spin relaxation and dynamic polarization rates in the  $\nu=2/3$  quantum Hall states, Journal of Physics Conference Series 400, 2012, 042022/1-4. 査読有  
DOI:10.1088/1742-6596/400/4/042022

#### [学会発表](計9件)

D. Terasawa, Resistance maxima and deviations from the quantized Hall value induced by dynamic nuclear polarization around  $\nu=2/3$ , 32<sup>nd</sup> ICPS, 10<sup>th</sup> Aug. 2014, Austin (USA).

A. Fukuda, DIRECT CURRENT NUCLEAR SPIN POLARIZATION IN THE FRACTIONAL QUANTUM HALL EFFECT, 27<sup>th</sup> LT, 6<sup>th</sup> Aug. 2014, Buenos Aires (Argentina).

津田 是文, 直流電流による量子ホール状態  $\nu=2/3$  の状態変化, 日本物理学会, 2013年9月25日, 徳島.

S. Tsuda, Anomalous electric transport induced by dynamic nuclear polarization, 20<sup>th</sup> EP2DS, Jul. 3<sup>rd</sup> 2013, Wroclaw (Poland).

S. Tsuda, Current Frequency Dependence of the Resistance Enhancement, 20<sup>th</sup> EP2DS, Jul. 3<sup>rd</sup> 2013, Wroclaw (Poland).

津田 是文, 量子ホール状態  $\nu=2/3$  における核スピン偏極による抵抗減少効果, 日本物理学会, 2013年3月27日, 広島.

津田 是文, 量子ホール状態  $\nu=2/3$  における磁気抵抗値の温度変化, 日本物理学会, 2012年9月20日, 横浜.

三谷 昌平, 量子ホール状態  $\nu=2/3$  付近における抵抗増大状態の充填率依存性, 日本物理学会, 2012年9月20日, 横浜.

## 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・名誉教授  
研究者番号: 90115577

### (2) 研究分担者

江澤 潤一 (EZAWA Jyunichi)  
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

### (3) 連携研究者

新井 敏一 (ARAI Toshikazu)  
東北工業大学・共通教育センター・准教授  
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

### (4) 研究協力者

津田 是文 (TSUDA Shibun)  
三谷 昌平 (MITANI Shohei)