

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 25 年 4 月 11 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22540406

研究課題名（和文）基底状態の量子もつれ破壊と量子エネルギーテレポーテーションの理論研究

研究課題名（英文） Study of Ground-State Entanglement Breaking and Quantum Energy Teleportation

研究代表者：

堀田 昌寛 (Hotta Masahiro)

東北大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：60261541

研究成果の概要（和文）：

量子エネルギーテレポーテーション (QET) を 2 つの量子ビット系で実現できる最も簡単なモデルを構成できた。また基底状態の量子もつれ量が大きいほど、転送エネルギー量も大きくなることが示された。また量子電磁場の零点振動の量子測定においてより大量の基底状態の情報を引き出すと、それを用いた QET での転送エネルギーも増えることが分かった。一般的な量子スピン鎖モデルにおいては、基底状態のエンタングルメントエントロピーが転送エネルギーの 2 乗に比例する量の上限值になることも証明された。また量子ホール端電流系を用いると実験で QET が検証できる可能性が高いことも発見された。さらに有限温度系でも QET が有効であることも示された。

研究成果の概要（英文）：

A minimal model of quantum energy teleportation (QET) was constructed and energy-entanglement relations are discovered. In the quantum electromagnetic field system, it was proven that getting more information about the ground-state fluctuation leads to teleporting more energy by QET protocols. In general spin-chain systems, the energy-entanglement relations were obtained and show that the ground-state entanglement entropy is a upper bound of a quantity proportional to the square of the teleported energy. A realistic proposal for QET experiment was proposed using quantum Hall edge current. It was also verified that even for the systems in finite temperature QET remains effective.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|---------|-----------|---------|-----------|
| 2010 年度 | 1,200,000 | 360,000 | 1,560,000 |
| 2011 年度 | 1,100,000 | 330,000 | 1,430,000 |
| 2012 年度 | 1,000,000 | 300,000 | 1,300,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,300,000 | 990,000 | 4,290,000 |

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：(C)量子情報

1. 研究開始当初の背景

2008年にQETプロトコルが初めて提案されたが、その時点では定量的な基底状態の量子もつれ量と転送エネルギー量の関係は明らかにはなっていなかった。また実験でどのようにQETが検証できるのかも不明な現状にあった。有限温度の効果もQETの実験検証にどのように影響を与えるのかも知られていなかった。

2. 研究の目的

QETの最初のステップで行われる局所的測定による基底状態の量子もつれ破壊とQETで転送されるエネルギー量の数理的関係性を明らかにすることと、将来のQETの実験的検証研究を支えるため様々な量子系において具体的なQETプロトコルを理論的に研究し、その属性を明らかにすることである。

3. 研究の方法

QETにおける基底状態の量子もつれ破壊と入力エネルギー量及び転送エネルギー量の関係性の研究を行う。相互情報量や定量的な量子もつれ指標を基底状態と局所的測定によって励起された状態において評価比較し、測定で得る量子揺らぎの情報量、測定による量子もつれの減少量、転送されるエネルギー量、測定領域での残留エネルギー量の相関を解析し、新しいタイプの情報量と物理量の関係性を明らかにしていく。また様々な量子多体系に対するQETの特性を解析し、QETの実験的検証に役立つ物理系の同定を行う。特に各系のQETで使用される量子測定及び測定結果に依存した量子操作の最適化を各物理系の個性を考慮しながら検討し、将来のQET検証実験の提案を行っていく。

4. 研究成果

22年度には量子エネルギーテレポーテーション(以下QET)に関する本研究は世界的に注目を集めた。アメリカMITが出版しているTechnology Review誌で紹介され大きな反響を呼び、同誌のBest of 2010も獲得した。同様にアメリカのBusiness Insider誌が発表する15 Groundbreaking Inventions of 2010にも選ばれている。またグーグル本社で行われる完全招待制の会議にも招かれた。研究の進展としては、電磁場の真空状態を使ったプロトコルの解析を行い、量子揺らぎに関して有限の離散の情報量を測定するプロトコルよりも連続無限の情報量を測定するほうがより多く

のエネルギーを転送できることを示した。また2量子ビット系において、非自明でかつミニマルなQETプロトコルを提案した。更に測定でテレポーテーションのために消費される量子もつれ量とそれによって転送されるエネルギー量の間になり立つ2つの不等式を解析的に示した。これにより、ある量の量子もつれを測定で消費したときの最大エネルギー転送効率及び、あるエネルギーを転送するための量子もつれ消費の最小量を同定できた。量子情報のみを転送する通常の量子テレポーテーションにおいても量子もつれがその“physical resource”と見なせるように、この結果からQETにおいても量子もつれはその“physical resource”と見なせることがわかった。またこの関係は「物理量であるエネルギー」と「情報量である量子もつれ」を強く結び付けるため、J. Wheelerが提唱していたIt From Bitという思想をより明確に具現化していると言える。また多数の調和振動子を連結させた鎖系においても数値解析により同様の量子もつれと転送エネルギー量の間不等式を与えることができた。また測定による様々な量子もつれの消費の仕方、得られる情報量とそれにより転送できるエネルギー量の間関係を様々な設定で詳細に解析した。またブラックホールのエントロピー問題に対してもQETを用いて解析を行い、そのエントロピーは外部の測定で得られる真空状態の場の零点振動を深く結び付いているという示唆を得た。研究発表においても、2011年7月に米国で行われたInternational Conference on Computing, Communications and Control Technologiesという国際会議において、QETの総合報告がApplications of Informatics and Cybernetics in Science, Engineering and other areasというセッションでの“Session's Best Paper Award”を受賞した。同時にこのレビュー論文が会議全体での“the best 10% of the papers”にも選ばれ、the Journal of Systemics, Cybernetics and Informaticsから出版される会議録にも収録予定である。量子ホール端電流を用いたQETの実験的検証のための基礎的理論研究にも進展があった。ホール端の励起の典型的速度は10の6乗メートル/秒で、非相対論的物理系でのQETが適用できるが、それでも古典通信部分とそれに連なる量子操作に関してはかなり素早く実行する必要がある。そこで実験可能な技術レベルに近い実験装置の具体的配置を考え、ホール端電流の真空状態の量子揺らぎ

局所的測定完了後に電流上流部分へその測定情報が遡るようにし、そこでの真空揺らぎから測定結果に依存した操作によって零点エネルギーの一部を取り出せる設定を提案した。特にエネルギーを取り出すための最後の局所的操作部分については別な量子ホール端系を使用することで、素早い操作の実現が可能であることを見出した。同時に、真空揺らぎから取り出された転送エネルギーはこの第2のホール電流によって外部に輸送されるが、それを直接観測することも有望であることが判明した。第2のホール電流に上乘せされる転送エネルギーは、この実験提案だと100マイクロ電子ボルト程度が見込まれ、実測可能なオーダーである。ホール系の実験に関しては東北大学理学部の遊佐剛准教授の実験グループと密に議論を積み重ね、実験グループの専属メンバーが25年度からQETの実装に必要な準備実験研究を開始することになった。3年程度の目途でQETの実験的検証を目指す。量子スピン鎖は例えばBEC系でも最近実験的に作れる可能性が見出されている。BEC以外にも様々な物性系が量子スピン系でモデル化できることも知られているため、量子スピン系でのQETの研究は重要である。多体系の中に閉じた部分系集合を作って量子測定すると、その外部部分系からQETによりエネルギーが取り出せる。この基底状態に一般的には量子エンタングルメント（量子もつれ）が存在することが知られているが、その量子もつれの量とQETを行った時の転送エネルギー量との間の一般的な定量的関係はこれまで不明であった。今回の研究により、基底状態のエンタングルメントエントロピーが転送エネルギーのある2次関数の上限になることを一般的に示すことができた。この関係は確かに基底状態の量子もつれが一般的にQETのリソースになっていること意味する。この結果は1次元量子スピン鎖に限らず、高次元のスピンネットワーク系にもそのまま拡張できる。また米国のBucknell大学のMichael Freyとともに、2量子ビットからなる縦磁場イジングモデルの有限温度のQETの研究を行った。低温領域に存在していた量子もつれはある臨界温度以上で完全に消失するが、代わりに量子ディスコードという別な量子相関を使って全温度領域でQETは有効に働くことを示した。この研究によりQETと有限温度系におけるマクスウェルの悪魔の理論と対応が部分的であるが明確となった。

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7件)

- ① Masahiro Hotta, “Ground-state entanglement bound for quantum energy teleportation of general spin-chain models”, *Physical Review A*, 査読有, 87, (2013), 032313 1-9.
- ② 堀田昌寛, “真空に隠れる情報と量子エネルギーテレポーテーション”, *数理科学*, 査読有, 585巻,(2012),P35-41.
- ③ Go Yusa, Wataru Izumida and Masahiro Hotta, “Quantum energy teleportation in a quantum Hall system”, *Physical Review A*, 査読有, 84, (2011), 032336 1-6.
- ④ Masahiro Hotta, “Energy-entanglement relation for quantum energy teleportation”, *Physics Letter A*, 査読有, 374,(2010),3416-3421.
- ⑤ Yasusada Nambu and Masahiro Hotta, “Quantum energy teleportation with a linear harmonic chain”, *Physical Review A*, 査読有, 82, (2010), 042329 1-9.
- ⑥ Masahiro Hotta, “Controlled Hawking process by quantum energy teleportation”, *Physical Review D*, 査読有, 81,(2010), 044025 1-10.
- ⑦ Masahiro Hotta, “Quantum energy teleportation with an electromagnetic field: discrete vs. continuous variables”, *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 査読有, 43,(2010), 105305 1-17.

[学会発表] (計6件)

- ① Masahiro Hotta, “Brief Introduction to Quantum Energy Teleportation”, Science Foo Camp Meeting 2010, 2010年7月31日 米国・グーグル本社.
- ② Masahiro Hotta, “Quantum Energy Teleportation”, 2010年7月28日, カナダ・ブリティッシュコロンビア大学.
- ③ Masahiro Hotta, “Quantum energy teleportation: New energy distribution inside quantum computer without decoherence”, International conference on computing, communications and control technologies, 2011年7月22日, 米国フロリダ.
- ④ 堀田昌寛, “量子力学は、今後も破れずにいられるのか?”, KEK 研究会 量子論の諸問題と今後の発展, 2012年3月16日, 高エネルギー加速器機構.
- ⑤ G. Yusa, W. Izumida, M. Hotta, “Implementation of quantum energy

teleportation to a quantum Hall system”,
Quantum Vacuum Kawatabi 2012,
2012年10月21日, 東北大学川渡セミナーセ
ンター.

- ⑥ M. Hotta, “Informtion-energy relation of
quantum energy teleportation”, ICQIT2013,
2013年1月17日, 国立情報学研究所.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀田 昌寛 (Hotta Masahiro)
東北大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：60261541

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：