

時間領域多重2次元大規模連続量クラスター状態生成とその応用に関する研究

Study on time-domain-multiplexed 2D continuous-variable cluster states and its application to large-scale quantum information processing

課題番号：18H05207

古澤 明 (FURUSAWA, AKIRA)

東京大学・大学院工学系研究科・教授



研究の概要：本研究代表者らが世界で初めて成功させ今や世界標準となった連続量量子テレポーテーションを、大規模一方量子計算に応用するとき、量子もつれリソースとして2次元大規模連続量クラスター状態が必要になる。この2次元クラスター状態を、本研究代表者らが世界で初めて実現に成功した時間領域多重の手法を用いて生成する。

研究分野：量子コンピュータ

キーワード：量子情報

1. 研究開始当初の背景

次世代の情報通信・情報処理技術として、量子情報通信・量子情報処理（量子コンピュータ）が世界中で精力的に研究されている。これは従来のコンピューターが微細加工、発熱、消費電力の観点から、これまで続けてきた発展を今後も続けるのが非常に困難だからである。そして近年の精力的な研究開発の結果、この分野で大きな進展があったが、未だに小規模な量子情報処理の成功にとどまっている。

2. 研究の目的

大規模量子計算を行う方法として、一方向量子計算モデルが知られている。一方向量子計算モデルではまずクラスター状態を生成する。ここで一方向量子計算とは、量子ゲート（量子演算）に相当する量子テレポーテーションを連続的に行い、大規模量子計算を行うことである。本研究代表者らが世界で初めて成功させ、今や世界標準となった連続量量子テレポーテーション(A. Furusawa et al., *Science* **282**, 706 (1998)、平成29年10月現在の被引用回数1886回)を、大規模一方量子計算に応用するとき、その量子もつれリソースとして2次元大規模連続量クラスター状態が必要となる。本研究ではこの2次元大規模連続量クラスター状態を、図1で示した本研究代表者らが世界で初めて実現に成功した時間領域多重の手法(S. Yokoyama et al., *Nature Photonics* **7**, 982 (2013))を2次元に

拡張することで生成する。さらに、本研究代表者らが発明したアダプティブヘテロダイン測定(K. Miyata et al., *Phys. Rev. A* **93**, 022301 (2016))と、このクラスター状態を組み合わせたユニバーサル量子計算法を開発する。これらが実現すれば、大規模量子コン

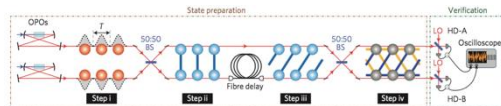


図1 本研究代表者らが世界で初めて実現に成功した時間領域多重の手法(S. Yokoyama et al., *Nature Photonics* **7**, 982 (2013))。時間無制限大規模1次元連続量クラスター状態の生成に成功。

ピューター実現に向けた大きな一歩となる。

3. 研究の方法

図2の方法で、2次元大規模連続量クラスター状態を生成する。

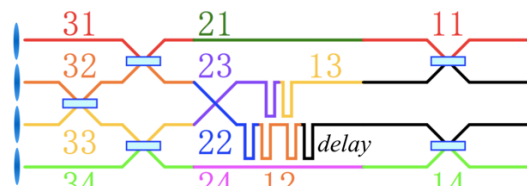


図2 4つのスクイーズド光（楕円で表示）とビームスプリッターおよび光学遅延により時間無制限2次元大規模連続量クラスター状態を生成。

4. これまでの成果

図2で示したセットアップを、図3に示したように実験が最もやり易いかたちに改良し、図4で示した写真のように実現した。そして、時間無制限2次元大規模連続量クラスター状態生成に成功した。その論文はScience誌に掲載された(W. Asavanant et al., Science 366, 373 (2019))。

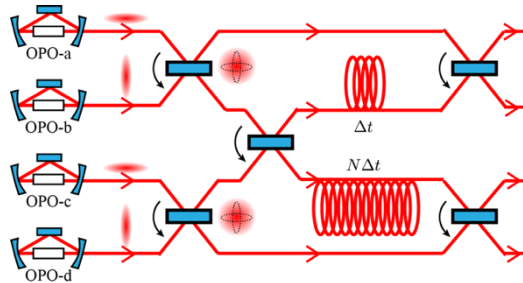


図3 図2のセットアップを実験が最もやり易いように改良。



図4 図3のセットアップを実現。時間無制限2次元大規模連続量クラスター状態の生成に成功。

図2の3列目にある光学遅延(delay)を光パルスの時間幅の5倍とすると、6ノードのスパイラル状の連続量クラスター状態となるが、改良した図3のセットアップでは、5ノードのスパイラル状の連続量クラスター状態となる。このように1ノード減ってしまうが、図3のセットアップとすることにより、大きなメリットがある。図3のセットアップは2列目と3列目の間のビームスプリッターを挟んで、図2のセットアップを単純に2倍しているだけであり、これまでの制御法を多少改良するだけである。実際、1列目と2列目のみで1次元クラスター状態生成の実験を行い、次に3列目と4列目のみで1次元クラスター状態生成の実験を行い、最後に2列目と3列目の間のビームスプリッターを用いて2次元クラスター状態生成実験を行った。このよう

にシステムティックに行うことができ、制御も非常に容易となる。

5. 今後の計画

ここまでは波長 860nm の光源を用い自由空間で実験系を構築してきたが、ここからは光源を通信波長帯 (1550nm) に変え光ファイバー光学系を用いて実験系を構築して行く。そうすることにより、コンパクトで長時間安定な実験系を構築し、さらに大規模化した2次元クラスター状態を生成する。今回生成に成功した2次元クラスター状態のサイズは 5×5000 パルスであったが、今後は 100×10000 パルス規模の2次元クラスター状態生成を目指す。

時間領域クラスター状態を用いた一方向量子計算は、これまで行われたことはない。本研究では、世界で初めて時間領域クラスター状態を用いた一方向量子計算を実現する。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

1. W. Asavanant, Y. Shiozawa, S. Yokoyama, B. Charoensombutamon, H. Eamura, R. N. Alexander, S. Takeda, J. Yoshikawa, N. C. Menicucci, H. Yonezawa, and A. Furusawa*
"Generation of time-domain-multiplexed two-dimensional cluster state"
Science 366, 373-376, 2019
2. S. Kato, N. Német, K. Senga, S. Mizukami, X. Huang, S. Parkins, and T. Aoki*
"Observation of dressed states of distant atoms with delocalized photons in coupled-cavities quantum electrodynamics",
Nature Communications 10, 1160, 2019).
3. K. Takase, M. Okada, T. Serikawa, S. Takeda, J. Yoshikawa, and A. Furusawa*
"Complete temporal mode characterization of non-Gaussian states by dual homodyne measurement"
Phys. Rev. A 99, 033832, 2019
4. Y. Hashimoto, T. Toyama, J. Yoshikawa, K. Makino, F. Okamoto, R. Sakakibara, S. Takeda, P. van Loock, and A. Furusawa*
"All-optical storage of phase-sensitive quantum states of light"
Phys. Rev. Lett. 123, 113603, 2019

他論文発表 13 件

7. ホームページ等

<http://www.alice.t.u-tokyo.ac.jp/index.php>