

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 23 日現在

機関番号：34519

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540331

研究課題名(和文) 2層量子ホール系における動的コステリッツ - サウレス転移の研究

研究課題名(英文) Research of the dynamic Kosterlitz-Thouless phase transition in bilayer quantum Hall states

研究代表者

福田 昭 (Fukuda, Akira)

兵庫医科大学・医学部・准教授

研究者番号：70360633

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：2層系  $\nu = 1$  量子ホール状態は、巨視的なコヒーレンスを持つ擬スピンのX-Yモデルで記述され、半量子渦対の結合-乖離で引き起こされる2次元超流動転移であるKosterlitz-Thouless(K-T)転移が予想されている。本研究では、高移動度GaAs半導体試料を用いて、2層系  $\nu = 1$  量子ホール状態において、量子ホール状態発現温度測定を行い、半量子渦対乖離温度とは深く関連していることが分かった。また、 $\nu = 2/3$  分数量子ホール状態における動的核スピン偏極を用いて、さまざまな電子密度差の2層系  $\nu = 1$  量子ホール状態における核スピン緩和時間を測定し、SU(4)スカームオンが存在する可能性を示唆した。

研究成果の概要(英文)：Bilayer  $\nu = 1$  quantum Hall state (QHS) is described by the X-Y model of pseudospins with macroscopic quantum coherence. Kosterlitz-Thouless (K-T) phase transition is expected to occur by the dissociation and recombination of half-quantized vortices. In this study, we observe the onset temperature  $T_C$  of QHS in the bilayer  $\nu = 1$  QHS using high-mobility GaAs semiconductor samples. Results indicate that  $T_C$  is significantly related to the K-T temperature. We also measure the relaxation time of nuclear spins in the bilayer  $\nu = 1$  QHS by means of dynamic nuclear polarization in the  $\nu = 2/3$  QHS. Consequently we indicate the existence of the SU(4) skyrmions.

研究分野：低温・半導体物理学

キーワード：量子ホール効果 2層系 K-T転移 擬スピン 半量子渦対 グラフェン

1. 研究開始当初の背景

(1) 半導体ヘテロ界面に形成される2次元電子系は、超低温・高磁場下において、量子ホール効果と呼ばれる特異な量子輸送現象を示す。2次元電子面を2枚近接配置した2層2次元電子系においては、層の自由度(擬スピン)が加わることにより、単層の量子ホール効果に加えて、新しい量子現象が出現することが期待される。

(2) 2層2次元電子系では、層間で各層の数密度が揺らぐことにより、2層系 = 1量子ホール状態においては、巨視的な量子位相及び超流動性を獲得できる可能性がある。

(3) 2層系ランダウ準位占有率 = 1量子ホール状態に面内磁場を印加していくと、整合・非整合相転移とよばれる電子の位相差が変化することによる相転移を起こすことが知られており、その2つの相の間に擬スピンのドメイン構造を形成したソリトン格子相が存在することを明らかにしていた。

2. 研究の目的

(1) 2層系 = 1量子ホール状態は、巨視的なコヒーレンスを持つ擬スピンのX-Yモデルで記述され、半量子渦対の結合・乖離で引き起こされる2次元超流動転移であるKosterlitz-Thouless(K-T)転移が予想されている。

(2) 2層系 = 1量子ホール状態におけるK-T転移のダイナミクスや発現機構を、電気伝導測定や、マイクロ波を用いて解明することである。具体的には、電流-電圧特性の測定や、マイクロ波によって渦対の運動が制限されることによる動的K-T転移の観測を、磁気抵抗の周波数・温度依存性を測定することによって明らかにする。

(3) 近年話題となっている量子凝縮系における半量子渦や、スピン自由度と擬スピン自由度とが相互に交錯したSU(4)スカーミオンの存在など、新たな量子現象の解明につながることを期待される。

(4) 高移動度 GaAs 半導体試料だけでなく、Dirac 電子系であるグラフェンを用いても、上記現象の検出を目指す。

3. 研究の方法

(1) 兵庫医科大学において超低温・強磁場実験環境の整備を行う。

(2) 京都大学・低温物質科学研究センターにおいて、トンネリング・エネルギーの小さい2層系半導体試料のホールパー構造のデバイス化を行う。

(3) 京都大学・低温物質科学研究センターにおいて、2層系試料におけるスピン自由度との関連を調べるため、動的核スピン偏極を用いた2層系試料の核スピン緩和時間や抵抗増強状態の量子輸送現象測定を行う。

(4) 大阪大学・産業科学研究所と協力して、単層および2層のグラフェンの剥離法による試料作成を行う。

(5) 理化学研究所と共同で、量子ホール状態におけるK-T転移に関する理論的解析を行う。

4. 研究成果

(1) 2層系 = 1量子ホール状態において、量子ホール状態発現温度  $T_C$  の測定を行った。その結果、 $T_C$  と半量子渦対乖離温度  $T_{KT}$  とは深く関連していることが分かった(図1)。

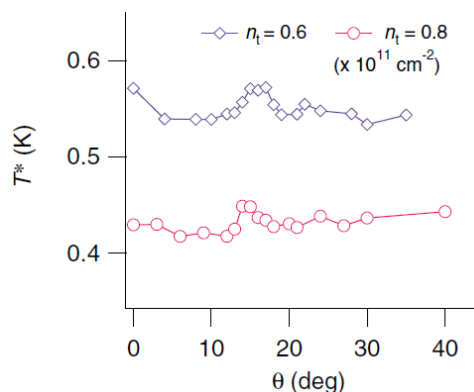


図1 量子ホール状態発現温度  $T^*$  の試料回転角 依存性

(2) = 2/3 分数量子ホール状態における動的核スピン偏極(DNP)を用いて、さまざまな電子密度差の2層系 = 1量子ホール状態における核スピン緩和時間を測定した(図2)。その結果、SU(4)スカーミオンが存在する可能性が強くなった。

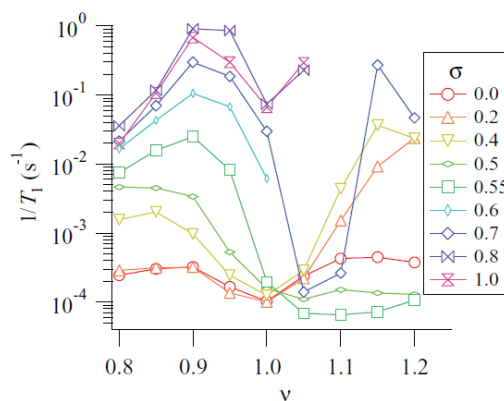


図2 2層系 = 1量子ホール状態付近で様々な電子密度差 に対する核スピン緩和時間  $T_1$  のランダウ準位占有率 依存性

(3) 高移動度を持つ2層2次元電子系を用いて、一方の層から他方の層への核スピン拡散の実験を行い、核スピン拡散係数を決定した。

(4) グラフェンにおいても層間距離を制御した2層2次元電子系を作成する準備を開始した。その準備段階として、グラフェンにおける弱局在効果が、普遍的伝導度揺らぎに関連する抵抗振動と深く関連していることが分かった。

(5) 表面を分子修飾したグラフェン試料を用いて、電子輸送にどのような影響があるか調べた。その結果、抵抗振動と関連して、分子吸着による抵抗変化が大きく影響されることが分かった。

#### 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 11 件)

A. Fukuda, D. Terasawa, Y. Ohno and K. Matsumoto, Effect of the Inert Gas Adsorption on the Bilayer Graphene to the Localized Electron Magnetotransport, J. Phys.: Conf. Ser., 査読有, 568, 2014, 52009 1-7, DOI: 10.1088/1742-6596/568/5/052009.

Y Fujii, S Mitsudo, K Morimoto, T Mizusaki, M Gwak, SG Lee, A. Fukuda, A Matsubara, T Ueno and S Lee, High-frequency ESR measurements and ESR/NMR double resonance experiments of lightly phosphorous-doped silicon, J. Phys.: Conf. Ser., 査読有, 568, 2014, 42005 1-5, DOI: 10.1088/1742-6596/568/4/042005.

Minh-Hai Nguyen, Shibun Tsuda, Daiju Terasawa, Akira Fukuda, Yangdong Zheng, and Anju Sawada, Interlayer Diffusion of Nuclear Spin Polarization in  $\nu=2/3$  Quantum Hall States, Physical Review B, 査読有, 89, 2014, 041403(R) 1-5, DOI: 10.1103/PhysRevB.89.041403.

S. Tsuda, D. Terasawa, M. H. Nguyen, A. Fukuda, Y. D. Zheng, T. Arai, A. Sawada and Z. F. Ezawa, Spin-Pseudospin Intertwined Excitation at the  $\nu=1$  Bilayer Quantum Hall State Investigated by Nuclear-Spin Relaxation, AIP Conf. Proc., 査読有, 1566, 2013, 269-270, DOI: 10.1063/1.4848389.

S. Tsuda, M. H. Nguyen, D. Terasawa, A. Fukuda, Y. D. Zheng, T. Arai and A. Sawada, Interlayer Transport of the Nuclear Spin Polarization in  $\nu=2/3$  Quantum Hall States, AIP Conf. Proc., 査読有, 1566, 2013, 293-294, DOI: 10.1063/1.4848401.

S. Tsuda, M. H. 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, Physical Review B, 査読有, 88, 2013, 205103 1-5, DOI: 10.1103/PhysRevB.88.205103.

A. Fukuda, D. Terasawa, T. Morikawa, Y. D. Zheng, T. Arai, Z. F. Ezawa and A. Sawada, Activated transport in the  $\nu=1$  bilayer quantum Hall states with small tunneling energy  $SAS=1$  K, J. Phys.: Conf. Ser., 査読有, 400, 2012, 42008 1-4, DOI: 10.1088/1742-6596/400/4/042008.

K. Iwata, A. Fukuda, M. Morino, and A.

Sawada, Anisotropic nuclear spin relaxation and dynamic polarization rates in the  $\nu=2/3$  quantum Hall states, J. Phys.: Conf. Ser., 査読有, 400, 2012, 42022 1-4, DOI: 10.1088/1742-6596/400/4/042022.

T. Arai, S. Yamanaka, H. Yayama, A. Sawada, and A. Fukuda, Linewidth Broadening in Edge-magnetoplasmon Resonance of Helium Surface State Electrons, J. Phys.: Conf. Ser., 査読有, 400, 2012, 42001 1-4, DOI: 10.1088/1742-6596/400/4/042001.

D. Terasawa, A. Fukuda, T. Morikawa, Y. D. Zheng, A. Sawada, and Z. F. Ezawa, Onset temperature for the Kosterlitz-Thouless transition in the  $\nu=1$  bilayer quantum Hall state, Phys. Rev. B, 査読有, 86, 2012, 165320 1-6, DOI: 10.1103/PhysRevB.86.165320.

S. Yamanaka, T. Arai, A. Sawada, A. Fukuda and H. Yayama, Incompressible edge wave in classical two-dimensional electron liquid on helium surface, Europhys. Lett., 査読有, 100, 2012, 17009 1-5, DOI: 10.1209/0295-5075/100/17009.

[学会発表](計 24 件)

寺澤大樹, 福田昭, 藤元章, 大野恭秀, 松本和彦, グラフェンにおける抵抗振動と弱局在効果との関係, 日本物理学会第70回年次大会, 2015年03月21日~2015年03月24日, 早稲田大学(東京都).

A. Fukuda, S. Tsuda, D. Terasawa, A. Sawada, Low Frequency Dynamics of the Chiral Edge Domains in the Fractional Quantum Hall State, International Conference on Topological Quantum Phenomena(TQP2014), 2014年12月16日~2014年12月20日, Kyoto University (Kyoto).

D. Terasawa, S. Tsuda, S. Mitani, Minh Hai N., A. Fukuda and A. Sawada, Resistance maxima and deviations from the quantized Hall value induced by dynamic nuclear polarization around  $\nu=2/3$ , 32nd International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2014), 2014年08月10日~2014年08月15日, Austin(アメリカ).

A. Fukuda, S. Tsuda, D. Terasawa and A. Sawada, Direct Current Nuclear Spin Polarization in the Fractional Quantum Hall Effect, 27th International Conference on Low Temperature Physics (LT27), 2014年08月06日~2014年08月13日, Buenos Aires(アルゼンチン).

A. Fukuda, D. Terasawa, Y. Ohno and K. Matsumoto, Effect of the Inert Gas Adsorption on the Bilayer Graphene to the Localized Electron Magnetotransport, 27th International Conference on Low Temperature Physics (LT27), 2014年08月06日~2014年08月13日, Buenos Aires(アルゼンチン).

寺澤大樹, 福田昭, 大野恭秀, 松本和彦,

2層グラフェンの磁気抵抗値の4He吸着による変化, 日本物理学会 第69回年次大会, 2014年03月27日~2014年03月30日, 東海大学(神奈川県).

Minh-Hai Nguyen, 寺澤大樹, 津田是文, 福田昭, 澤田安樹, 2層系量子ホール状態における層間核スピン輸送, 第18回半導体スピニ工学の基礎と応用(PASPS-18), 2013年12月09日~2013年12月10日, 大阪大学(大阪府).

寺澤大樹, 福田昭, 大野恭秀, 松本和彦, 2層グラフェンの低温における磁気抵抗の振動と弱局在効果, 日本物理学会2013年秋季大会, 2013年09月25日~2013年09月28日, 徳島大学(徳島県).

津田是文, 三谷昌平, Nguyen Minh-Hai, 寺澤大樹, 福田昭, 澤田安樹, 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年秋季大会, 2013年09月25日~2013年09月28日, 徳島大学(徳島県).

D. Terasawa, S. Tsuda, A. Fukuda, and A. Sawada, Spin relaxations in SU(4) Skyrmions in the bilayer quantum Hall system, International Workshop for Young Researchers on Topological Quantum Phenomena in Condensed Matter with Broken Symmetries 2013, 2013年10月22日~2013年10月26日, Moon Ocean Ginowan Hotel (Okinawa).

A. Fukuda, D. Terasawa, T. Morikawa, Y. D. Zheng, and A. Sawada, Kosterlitz-Thouless-type pseudospin transition in the  $\nu=1$  bilayer quantum Hall state, International Workshop for Young Researchers on Topological Quantum Phenomena in Condensed Matter with Broken Symmetries 2013, 2013年10月22日~2013年10月26日, Moon Ocean Ginowan Hotel (Okinawa).

S. Tsuda, S. Mitani, M. H. Nguyen, A. Fukuda, D. Terasawa, and A. Sawada, Phase Transition from Quantum Hall State to Insulator State Evoked from Nuclear Polarization by Current Pumping, Collaborative Conference on 3D and Materials Research (CC3DMR2013), 2013年06月24日~2013年06月28日, Jeju, Korea.

S. Tsuda, D. Terasawa, S. Mitani, Minh Hai N., A. Fukuda, and A. Sawada, Anomalous electric transport induced by dynamic nuclear polarization at the vicinity of  $\nu=2/3$  quantum Hall state, 20th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-20), 2013年07月01日~2013年07月05日, Wroclow (Poland).

S. Tsuda, A. Fukuda, M. H. Nguyen, D. Terasawa and A. Sawada, Insulating Phase in the Dynamically Nuclear Spin Polarized  $\nu=2/3$  Quantum Hall State, 20th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-20), 2013年07月01日~2013年07月05日, Wroclow

(Poland).

S. Tsuda, A. Fukuda, S. Mitani, Minh Hai N., D. Terasawa and A. Sawada, Current Frequency Dependence of the Resistance Enhancement in the  $\nu=2/3$  Quantum Hall State, 20th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-20), 2013年07月01日~2013年07月05日, Wroclow (Poland).

D. Terasawa, A. Fukuda, Y. Ohno, and K. Matsumoto, Transition from weak localization to strong localization regime in the bilayer graphene, 20th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-20), 2013年07月01日~2013年07月05日, Wroclow (Poland).

A. Fukuda, D. Terasawa, Y. Ohno and K. Matsumoto, Magnetotransport of the 4He-Adsorbed Bilayer Graphene, 20th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-20), 2013年07月01日~2013年07月05日, Wroclow (Poland).

津田是文, 三谷昌平, Nguyen Minh-Hai, 寺澤大樹, 福田昭, 澤田安樹, 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 第68回年次大会, 2013年03月26日~2013年03月29日, 広島大学(広島県).

津田是文, 福田昭, 寺澤大樹, Nguyen Minh-Hai, 三谷昌平, 澤田安樹,  $\nu=2/3$  量子ホール系での動的核スピン偏極におけるドメイン形成ダイナミクス, 第17回半導体スピニ工学の基礎と応用(PASPS-17), 2012年12月19日~2012年12月20日, 九州大学(福岡県).

三谷昌平, 津田是文, Nguyen Minh-Hai, 寺澤大樹, 福田昭, 澤田安樹, 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年秋季大会, 2012年09月18日~2012年09月21日, 横浜国立大学(神奈川県).

21 津田是文, Nguyen Minh-Hai, 福田昭, 寺澤大樹, 澤田安樹, 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年秋季大会, 2012年09月18日~2012年09月21日, 横浜国立大学(神奈川県).

22 S. Tsuda, M. H. Nguyen, D. Terasawa, A. Fukuda, Y. D. Zheng, T. Arai and A. Sawada, Interlayer Transport of the Nuclear Spin Polarization in the  $\nu=2/3$  Quantum Hall States, 31st International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2012), 2012年07月29日~2012年08月03日, Zurich (Switzerland).

23 S. Tsuda, D. Terasawa, M. H. Nguyen, A. Fukuda, Y. D. Zheng, T. Arai, A. Sawada and Z. F. Ezawa, Spin-Pseudospin Intertwined Excitation at  $\nu=1$  Bilayer Quantum Hall State Investigated by the Nuclear-Spin Relaxation, 31st International Conference on the Physics of

Semiconductors (ICPS 2012), 2012年07月29日～2012年08月03日, Zurich (Switzerland).

<sup>24</sup> S. Tsuda, A. Fukuda, M. H. Nguyen, D. Terasawa, Y. D. Zheng, T. Arai and A. Sawada, Enhancement of the nuclear spin relaxation rate by the irradiation of rf in the quantum Hall state, The 20th International Conference on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics (HMF-20), 2012年07月22日～2012年07月27日, Chamonix Mont-Blanc (France).

〔その他〕

ホームページ等

兵庫医科大学 物理学

<http://www.hyo-med.ac.jp/faculty/course/physics.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

福田 昭 (Fukuda, Akira)

兵庫医科大学・医学部・准教授

研究者番号：70360633

### (2) 研究分担者

寺澤 大樹 (Terasawa, Daiju)

兵庫医科大学・医学部・助教

研究者番号：90589839

### (3) 連携研究者

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

江澤 潤一 (Ezawa, Junichi)

独立行政法人理化学研究所・客員研究員

研究者番号：90133925