

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540362

研究課題名(和文) 2次元量子系におけるトポロジカルな秩序と新奇な輸送現象

研究課題名(英文) Topological phases and novel transport phenomena in two-dimensional quantum systems

研究代表者

中村 正明 (Nakamura, Masaaki)

東京大学・生産技術研究所・特任研究員

研究者番号：50339107

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円、(間接経費) 810,000円

研究成果の概要(和文)：近年、分数量子ホール効果を理解するための新たなアプローチとして、系にトーラスの境界条件を課して1次元格子模型に焼き直し、さらにトーラスが細い極限を起点とすることで相互作用を簡略化する方法が提案されている。この方法を用いて、分数量子ホール効果と1次元量子スピン系におけるハルデン問題との関連を論じた。また、分数量子ホール状態を記述する厳密基底状態を持つ模型を提唱し、さらに波動関数を行列積表示するという画期的な提案を行った。

これらのほかに多層グラフェンにおける層間電気伝導の特性について議論し、また3体相互作用のある量子スピン系においてダイマー状態が出現することを厳密に示した。

研究成果の概要(英文)：Recently, a new method to study fractional quantum Hall effect (FQHE) has been proposed: we impose torus boundary conditions to the two-dimensional electron systems, and map the system to a one-dimensional lattice model. Furthermore, the electron-electron interactions are simplified considering the thin-torus limit. Using this method, we have discussed the relationship between Haldane conjecture in quantum spin systems and FQHE. We also proposed a model with an exact ground state describing the FQH state, and matrix product expression for the wave function.

We also discussed interlayer electric conduction, and dimerized state in a quantum spin chain with three-body interactions.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性

キーワード：分数量子ホール効果 グラフェン 行列積状態 量子スピン系

1. 研究開始当初の背景

20 年以上にわたって研究されてきた分数量子ホール効果であるが、近年、1 次元定式化という新たなアプローチにより、これまでとは異なる視点からの理解が急速に深まっている。これは、2 次元電子系をランダウ・ゲージで表して系をトーラス上の境界条件のもとで扱い、トーラスを細くしていった極限 (Tao-Thouless 極限) を考えて長距離相互作用のある 1 次元系の問題に焼きなおすものである。特にエネルギーギャップの開いている場合は、この変形によって基底状態に本質的な変化は起こらないため、比較的容易に扱える 1 次元系の問題を解くことで、もとの量子ホール状態を解析することができる。これにより、分数量子ホール状態の安定性が議論でき、ホール伝導率にプラトーが観測される実験条件の予測も可能になる。さらに 1 次元系の物理との対応関係も議論できる。

一方、2004 年にグラフェンと呼ばれる 2 次元の単層のグラファイトが抽出され、さらにその電子状態の制御も可能になり、異常整数量子ホール効果や最小伝導率の存在など新奇な輸送現象が注目されている。そして、発見者 Geim と Novoselov は 2010 年のノーベル物理学賞にも選ばれている。この系でさまざまな奇異な現象が見られる原因は、グラフェンは、分散関係がフェルミ面近傍で線形となる、いわゆるゼロギャップ系であることに由来し、相対論的量子力学で用いられるディラック方程式を用いてその特徴が説明できる。グラフェンは相互作用の弱い系であるために、整数量子ホール効果しか起こらないものと考えられてきた。しかし、今年になって、それまで観測されていた整数量子ホール効果のみならず、分数量子ホール効果も観測されたことが報告されている。現在、特にグラフェンを数層積み重ねた多層構造を持つグラフェンの研究が重要となってきた。

2. 研究の目的

一般に、分数量子ホール効果は最低ランダウ準位の占有率が奇数分母の規約分数になるときに起きるのに対し、分母が偶数の場合にはエネルギーギャップは開かず、ホール伝導率にプラトーは生じない。つまり、分数量子ホール効果には偶奇性 (Z_2 型のトポロジ) が存在するということができる。一方、1 次元量子スピン系においても、ハルデン予想、つまりスピンの大きさが整数か半整数かによるエネルギーギャップの有無の違い、において偶奇性が存在する。上に述べたような定式化により、分数量子ホール状態を考えると、トーラスの太さがゼロの極限は電荷秩序状態に写像される。ここからトーラスの太さを大きくして行ったときの振る舞いを、系を量子スピン系に写像することによってハルデン予想との関連において調べる。さらに、量子スピン系で厳密な基底状態を持ち、当初未

知な状態であったハルデンギャップ状態に対して物理的な描象を与えた、Affleck-Kennedy-Lieb-Tasaki 模型と同様な役割を果たす、分数量子ホール状態に対する厳密な基底状態をもつ模型の導入を行い、分数量子ホール効果に関する知見を得る。また、グラフェンに関する電気伝導や量子ホール効果についても考える。

3. 研究の方法

分数量子ホール系については 1 次元定式化の方法を用い、場の理論、数値対角化、密度行列繰りこみ群など従来の 1 次元への解析法を援用する。また、グラフェンやフラストレートした系については線形応答理論、自己無同着方程式、平均場理論、密度行列繰りこみ群などを用いて計算を行う。

4. 研究成果

分数量子ホール効果の研究に関しては、量子スピン系におけるハルデンギャップ状態と分母が奇数となる充填率における分数量子ホール状態とが密接に対応していることが分かった。さらに、ラフリン状態を記述する厳密な基底状態を持つ模型を見だし、その波動関数が行列積状態として与えられることを示し、物理量の計算が容易に行えることを示した。

また、これらのほかに多層グラフェンにおける層間電気伝導の特性について議論し、また 3 体相互作用のある量子スピン系においてダイマー状態が出現することを厳密に示した。

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 9 件)すべて査読あり

Z.-Y. Wang, S. C. Furuya, M. Nakamura, and R. Komakura,

Dimerizations in spin-S antiferromagnetic chains with three-spin interaction
Phys. Rev. B **88**, 224419 (2013)

Z.-Y. Wang and M. Nakamura,
One-dimensional lattice model with an exact matrix-product ground state describing the Laughlin wave function
Phys. Rev. B **87**, 245119 (2013)

Z.-Y. Wang and M. Nakamura,
Matrix-Product Ansatz for Excited States of Fractional Quantum Hall Systems

J. Phys. Soc. Jpn. Suppl.(2014) に出版予定,
arXiv:1301.7549

Z.-Y. Wang, S. Takayoshi and M. Nakamura,
Spin-chain description of fractional quantum
Hall states in the Jain series
Phys. Rev. B **86**, 155104 (2012)

M. Nakamura, Z.-Y. Wang and E. J. Bergholtz,
Exactly Solvable Fermion Chain Describing a
 $\nu=1/3$ Fractional Quantum Hall State
Phys. Rev. Lett. **109**, 016401 (2012)

T. Wakutsu, M. Nakamura and B. Dora,
Layer-resolved conductivities in multilayer
graphenes
Phys. Rev. B **85** (2012) 033403

M. Nakamura, Z.-Y. Wang and E. J.
Bergholtz,
Beyond the Tao-Thouless limit of the fractional
quantum Hall effect: spin chains and Fermi
surface deformation
J. Phys.: Conf. Ser. **302**, 012020 (2011)

M. Nakamura, S. Nishimoto, A. O'Brien and P.
Fulde,
Metal-Insulator Transition of Spinless
Fermions on the Kagome Lattice
Modern Physics Letters B **25**, 947-953 (2011)

E. J. Bergholtz, M. Nakamura and J. Suorsa,
Effective spin chains for fractional quantum
Hall states
Physica E 43 **755-760**, (2011)

[学会発表](計 18件)

「S=1 反強磁性カゴメ格子スピン系の基底状態
と磁化過程」
中村正明、西本理、日本物理学会 (東海大学)
27aAF-6 2014年3月27日

「S=1 カゴメ格子反強磁性ハイゼンベルク模型

の基底状態と磁化過程」

中村正明、西本理、量子スピン系研究会 (福井大
学) 2013年12月13日

「S=1/2 異方的反強磁性カゴメ格子スピン系に
おける磁氣的性質」

中村正明、西本理、日本物理学会 (徳島大学)
26aKM-6 2013年9月26日

「非アーベリアン分数量子ホール状態の1次元
定式化と行列積表現」

中村正明、汪正元、日本物理学会 (広島大学) 2013
年3月27日

招待講演「量子スピン系の手法による分数量子
ホール効果へのアプローチ」

中村正明、
京都大学基礎物理学研究所研究会「量子スピン系
の物理」(京都大学) 2012年11月12日

「分数量子ホール効果の1次元格子模型と厳密
解による定式化」

中村正明、汪正元、日本物理学会 (横浜国立大学)
2012年9月19日

「Exact results for a fermion chain with
fractionalized excitations」

中村正明、汪正元、E. J. Bergholtz、日本物理学会
(関西学院大学) 2012年3月27日

「分数量子ホール効果の1次元表現と厳密解に
よる定式化」

中村正明、
「ナノサイエンスを拓く量子物理学拠点」公開シ
ンポジウム 2012 (東京工業大学)
2012年2月20日

“Exactly solvable 1D lattice model for the
fractional quantum Hall states with
matrix-product ground states”

M. Nakamura and Z.-Y. Wang
Symposium on Quantum Hall Effects and
Related Topics, Max-Planck-Institute for Solid

State Research, August 26-28, 2013

“Exactly solvable 1D lattice model for the fractional quantum Hall states with matrix-product ground states”

M. Nakamura and Z.-Y. Wang

Symposium on Quantum Hall Effects and Related Topics, Max-Planck-Institute for Solid State Research, June 26-28, 2013

“Exactly solvable 1D lattice model for the fractional quantum Hall states with matrix-product ground states”

M. Nakamura and Z.-Y. Wang

"Emergent Quantum Phases in Condensed Matter" (EQPCM2013) Workshop/Symposium The Institute for Solid State Physics of the University of Tokyo, June 12-14, 2013

“Exactly solvable 1D lattice model for the Laughlin states on torus geometries”

M. Nakamura and Z.-Y. Wang

APS March Meeting 2013, Baltimore, MD, USA, March 18-21, 2013

招待講演 “Exactly solvable 1D lattice model for fractional quantum Hall states and its entanglement spectra”

M. Nakamura

JAEA Synchrotron Radiation Research Symposium "Magnetism in Quantum Beam Science", Spring-8 Hyogo, Japan, March 11-13, 2013

“Entanglement spectra of the fractional quantum Hall states”

M. Nakamura

nanoPHYS'12, Tokyo, Japan, December 17, 2012

“Exactly solvable 1D lattice model for the Laughlin states on torus geometries and its entanglement spectra”

M. Nakamura

International workshop on Entanglement Spectra in Complex Quantum

Wave functions (esicqw12), Dresden, Germany, November 15, 2012

“Exact results for a fermion chain with fractionalized excitations”

M. Nakamura, Z.-Y. Wang and E. J. Bergholtz

APS March Meeting 2012, Boston, MA, USA, February 27-March 2, 2012

“Exact results for a fermion chain with fractionalized excitations”

M. Nakamura, Z.-Y. Wang and E. J. Bergholtz

Novel Quantum States in Condensed Matter 2011 (NQS2011), Kyoto, Japan, November 16, 2011

“Layer-resolved conductivities in multilayer graphenes”

M. Nakamura and T. Wakutsu

SCES 2011, Cambridge, August 31, 2011

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

<http://hatano-lab.iis.u-tokyo.ac.jp/masaakin/>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

中村正明

(NAKAMURA, Masaaki)

東京大学生産技術研究所・特任研究員

研究者番号：50339107