



Title	Long-distance quantum communication with remote nondestructive parity measurement
Author(s)	東, 浩司
Citation	大阪大学, 2010, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/54275
rights	©American Physical Society
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

氏名	あずま こうじ
博士の専攻分野の名称	博士（理学）
学位記番号	第 23893 号
学位授与年月日	平成 22 年 3 月 23 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	Long-distance quantum communication with remote nondestructive parity measurement (遠隔非破壊パリティ測定に基づく長距離量子通信理論)
論文審査委員	(主査) 教授 井元 信之 (副査) 教授 吉田 博 教授 北川 勝浩

論文内容の要旨

量子通信は、物理法則によって安全性が保証できる秘密鍵の配達や、未知の量子状態の伝送などの応用を担う基礎技術である。量子通信を行うには通常光パルスが用いられるが、通信路中で発生する光子損失が距離に対して指數関数的に増加することが原因で、その長距離化は難しい。このような困難を開拓し、長距離量子通信を達成する方法の一つに量子中継がある[1]。この方式の目標は、送受信者間に設置された量子中継器を利用して、最大エンタングルメントを送受信者に共有させることである。一般に、量子中継の実装方式は量子中継器に備え付けられた量子メモリーの種類に依存する。実際、原子集団を量子メモリーとする量子中継[2-7]が「中継器間のエンタングルメント生成」と「エンタングルメント接続」という操作から構成されるのに対し、共振器中の二準位量子系をメモリーとするハイブリッド量子中継[8-11]ではそれらの操作に加え、「エンタングルメント蒸留」という操作も利用する。これらの量子中継は長距離量子通信の有力候補と捉えられているが、前者の方式はエンタングルメント蒸留方式の欠如による困難を、後者は複雑な操作に基づくCNOTゲートの高効率化という難題を抱えている。

本論文は、「離れた量子メモリーへの非破壊パリティ測定」の実装方法（略：RNPM）を提供するとともに、RNPMの実現が量子通信の長距離化に直結することを示す。このRNPMはハイブリッド量子中継と同様、共振器中の二準位量子系をメモリーとし、光パルスとメモリーとの非共鳴な相互作用だけを用いるため、様々な二準位量子系に適用できる。RNPMを実装するには、測定したい量子メモリーへ光パルスを照射し、それらのメモリーから反射されたパルスを集光し、ビームスプリッターで干渉させ、光子検出器で測定すればよい。このような単純な構成にも関わらず、RNPMは「一種類のエラーしか含まないエンタングルメントの生成」を可能にするだけでなく、その効率は理論限界に達することが証明できる。また、RNPMは「エンタングルメント接続」と「エンタングルメント蒸留」も可能にするため、RNPMだけで量子中継が実装可能であり、効率的長距離量子通信が可能となる。さらには、RNPMの効率化が量子計算[12]の実現に繋がり得ることも示される。

- [5] L. Jiang, J. M. Taylor, and M. D. Lukin, Phys. Rev. A **76**, 012301 (2007).
- [6] C. Simon *et al.*, Phys. Rev. Lett. **98**, 190503 (2007).
- [7] N. Sangouard, C. Simon, H. de Riedmatten, and N. Gisin, arXiv:0906.2699.
- [8] P. van Loock *et al.*, Phys. Rev. Lett. **96**, 240501 (2006).
- [9] T. D. Ladd *et al.*, New J. Phys. **8**, 184 (2006).
- [10] P. van Loock, N. Lütkenhaus, W. J. Munro, and K. Nemoto, Phys. Rev. A **78**, 062319 (2008).
- [11] W. J. Munro, R. Van Meter, S. G. R. Louis, and K. Nemoto, Phys. Rev. Lett. **101**, 040502 (2008).
- [12] R. Raussendorf and H. J. Briegel, Phys. Rev. Lett. **86**, 5188 (2000).

論文審査の結果の要旨

提出された論文は、量子中継器・エンタングルメント蒸留・エンタングルメント交換など量子通信に必須の要素技術のすべてに使うことができる「遠隔非破壊パリティ測定」という汎用量子測定法を提案し、それを特に長距離量子通信に必須の技術である「量子中継器」に使用した場合に従来の方法のどれよりも優れていることを理論的に示したものである。そればかりでなく、従来の量子中継器の枠組みの中ではこれ以上の性能（伝送距離の閾値として与えられる中継の効率で測られる）はないことを数学的に証明している。

量子中継器とは、たとえば手許の量子メモリーに格納されている量子状態を数百～数千キロメートル離れた地点にある量子メモリーに送り届けたいときといったん光に量子状態を移して光ファイバー等を介して送るのであるが、信号が減衰して雑音に埋もれる前に信号を読み取って再生するためにいつも挿入される現行の（量子でない）中継器と同様の目的で挿入されるものである。現行の中継器と量子中継器との違いは、現行の中継器は信号を読み取って再生しているが、量子状態は読み取ってしまうと壊れるので、量子中継器では読み取らずに識別再生する必要があり、これが量子中継器の研究に工学的のみならず理学的研究を必要としている理由になっている。いずれにせよ数百～数千kmの間に量子中継が可能な距離（10km程度）ごとに多くの中継地点のそれぞれに量子メモリーが必要であり、光を媒介として量子状態の中継伝送が行われる。ここで従来の量子中継器の枠組みというのは、量子メモリーに格納されている量子状態を読み取る光として粒子でなく波として扱える程度の強度を持つ光を用い、波としての干涉を用いる方法を指す。この方法が用いられるのは、单一光子だと光ファイバーに吸収されて無くなりやすいところを強い光だと残るからである。

量子中継器一般理論であろうと上記の強い光を用いる「従来の枠組み」であろうと、量子中継には「メモリーと光の間のやりとり」「量子状態スワッピング」「量子状態の蒸留」の三つの要素技術が必要である。これまでにはこの三つの要素技術のそれぞれが別個に研究されていたが、候補者がこの博士論文で提案する遠隔非破壊パリティ測定法はそのどれにも使えるものである。これは、ただでさえ難しい量子回路の種類を減らす極めて有用なものである。そればかりでなく、長距離量子通信以外に量子計算にも用いることができる画期的なものである。本論文では話題の拡散を避けメインの目的である長距離量子通信理論を中心に展開している。

以上の成果は、既にPhysical Review Aに2本論文掲載されているが、さらに1本原稿がほぼ完成しており、1～2週間のうちに投稿する予定である。また海外からの招待講演が2件あり、国内での招待講演もこなしている。候補者は物理と数学に長けており、物理的直観と数学的厳密性の両方を要求される本研究をよく展開させた。実験的実現性についても理解しており、理論家の陥りやすい非現実的理論展開が避けられている。発表はわかりやすく構成されており、質問への受け答えはスムーズであった。研究テーマの発掘・研究推進・発表・議論等の能力は博士号の授与を受けるものとして十分であると考えられる。

以上から、本論文は博士（理学）の学位論文として価値のあるものと認める。

[1] H. J. Briegel, W. Dür, J. I. Cirac, and P. Zoller, Phys. Rev. Lett. **81**, 5932 (1998).

[2] L. M. Duan, M. D. Lukin, J. I. Cirac, and P. Zoller, Nature **414**, 413 (2001).

[3] B. Zhao *et al.*, Phys. Rev. Lett. **98**, 240502 (2007).

[4] Z-B. Chen *et al.*, Phys. Rev. A **76**, 022329 (2007).