



Title	Linear optical quantum information processing with high dimensionality of photons
Author(s)	山崎, 友裕
Citation	大阪大学, 2023, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/92219
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

論 文 内 容 の 要 旨

氏 名 （ 山 崎 友 裕 ）	
論文題名	Linear optical quantum information processing with high dimensionality of photons (光子の高次元性を用いた線形光学量子情報処理)
論文内容の要旨 光子は、高速で伝搬し室温で動作するという性質から量子情報処理に不可欠なものである。線形光学素子を用いて光子を操作する上でのリソース効率やエラー耐性をさらに向上させていくことが、実用的な大規模量子情報処理を実現するためには必要となる。そのためには、光子を単純に量子ビットとして扱うのではなく、光子の持つ全ての自由度を有効活用することが重要だと考えられる。このような動機から、本論文では、周波数多重化された量子もつれ光子対の生成実験、時間-周波数自由度を用いた新しい量子計算方式の提案、および線形光学回路を解析する新しい枠組みの提案という三つの側面から線形光学量子情報処理の研究を行った。第一に、1000以上の周波数モードを持つ周波数多重偏光エンタングル光子対の生成を行った。これは、非線形光学導波路共振器における単一共振器増強自発的パラメトリック下方変換と、サニャック干渉計を用いた偏光エンタングルメント生成を組み合わせることで実現される。さらに、これらの光子対を応用して、波長分割多重エンタングルメント配送実験の実証を行った。第二に、単一光子周波数コムに量子ビットを符号化した線形光学量子計算方式を提案した。状態生成器、時間分解検出器、ビームスプリッター、光インターリーバを用いることにより、ユニバーサルな量子計算が可能であることを示した。この方式は、高速スイッチや電気光学変調器のようなアクティブなデバイスを必要とせず、主に検出器の有限な分解能に起因する時間的なエラーや周波数的なエラーに対してロバストである。この方式におけるエラーの量を見積もることで、フォールトトレラント量子計算に必要な実験技術が現在の最先端技術でほぼ達成可能であることを示した。第三に、線形光学回路を解析するための群論的な枠組みを提案した。これによって、線形光学素子を用いた状態識別に関する効率的に計算可能な公式が導かれる。次に、補助的な単一光子を用いたベル状態識別の方式を提案しこの枠組みを用いて解析を行なった。補助光子の数を増やすと、光子数が28個の時にベル状態識別の成功確率が最大値 $403/512 \approx 0.787$ をとる。一方で、対応する2量子ビットの測定は漸近的に最大エンタングル測定に近づく。	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 （ 山 崎 友 裕 ）			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教 授	山本俊
	副 査	教 授	関山明
	副 査	教 授	藤本聡
論文審査の結果の要旨 本学位論文は量子ネットワークや量子コンピュータを可能にする大規模な量子情報処理を実現するために、光子の内部自由度の高次元性に着目し、量子状態の生成、制御、測定を含む線形光学量子情報処理の実験および理論的手法を研究したものである。光子は室温において量子状態を保持することができる唯一の物理系であり、量子情報処理に有望な物理系の一つである。光子の量子状態として、偏光などの2次元の内部自由度を利用することが一般的であるが、より高次元の内部自由度を利用することで、さらなる大規模化が期待できる。しかし、理論的にも実験的にもその手法は未開拓であった。まず、高次元の内部自由度を実現する物理的方法として、周波数多重化に着目し、周波数多重化された量子もつれ光子対の生成手法を着想し、非線形光学導波路共振器における単一共振器増強自発的パラメトリック下方変換とサニャック干渉計を用いて実証実験に成功した。この実験では、1000以上の周波数モードによる高次元化を実現している。さらに、光ファイバー通信で利用可能な波長分割多重量子もつれ配送実験に成功した。さらなる高次元性をもつ時間-周波数自由度を利用した量子情報処理として、単一光子周波数コムに量子ビットを符号化した線形光学量子計算方式を理論的に提案した。提案した手法において万能量子計算が可能であることを示し、主たるエラー要因である光子検出における有限な分解能に起因する時間領域および周波数領域のエラーを考慮して、それらのエラーに対して耐性があることを明らかにした。さらに、この手法におけるエラー量を見積もり、誤り耐性量子計算に必要な精度を現在の技術で達成可能であることを明らかにした。また、高次元性を利用した線形光学回路を解析可能とする群論的な新理論を確立した。その有用性を示す例として、状態識別に関する線形光学回路を効率的に計算可能な公式が導かれ、ベル状態識別効率の記録を更新するに至った。以上の実験及び理論研究は新規性が高く、学術的に重要なものであり、博士（理学）の学位論文として価値のあるものと認める。			