

戦略的創造研究推進事業 CREST  
研究領域「量子状態の高度な制御に基づく革新的  
量子技術基盤の創出」  
研究課題「波長分割多重プログラマブル大規模  
量子シミュレータ」

研究終了報告書

研究期間 2018年 10月～2023年 3月

研究代表者: 神成 文彦  
(慶應義塾大学工学部、教授)

## §1 研究実施の概要

### (1) 実施概要

光の空間モードを用いたボゾンサンプリング回路に代わり、フェムト秒レーザーパルスのスペクトル内に離散的に定義できる独立制御可能な複数の周波数モードを量子演算に用いることが本研究のスタートにおける提案である。この提案を実現するための要素技術として、周波数多重量子モードの発生と制御、および任意にそれらの量子モードを混合できる要素技術を開発し、それらを統合することで分子のフランクコンドンファクター(FCF)を計算できるボゾンサンプリング光学系を構築し演算プロトコルを実証することが本研究の骨子である。慶應義塾大学(神成グループ)と情報通信機構(武岡グループ)が共同して取り組む研究プロジェクトとしてこれらを進めた。

神成グループでは、フェムト秒レーザーパルスの周波数域に多数のスクイーズドモードを独立に制御して発生させ、かつ任意にそれらのモードを混合するための新しい手法を、分極反転非線形光学結晶の位相整合工学を用いることで、これまで前例のない量子演算方法論を実験装置として構築し、実証実験することをコアのテーマに据えて研究を進めた。ただし、実際のボゾンサンプリング計算のプロトコルを考えた際、実験系における光学損失の影響を後処理で補正する必要があるとともに、モード数  $N$  が大きくなった際に現実的光学系で実装できるかどうかという点が研究スタート時には未解決であった。そこで、この課題を新たなプロトコル開発で解決しようというのが、武岡グループの理論研究テーマであった。一方、フェムト秒レーザーパルスの周波数域量子モードを特殊なボゾンサンプリング以外にも応用することができれば、新たな研究展開が可能になるはずだと考え、量子通信などの量子情報処理に周波数域量子モードを活用するアイデアを提案・実証する実験研究を武岡グループの実験研究課題と位置付けた。この実験研究には、神成グループの超高速レーザー光学技術で支援するという連携を行ってきた。

この連携で得られた最も大きな成果は、武岡グループが考案した新しいボゾンサンプリングプロトコルと数値モデルでの実証である。FCF のようなスパース性の高い解空間問題の場合、ボゾンサンプリングの大きなユニタリー変換行列を順次処理していく必要はないというアイデアであり、この結果、ボゾンサンプリング光学計測結果を光学損失に関して補正する過程が極めて簡素化され、さらには、光学系でカスケードに量子モード間の演算するステップ数を  $N$  段からわずか 2 段に激減することができた。この新しいプロトコルにより、ボゾンサンプリングの光学設計を極めて現実的なものにすることができた。

一方、神成グループの要素技術開発研究においては、フェムト秒レーザーパルスを高精度に操作できるという理想的な描像を実験で実現することは非常に難易度が高かったことは否めない。技術的誤算は、波長 1550nm の超短パルススクイーズド光(ボゾンサンプリングの入力)とユニタリー変換を実施するための可変ゲートパルスである波長 775nm の超短パルス光を周波数モード毎に独立の和周波混合できるバルク分極反転光学結晶が入手できなかった点である。幸い、企業等との共同研究で導波路型結晶として製作できたことで、研究の遅延はあったものの課題突破することができた。ただし、導波路を用いる場合、光結合効率の課題は残った。一方、複数の超短パルス(周波数モード)を、位相相関を維持して正確に重ね合わせるためには、空間モード、振幅・位相(群速度分散および遅延時間)、さらにはパルスの繰り返し周波数(タイミングジッタ)を超高精度で制御・安定化する必要がある。この高度な要求のもとで、複数の離散的周波数モードにある真空スクイーズドパルスの発生と制御を実現することができた。周波数軸上で重ならない離散的モードで実現したこの成果は先行例のないものである。一方、量子モードを混合する量子パルスゲート実験においては、主として波長 775nm のマスターレーザーのタイミングジッタの劣化が実証実験の成功を大きく左右した。周波数モードとはいえ、モード混合は超短パルス時間モードでの混合と等価であるため、光源のジッターノイズのみならず光路の揺らぎを補償しなくては精度の高いモード混合はできない。本研究の最終実験として、周波数多重量子モードの発生および任意にそれらの量子モードを混合できる要素技術を統合した実験を行うに至ったが、その演算精度を議論できるだけの結果には至らなかった。

一方、武岡グループの実験では、慶應グループのフェムト秒レーザーパルス整形技術を導入することで、周波数コムを用いた世界最高レートでの単一光子生成および二光子干渉という基盤技術で世界最高の成果を得ることに成功した。さらに、GHz 周波数コムを用いて波長多重 qudit 光を発生しその量子状態を評価する新しい量子状態トモグラフィ手法の考案にも至り、原理実証実験でその妥当性を検証することができた。

## (2) 顕著な成果

< 優れた基礎研究としての成果 >

### 1. 離散的周波数モードを用いた多重真空スクイーズドパルス光の発生と個別制御

概要:

波形整形した波長 755nm のフェムト秒レーザーで励起した Type-II PPKTP 結晶のパラメトリック下方変換により、波長 1550nm のフェムト秒レーザーパルスの広いスペクトル内に離散的な複数の真空スクイーズドモードを発生し、かつ励起レーザーパルスの振幅・位相特性で制御できることにはじめて成功した。制御可能な量子論的周波数モードの発生方法として応用が期待できる。

### 2. 周波数干渉を用いた周波数モード量子状態の任意混合法の開発

概要:

複数の周波数モードを任意に混合する手法として、周波数域干渉を多段に行った後に各波長毎に分光計測する手法を提案し、2モードでの実証実験を行った。これは、周波数域 Hong-Ou-Mandel(HOM)型二光子干渉実験に対応し前例のない成果である。非線形光学を用いない本手法で周波数モードを任意混合できることから、周波数モードを用いたボゾンサンプリングのための新しい手法として応用が期待できる。

### 3. ボゾンサンプリング問題の量子-古典境界領域の解明

概要:

ボゾンサンプリングにおいて解が極度にスパースであることを仮定できる場合、古典計算でも問題が効率的に解けることを具体的なアルゴリズムにより示した。これは解に条件付けをしていくことで、古典計算が計算困難な問題から可能な問題へと変わる例であり、ボゾンサンプリングにおける量子-古典の境界領域の存在を明らかにした。また、ボゾンサンプリングとイジングモデルの類似性も発見し、各種量子シミュレーションの基本的性質の一端を明らかにした。

< 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

### 1. 光パルスを用いた量子演算用の type-II PPLN 導波路作製

概要:

通信波長と近赤外波長の光信号を用いた 2 次の非線形光学効果を変換効率の高い分極反転結晶を用いて実現するには反転周期が短いためにバルク結晶では実現が非常に困難である。我々は、リッジ型導波路構造で Type-II PPLN 結晶を設計し、日本碍子(株)に作製を依頼し、波長 1550nm と 755nm パルスの 100%和周波混合変換可能な結晶を開発し、位相整合特性も詳細に計測した。光結合効率も 61%を実現しており、量子情報処理用の光学素子として応用が期待できる。

### 2. 周波数コム光源を用いた世界最高レートの伝令付き単一光子生成

概要:

高繰り返しモード同期周波数コムと波形整形技術による周波数コムインターリーバ技術を活用し、繰り返し周波数 50GHz 励起の超高速単一光子源を開発し、さらにマルチピクセル型超伝導光子検出器を用いることにより、世界で初めて 20Mcps (count per sec)を超える伝令付き単一光子生成レートの実現に成功した。さらに、世界最高速の励起レート(3.2GHz)での二光子干渉実験にも成功し、量子通信技術の発展に大きく寄与した。

### 3. 圧縮センシングを活用した、ボゾンサンプリング系の簡略化・損失補正手法の確立

概要:

解にある程度のスパース性を仮定できるボゾンサンプリングにおいて、圧縮センシングで事後処理することにより、量子測定を著しく簡略化でき、かつある程度の損失を補正できる実際的手法の理論を確立した。さらに、分子振動スペクトル計算についての数値計算を行いその有用性を示した。本手法の適用により、今後の量子シミュレーション技術開発の加速が期待できる。

< 代表的な論文 >

#### 1. “Independently programmable frequency-multiplexed phase-sensitive optical parametric amplification in the optical telecommunication band” Optics Express 29, 21683-21697 (2021).

概要:

波形整形した波長755nmのフェムト秒レーザーで励起したType-II PPKTP結晶のパラメトリック下方変換により、波長1550nmのフェムト秒レーザーパルスの広いスペクトル内に離散的な複数の真空スキーズドモードを発生し、かつ励起レーザーパルスの振幅・位相特性で制御できることにはじめて成功した。

#### 2. “Classical simulation of boson sampling with sparse output”, Scientific Reports 10:14739 (2020).

概要:

ボゾンサンプリングにおいて、解が著しくスパースであることが仮定できる場合に効率的な古典計算が可能であることを、圧縮センシングの手法を使って具体的に示した。また、解が適度にスパースである場合のボゾンサンプリングと圧縮センシングのハイブリッドアルゴリズムや、同時測定数が制限されたボゾンサンプリングとイジングモデルとの関連性を指摘し、ボゾンサンプリングにおける量子-古典の境界領域の一端を明らかにした。

#### 3. “Ultra-high-rate nonclassical light source with 50 GHz-repetition-rate mode-locked pump pulses and multiplexed single-photon detectors”, Optics Express 28, 22399 (2020).

概要:

繰り返し周波数50GHzのモード同期周波数コムを励起光源とした単一光子源を開発した。光子検出にマルチピクセル型の超伝導光子検出器を用いることで、20Mcps以上の超高速レートで2次相関関数が1/2以下となる伝令付き単一光子を生成することに成功し、大規模光量子情報処理の有用なツールとなることを示した。また、50Mcps以上のレートにおいても2次相関関数が1以下となる非古典性を確認した。

## §2 研究実施体制

### (1) 研究チームの体制について

「慶應・神成」グループ

① 主たる共同研究者: 神成 文彦 (慶應義塾大学工学部 教授)

② 研究項目

- ・波長分割多重光量子シミュレータの構築

「NICT-慶應・武岡」グループ

① 主たる共同研究者: 武岡 正裕 (慶應義塾大学工学部 教授)

② 研究項目

- ・波長分割多重光量子シミュレータの理論解析
- ・波長分割多重量子制御技術の量子通信への応用

### (2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

本研究において、分極反転周期が  $3.6\ \mu\text{m}$  の type-II PPLN 導波路を作成するにあたり、物材料機構の栗村直氏、および日本碍子(株)との共同研究を行い、サンプル作製までを実施した。

また、デンマーク工科大学(DTU)の U. L. Andersen 教授とは本研究に関連する共同研究を行い、また本研究に参画していた上智大学院生が学位取得後に DTU にポスドクとして採用されたり、DTU の学生を日本側がインターンで受け入れるなど、人材交流も積極的に進めた。レイジアナ州立大学の J. P. Dowling 教授のグループからも学生をインターンとして受け入れ、本研究でも共著論文の成果を挙げている。さらに、本研究の後半においては、理論研究で副次的に考案したボゾンサンプリング型光回路による量子分類器の原理実証実験を香川大学の小野助教(シリコンフォトニクス・量子光学)と連携して実施し、共著論文の投稿に至っている。