

Title	Photonic entanglement manipulation for robust and efficient quantum communication
Author(s)	生田, 力三
Citation	大阪大学, 2011, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/59100
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 〈a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"〉 大阪大学の博士論文について <a>〉 をご参照ください。

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

【15】

氏名	い ぶ た り き ぞう 生 田 力 三
博士の専攻分野の名称	博 士 (理学)
学位記番号	第 2 4 9 0 5 号
学位授与年月日	平成 23 年 9 月 20 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	Photonic entanglement manipulation for robust and efficient quantum communication (高効率かつ雑音に強い量子通信に向けた光子系量子もつれの操作に関する研究)
論文審査委員	(主査) 教授 井元 信之 (副査) 教授 占部 伸二 教授 北川 勝浩 京都大学教授 北野 正雄

論文内容の要旨

光子を用いた量子情報処理ネットワークは様々な応用技術を可能にする。その実現に向けて二つの大きな障害がある。一つは通信路中での光損失による配送効率の低下であり、もう一つは雑音による量子状態の質の低下である。本研究では、これらの問題の解決に実験的に取り組んだ。さらに、多者間量子情報処理プロトコルに利用可能な多者間量子もつれ状態に関する理論研究を行なった。

量子情報処理を行うためには光子を原子系など様々な物理系と相互作用させる必要があるが、その際の波長は物理系に固有であり、現在可視域を利用する系の研究が盛んである。一方、光ファイバー通信に適した波長は近赤外の通信波長域に限られる。従って、高効率量子通信のためにはこれら波長の溝を埋める必要がある。本研究では、周期反転分極構造を有する二次の非線形光学結晶を用いた差周波発生を利用して、可視域光子を通信波長の光子に変換する量子インターフェースを実現した。量子もつれ状態にある可視域光子を通信波長域に波長変換し、波長変換後も他方の光子と量子もつれ状態を維持している事を確認した。

量子状態を雑音から守る技術として、複数量子ビットからなるデコヒーレンスフリー部分空間(DFS)の利用が有用である事が知られている。これまで多くの DFS 実証実験が行なわれてきたが、N 光子 DFS に符号化した量子ビットを配送する場合、送りたい量子ビットの配送効率が透過率の N 乗に制限される欠点があった。本研究では、2 光子 DFS の配送効率を透過率の 2 乗から 1 乗に向上させる方法の提案および実証実験を行なった。本方式では、量子もつれの性質をうまく利用し、多光子量子操作と測定を駆使することで効率化を実現した。

多者間量子情報処理プロトコルに利用できる状態に、W状態と呼ばれる多者間量子もつれ状態がある。本研究では、W状態の局所的拡張において、拡張に利用する状態を n 光子 Fock 状態に限定した場合について最大の拡張確率を求めた。またその確率を実現する線形光学回路を示した。

論文審査の結果の要旨

量子情報処理の主な応用は量子通信と量子コンピューターであるが、いずれもエンタングルメント (量子もつれ) と呼ばれる「量子相関」の形成と制御が重要となる。特に量子通信は離れた二者間の量子暗号や多者間の分散型計算を含むが、遠隔二者間あるいは多者間のエンタングルメント生成および制御の実現が大きなポイントとなる。離れた地点間の量子情報の伝送媒体としては光を用いる以外考えられないが、ここでいくつかの懸案事項が近年研究対象となっている。一つは伝送路の光損失で、これは確率的に光子を消滅させるのでエンタングルメントの生成効率を著しく損なうため、極力損失の少ない波長帯—光ファイバーの場合 $1.5\mu\text{m}$ 帯—を用いる必要がある。一方、量子メモリーとして現在有望な物質系は $0.8\mu\text{m}$ 帯の光でしか量子情報のread/writeができない。このミスマッチの整合を取るのが第一の課題である。二つ目の課題は伝送路の位相雑音で、これはエンタングルメントを損失させるため、何らかの量子誤り訂正が必要となる。しかし論理的量子ビット 1 個に物理的量子ビット n 個あてがう必要があるため、伝送レートが伝送透過率の n 乗で急激に減少する。一般の量子誤り訂正では n は 5 以上必要になってしまうが、現実の誤りに限定した位相誤り訂正では阪大井元研の研究により $n=2$ まで下げられている。しかしそれでも、たとえば 100 km の通信でレートは 1 万分の 1 になってしまうので、さらなるブレイクスルーが期待される。三つ目の課題は多者間エンタングルメントの生成で、これはたくさんの量子ビットの間でエンタングルメントを一挙に生成することが現在は困難なため、少数量子ビット間エンタングルメントから始めて量子ビットを一つずつ追加して行く方法である。特に一旦配った量子ビットを回収し再配布する必要のない「局所的」追加が有望である。現段階では制御性のよい線形光学回路で行うことが前提となっており、GHZ状態およびクラスター状態についてはヨーロッパで研究が進んでいた。しかしもう一つ重要なW状態については阪大井元研でアンシラ光子を一つ用意する方法と二つ用意する方法が提案・実験されているだけであり、より効率の高い方法があるのか、あるとすれば効率の一般的理論限界は何か、知られていなかった。

本博士論文は上記の量子通信の重要課題に対し解決を与えるものである。波長のミスマッチの問題 (一つ目の課題) に対しては、周期分極ニオブ酸リチウム結晶を用いて差周波発生と呼ばれる非線形光学現象を利用して、 $0.8\mu\text{m}$ 帯の光を $1.5\mu\text{m}$ 帯の光に変換し、元の $0.8\mu\text{m}$ 帯の光が第三の光と共有しているエンタングルメントを保存したまま $1.5\mu\text{m}$ 帯に変換されていることを実験的に確認した。位相誤りの訂正 (二つ目の課題) については、これ以上 n を下げようがない $n=1$ という究極の方法を実現する実験を行い、実際に効率が「透過率の一乗に比例」することを確認した。多者間W状態の拡大法の効率限界 (三つ目の課題) については、線形光学素子を用いるあらゆる光回路を想定した一般論を展開し、追加のために用意するアンシラ光子数の関数として効率の上限値を求めた。これにより、井元研の先行二提案の一つは実際に最大効率を実現する方法であり、他の一つは最大効率に満たない方法であることがわかった。

このように、本博士論文は量子通信の懸案課題を数多く解決し、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。