



Title	Robust and efficient quantum communication based on decoherence-free subspace
Author(s)	Kumagai, Hidetoshi
Citation	大阪大学, 2013, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/27509
rights	二次配布には著者本人による許諾が必要
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

氏 名	熊谷英敏 <small>くま がい ひで とし</small>
博士の専攻分野の名称	博士（理学）
学 位 記 番 号	第 2 6 1 1 1 号
学 位 授 与 年 月 日	平成 25 年 3 月 25 日
学 位 授 与 の 要 件	学位規則第 4 条第 1 項該当 基礎工学研究科物質創成専攻
学 位 論 文 名	Robust and efficient quantum communication based on decoherence-free subspace (デコヒーレンスフリー部分空間を用いた高効率かつ雑音耐性のある量子通信)
論 文 審 査 委 員	(主査) 教 授 井元 信之 (副査) 教 授 占部 伸二 教 授 竹内 繁樹

論 文 内 容 の 要 旨

量子通信における最重要課題の一つは量子状態（量子情報）を忠実かつ効率的に配送することである。中でも、量子情報処理を行う上で必要不可欠な資源であるエンタングルメントを離れた 2 者間で共有することは重要である。量子通信では主に光子対エンタングルメントが用いられている。エンタングルメントの 2 者間共有は、2 者それぞれの局所操作と古典通信のみで行うことはできず、情報の送信者が手元で作り、光子対の片方を受信者が受け取ることで完了する。しかしながらその量子状態は外界の影響、つまり、通信路中の雑音の影響を受けやすく、初期状態を保ったまま受信者のもとに届けるのは容易なことではない。さらに、通信路における光子損失が量子状態を効率的に配送するための妨げになっている。エンタングルメントを用いた量子情報処理を行う上で以上の問題の解決は急務となっている。本研究の目的は雑音から量子状態を守り、かつ高効率な配送を実現するための通信プロトコルを提案することである。

量子状態を雑音から保護する有望な手法として、デコヒーレンスフリー部分空間 (DFS)を用いる方法がある。この方法は、送信したい信号光子に補助光子を加えることによりヒルベルト空間を拡大し、その中に雑音の影響を受けない部分空間(DFS)が出来るのでそこに符号化し、量子通信を行う。しかし、一般にはDFSを構成するために n 個の量子ビットを用いると、その配送効率通信路の透過率 T の n 乗に比例するので、配送効率の低下が問題となっていた。先行研究により、雑音に対して耐性のある量子通信プロトコルの理論提案や実証実験がなされ、近年ではこの問題を克服し、透過率 T そのもので配送可能な提案および実証実験がなされたが、特定の雑音（位相雑音）に対する雑音耐性に限られていた。

本研究では偏光回転など一般の雑音に耐性があり、かつ配送効率 T を達成する高効率化に関する研究を行った。その結果、従来 1 本だった通信路を 2 本用い、さらに先行研究のアイデアを取り込むことで 2 つの問題点を同時に解決できることが本研究によって明らかになった。

論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

量子通信とは量子状態を他所に送ることである。これが通常の通信でできないのは、状態を覗かずに送る必要があるからである。仮に状態を知っていてもエンタングルした系の一部であることが多く、この場合も通常通信では送れ

ない。量子通信の使い道としては量子暗号や量子高密度通信があり、情報担体としては現行の通信同様、光パルスを用いる。しかし通信には伝送損失が避けられず、量子通信ではコピーができないため、いったん送って損失を被ると再送できない。そこで直接送ることはせず、準備としてエンタングルした二つの光パルスの片方を送り、それが成功した後に量子テレポーテーションを行う。すなわち量子通信とはエンタングルした光の配布が全てであると言える。

光ファイバーや空間ビームを用いる光伝送路は一般に光の位相雑音や偏光の回転ゆらぎを有する。このような伝送路でエンタングルメント配布を行うには、まず量子誤り訂正 (1995年アメリカで提案) が考えられる。しかし一つの量子ビットを表現するのに n 個の光子が必要のため、その全てが受信者に届くためには、伝送路の光透過率を T としたとき効率は T の n 乗となる。量子誤り訂正では n の最小値は 5 である。例として 50km の光ファイバーは $T=0.1$ だから、その 5 乗では使用に耐えない。

別の方法としてデコヒーレンスフリー部分空間を使うと、 $n=4$ にまで緩和されることがスウェーデンの先行研究によりわかっている (2004年Phys. Rev.)。デコヒーレンスフリー部分空間とは「集団的雑音」の影響を無くす方法で、光のように一連の光子が同じ雑音を受けるような系に適している。さらに大阪大学井元研究室の先行研究により、偏光回転を諦めて位相雑音に限定すれば、 $n=2$ に (2008年Nature Photonics)、そして双方向通信を用いることにより究極の $n=1$ まで (2011年Phys. Rev. Lett.) 下げられることがわかっている。しかし偏光回転まで含めた雑音一般の影響を無くすことを $n=1$ で行うことはできないと考えられていた。

本論文はそれを可能とする方法を提案した理論的研究である。本研究の発端は、先行研究のように位相雑音だけに限定した場合には問題が起きなかった双方向通信の理論的記述において、偏光回転をどう記述するかという考察から始まった。この問題の見通しから雑音一般の影響を無くすことを $n=1$ で行うのは無理だろうと予感された。偏光回転の双方向記述は古典通信でも研究されていたことが後からわかったが、量子通信ではさらに記述法によって見かけのエンタングルメントが現れることがあり、そうならない方法を見つけて理論展開する必要があった。熊谷氏はそのような方法をいくつか提案するに至り、また新旧様々の異なる記述法の相互の関係を明らかにすることができた。

この理論構築の過程で「偏光回転まで含めた雑音一般の影響を無くすことを $n=1$ で行うこと」が可能であることに熊谷氏は気づき、具体的な系を提案し、理論的に証明を行った。これは驚くべき結果であり、国際会議および国内研究会での発表およびPhys. Rev. 誌への投稿を終え、現在レフェリーレポートに従ってリヴァイズ中である。この提案は実験の実現性も困難でないと見受けられる方法であり、今後の量子通信研究の一方向を拓くものである。

このように、本博士論文は量子通信の懸案課題を解決し、量子通信および分散型計算の実現に向けて大きく踏み出す一歩となる知見を得たもので、その価値は大きい。よって本論文を博士 (理学) の学位論文として価値のあるものと認める。