

## 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 4 月 1 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2009～2011

課題番号：21241024

研究課題名（和文）半導体ナノ構造中の集団核スピンエンタングルメントを用いた集団量子情報処理

研究課題名（英文）Collective quantum information processes using quantum entanglement of ensemble nuclear spins in semiconductor nanostructures

研究代表者

遊佐 剛（Yusa Go）

東北大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：40393813

研究成果の概要（和文）：

本研究の目的はナノ構造に存在する核スピンや電子スピン、励起子などの集団量子に対し、量子力学的な測定を行い、通常の量子ビットで用いられている 2 準位系とは異なる集団性を生かした量子情報処理の実現を目指すものである。本研究期間では核スピンの局所検出法、量子ホール系のエッジチャンネルを用いた量子情報処理の理論提案と検証、荷電励起子状態の分光測定を通じた多電子系の実空間観察など幅広い領域に渡る成果が得られた。

研究成果の概要（英文）：

This research project aims for new quantum information processing based on collective quantum systems. During the project term, we obtained a wide variety of results: A proposal of a method to access nuclear spin information in a microscopic region, a proposal and theoretical verification of a new quantum protocol termed quantum energy teleportation using quantum Hall edge channels, real-space imaging of the quantum Hall systems.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
平成 21 年度	26,400,000	7,920,000	34,320,000
平成 22 年度	6,100,000	1,830,000	7,930,000
平成 23 年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
年度			
年度			
総計	37,100,000	11,130,000	48,230,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学・ナノ構造科学

キーワード：量子情報、ナノ科学

## 1. 研究開始当初の背景

量子力学的な重ね合わせ状態と、それらが量子力学的にもつれた状態を利用して、量子計算を実現する試みが、さまざまな系で研究されていた。もともと量子力学は、電子一個、原子一個などのミクロな振る舞いを理解するための学問であり、超伝導状態やボーズ凝

縮など特殊な場合を除けば、マクロな数の粒子系で量子力学的な効果が顕著に表れることは希である。そのため、従来は電子一個、原子一個、といった単一量子でなければ量子情報には利用できないのではないかと考えられていた。しかし、 $10^{8-12}$  個程度といった、通常では量子的とは考えられない数の冷却原子の集団をいわば 1 量子ビットとする理論

提案が 2001 年の Duan, Lukin, Cirac, Zoller や(DLCZ 法)、Julsgaard らによって行われて以来[1,2]、量子の集団を量子情報に応用しようとする研究が量子光学や量子エレクトロニクスの分野で活発になってきている。

## 2. 研究の目的

冷却原子集団で多量子ビットを目指すには、 $\text{cm} \sim \text{m}$  サイズの真空チャンバーを並べなければならないが、固体でしかもナノ構造で集団的な量子を扱うことが出来れば、集積化やデバイス化に非常に有利である。固体では、さまざまな相互作用があり、一般的に量子光学で現れるような純粋な物理現象が発現しにくい。しかし、固体を構成している原子がもつ原子核スピンは、外界との相互作用が極めて弱いため、理想的な系を実現することが出来る。本研究では申請者のこれまでの成果に量子光学の思想を取り込み、固体における新たな量子情報の分野を開拓することを目的とした。

## 3. 研究の方法

本研究では大きく分けて三つの研究を進めた。まず核スピン量子ビットを集積した際に必要となる核スピンの局所検出法の確立である。次に、量子ホール状態を量子情報系に応用するために必要な知見を得るため、光学的手法という新たな方法を導入して量子ホール状態の実空間観察を行うというものである。三つ目が量子ホール状態の端状態に表れるエッジチャンネルを多体系のエンタングルチャンネルとして利用し、量子エネルギーテレポーテーションと呼ばれる新たな量子プロトコルの実証を目指した研究である。これら量子ホール状態の基礎的な物性物理の観点も含め、量子プロトコルの検証という多岐にわたった領域で研究を進めた。

## 4. 研究成果

まず核スピンの局所検出法について述べる。通常の磁気共鳴イメージング(MRI)は、磁場中の横磁化が作り出す電磁誘導をピックアップコイルで検出する方法で、医療機器

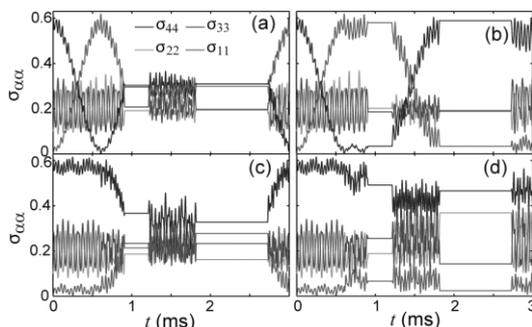


図 1. 4 つの典型的な空間の場所における核スピン密度行列  $\sigma$  の対角要素の時間発展。

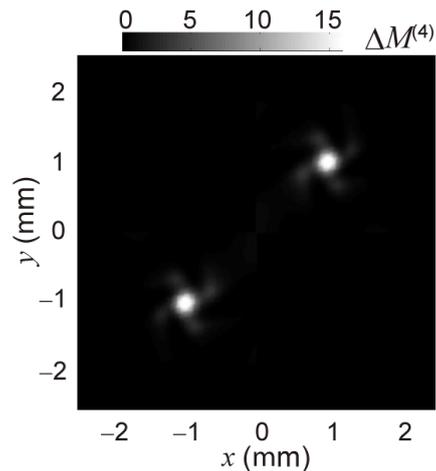


図 2 磁気イメージング法による核スピンの空間分布図

を始め幅広い分野で利用されている。しかし、通常の NMR は検出感度が低いため、 $\mu\text{m}$  程度のマイクロな領域を観察することは困難である。そのため、本研究では空間的な走査が不要な局所領域の核スピン検出法の確立を行った。最適化した試料に対し、本研究で特許を取得したパルス列を印加すると、空間の代表的な 4 点では核スピン密度行列が図 1 のように時間発展することが数値計算によって検証された。このパルス列の RF 成分の周波数を変化させると、共鳴点が空間的に移動するため、機械的に試料を動かすことなく、局所領域の核スピンの検出が可能で、可視化することが可能である(図 2)。この手法は縦磁化を検出する NMR であれば、検出法の詳細には依存しないため、マイクロ領域を検出する MRI 手法としても重要であると考えられる。

次に光学的手法による量子ホール状態の実空間観察について述べる。通常電気測定は、量子ホール系を探索する手法として広く用いられているが、電気測定は試料全体の抵抗を測定しているため、局所領域の物性を探索するには不向きである。本研究では量子ホール効果を量子情報へ応用するために、量子ホール状態の物性的な理解を進める研究を行った。量子ホール状態にある二次元電子系に光を照射した時の荷電励起子と呼ばれる基底状態の発光を分光することで光学的に量子ホール状態を探索することができる。試料は井戸幅が  $18 \text{ nm}$  幅 GaAs/AlGaAs 量子井戸を用いた。希釈冷凍機の極低温部に光学素子を設置して、回折限界に近い  $1 \mu\text{m}$  以下の領域の発光スペクトルを取得できる装置を開発した。本研究では分数量子ホール状態に注目し、基底状態が完全スピン偏極している量子ホール状態が、空間的にどのように形成されていくか調べた。ランダウレベル占有率が  $2/5$  では、図 3(a)に示すように、非圧縮量子液体が試料のほぼ全面を覆っているのに

対し、 $\nu$ を  $2/5$  から僅かにずらすと、図 3(b) に示すように、非圧縮と圧縮の液体状態が共存している様子が明らかになった。さらに、スピン偏極相と非偏極相が縮退している特殊な量子ホール状態(7.5Tにおける $\nu=2/3$ )では、スピン偏極相と非偏極相の間の交換相互作用が顕著になるため、自発的に長距離秩序を発現している様子が明らかになった。分数量子ホール状態の実空間観察に成功した例はこれまでになく、本研究で得られた像は物性物理の分野で極めて重要な成果であると言える。

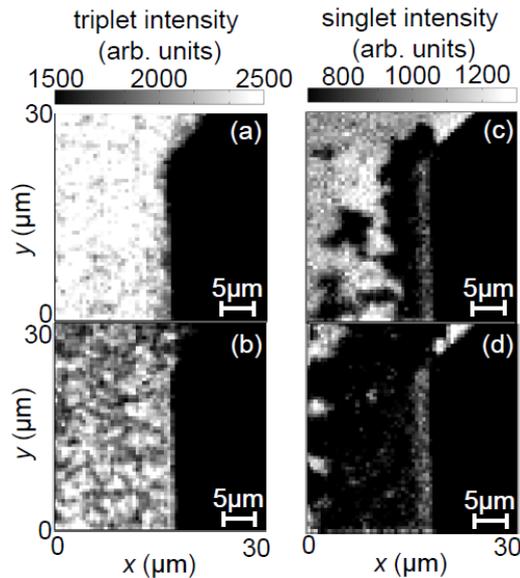


図 3. 本研究で開発した走査型偏光顕微分光顕微鏡による分数量子ホール状態の実空間観察像。(a)  $\nu=2/5$ , (b)  $\nu=0.41$ , 7 T, (c)  $\nu=0.668$ , (d)  $\nu=0.666$ , 7.5 T.

最後に量子ホール状態の端に表れるエッジチャンネルが持つ次元性とカイラリティーを利用した新しい量子プロトコルの検証実験の提案について述べる。ある物理系が基底状態=真空状態にあるとき、零点振動が存在しゼロ点エネルギーが存在する。しかし、このエネルギーを取り出すことはできず、ゼロ点振動を観測すると必ず観測によって系にエネルギーを注入してしまう。仮にエネルギーが取り出せたとしても、基底状態よりエネルギーが低い状態が存在することになり、明らかに定義に矛盾が生じるからである。これは真空状態の *passivity* と呼ばれている。しかし、この真空状態に部分系 A, B を定義し、部分系 A で局所測定を行って古典チャンネルで測定結果を部分系 B に送り、測定結果に応じたユニタリー変換を部分系 B で行うと、基底状態にある部分系 B からエネルギーを取り出せるという量子プロトコルが堀田によって提案された。エネルギーを担うキャリアを A から B に輸送するわけでも、古典情報が

エネルギーを運ぶわけでもないので、このプロトコルは量子テレポーテーション(QET)と呼ばれている。QETは数学的に証明されているものの、実際の物理系で実現可能なものなのか、取り出せるエネルギーがどれくらいかは分かっていない。本研究では、QETを検証するためにエッジチャンネルを用いた。具体的な実験系を図4に示す。基底状態にあるエッジチャンネルSの進行方向にゲート電極を設置することで部分系Aを定義し、スイッチと反転増幅器を介して局所操作用に用意された別のエッジチャンネルP上の点Gに接続する。

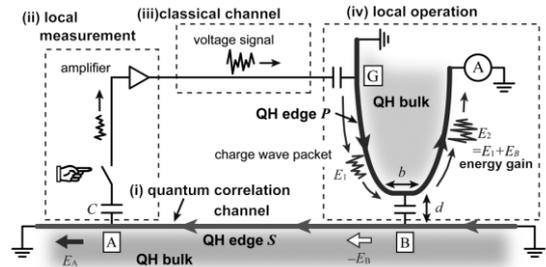


図 4. 量子ホール系で量子エネルギープロトコルを実証するための実験系の模式図。

点Gでは点Aでの測定結果が反映された磁気プラズモン(エッジチャンネルの励起状態)の packets が生成され、点BでエッジチャンネルSと相互作用する。もし生成される packets が、点Aでの測定結果に無関係に生成された場合は、真空準位の *passivity* のため相互作用後に packets が持っているエネルギー  $E_2$  の期待値は、相互作用前に持っていたエネルギー  $E_1$  の期待値に比べて減少する(*passivity*)。しかし、図4のように測定結果を点Bにフィードバックすると、 $E_2$  が  $E_1$  に比べて増加するというのが QET である。理論計算により点Aで測定した際に系に注入されるエネルギー  $E_A$  は  $\sim 1$  meV 程度、点BでSから packets が取得できるエネルギー  $E_B$  は  $\sim 0.1$  meV 程度と見積もることができた。エッジチャンネルの進行方向は磁場の印加方向で決定されるため、図の場合エッジチャンネルS上の電荷は右から左へ、エッジチャンネルP上の電荷は左から右へと流れる。したがって、エネルギーがAからBに逆向きに流れることはなく、逆にSがPに与えられた  $-E_B$  や、 $E_A$  は左側のみへ進行するため、点Bでは常に新たな基底状態が生成される。 $E_B$  は  $E_A$  よりも大きくなることはなく、エネルギー保存則は常に満たされる。 $E_A$  の観測の際に注入されるエネルギーの源はスイッチをオンにする動作によってもたらされており、1回のスイッチのオンオフで一つの packets が生成され  $E_B$  を1回の測定する。これを統計平均した値が正になることで、真空状態にある部分系Bからエネルギーが取り出せたことになる。実際の測定は本研究期間中に行うことは出来なかったが、多体量子

系を使った量子プロトコルの検証という意味で画期的な成果であると考えられる。

#### 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 3 件)

① G. Yusa, W. Izumida, M. Hotta, Passivity breaking of a local vacuum state in a quantum Hall system, *Quantum-ph*, arXiv:1101.2766v1-1, 4 (2011). 査読無

② G. Yusa, W. Izumida, M. Hotta, Quantum energy teleportation in a quantum Hall system, *Phys. Rev. A* 84, 032336-1, 6 (2011). 査読有

③ T. Kawamura, G. Yusa, Imaging of multinuclear spin system ( $I > 1/2$ ) in semiconductor microstructures using longitudinal-magnetization-detection nuclear magnetic resonance, *Applied Physics Letters*, 97 112108-1, 3 (2010) 査読有

[学会発表] (計 12 件) (うち招待講演 4 件)

① 早川純一郎、村木康二、遊佐剛 分数量子ホール状態の実空間観察 日本物理学会67回年次大会 2012年3月27日 関西学院大学、西宮

② 遊佐剛 量子ホール系と核スピン 第181回日本磁気学会研究会 2011年12月7日 お茶の水 東京 (招待講演)

③ G. Yusa, W. Izumida, M. Hotta, Passivity breaking in the quantum Hall system, The 19th international conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS) 2011年7月26日タラハシー アメリカ

④ 早川純一郎、村木康二、遊佐剛  $\nu = 2/3$  スピン相転移近傍での円偏光顕微フोटルミネッセンス 日本物理学会 66 回年次大会 2011年3月25日 新潟大学 新潟

⑤ T. Kawamura, G. Yusa, Imaging method for microscopic multi-nuclear spin systems ( $I > 1/2$ ) using longitudinal-magnetization-detection nuclear magnetic resonance, International Symposium on Nanoscale Transport and Technology 2011年1月12日 NTT物性基礎研究所 厚木

⑥ J. Hayakawa, K. Muraki, G. Yusa, Optical studies of the spin-phase transition in the  $\nu = 2/3$  fractional quantum Hall state, International Symposium on Nanoscale Transport and Technology 2011年1月14日 NTT物性基礎研究所

⑦ 遊佐剛 Trionと量子ホール系の分光 日本物理学会2010年春季大会シンポジウム 2010年3月21日 岡山大学 岡山 (招待講演)

⑧ 早川純一郎他  $\nu = 2/3$  スピン相転移の顕微フोटルミネッセンス 日本物理学会2010年春季大会2010年3月20日 岡山大学 岡山

⑨ J. Hayakawa 他, Micro-photoluminescence around spin phase transition of  $\nu = 2/3$  fractional quantum Hall regime The 2nd GCOE International Symposium on "Weaving Science Web beyond Particle-Matter Hierarchy" 2010年2月19日東北大学 仙台

⑩ G. Yusa Electrically controlled quantum coherence of nuclear spins in GaAs point contacts IVth International Workshop on the Physics of Semiconductor Devices 2009年12月17日デリー、インド (招待講演)

⑪ T. Kawamura, G. Yusa Local nuclear spin detection using unconventional nuclear magnetic resonance, RIEC-CNSI Workshop on Nanoelectronics, Spintronics and Photonics 2009年10月22日 東北大学 仙台

⑫ 遊佐剛 Trion と量子ホール系の分光半導体における動的相関電子系の光科学第2回シンポジウム 2009年8月21日 京都大学 京都 (招待講演)

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

①名称: 分光計測装置  
発明者: 村木康二、早川純一郎、遊佐剛  
権利者: 日本電信電話(株)  
種類: 特許  
番号: 特願 2011-221545  
出願年月日: 2011年10月6日  
国内外の別: 国内

②名称: 分光計測装置  
発明者: 村木康二、早川純一郎、遊佐剛  
権利者: 日本電信電話(株)  
種類: 特許  
番号: 特願 2010-223607  
出願年月日: 2010年10月1日  
国内外の別: 国内

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

遊佐剛 (GO YUSA)  
東北大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号: 40393813

(2) 研究分担者

( )

研究者番号:

(3) 連携研究者 ( )  
研究者番号 :