

大規模量子計算に向けた時間分解一周波数域ボゾンサンプリングのための HOM

干渉ビジビリティ向上

Improvement of HOM interference visibility for time resolved – frequency domain Boson Sampling
toward large-scale quantum computation

高橋和輝 (B4), 新村星太郎 (M2), 大見聡仁 (M2), 山岸佑多 (B4)

Kazuki Takahashi, Shintaro Niimura, Akihito Omi, Yuta Yamagishi

Abstract

Last year we proposed a new Boson Sampling scheme operated in the frequency domain and demonstrated as the proof-of-principle spectral HOM interference. We modified the experiment with a more efficient way using CFBG and improved the visibility of HOM interference.

1. はじめに

通常の古典論的コンピュータによって行われるような従来の古典論的計算に対し、量子論的特性を駆使した量子計算が提案され話題になって以来、その実現に向けた多くの取り組みがなされてきた[1]。しかし、それらを適切な実用性を持って実現することにはまだ時間が要すると予測されている。そこで、最終的な実現ゴールまでの道標として、古典論的計算においては計算が困難であり、一方量子計算においては比較的容易であるような題材を用いて量子計算の優位性、すなわち「量子超越性」[2]を示そうとする試みがなされた。2011年 Aaronson と Arkhipov によって生まれた提案が「ボゾンサンプリング」である[3]。

ボゾンサンプリングは、入力モード、線形ユニタリー演算、変換後の出力モードによって構成され、様々な入力モードに対し任意の線形ユニタリー演算を施した際に出力モードはどのようなものとなるかを調べるものである。これを理論的に解析した

場合、入力モードから出力モードへの遷移確率はその線形ユニタリー変換のパーマメント計算を含む。パーマメント計算を古典的に実施することは、計算複雑性理論において#P-hard に分類され非常に複雑であり、入力モードの次元が増加するに従い必要な計算時間が指数関数的に増加してしまう[4]。よって、この古典論的計算では困難な状態を量子的に計算することが出来れば、一種の量子超越性を示したことになる。今日に至るまで、古典論的アルゴリズムによる解析可能性と量子論的な解析可能性との間で競われてきた。特に、入力モードとして光子、線形ユニタリー変換としてビームスプリッターと位相シフタを組み合わせた線形量子回路[5]と出力測定法として光子の検出を用いた量子測定手法との組み合わせが適しているとして多く採用され、計算複雑性を崩さないままボゾンサンプリングの形態を少しずつ変化させながら、量子超越性を示すための数々の実験が行われてきた[6-8]。一方、昨年、Google のグループによりゲート型の量子計算機によって量子超越性を実際に示したとする論文が投稿され注目を集めた[9]。

ボゾンサンプリング問題は量子超越性を示す題材であったが、位相シフト量を自在に変化させ任意の線形ユニタリー変換を施すことができるという点で、その現実における実用性が非常に高く、分子振動状態の遷移解析など、線形ユニタリー変換として表されやすい多くの物理事象に対する応用が期待される。[10,11]

昨年度、度我々は、従来のビームスプリッタ・位相シフタを用いた空間域干渉とは異なる新手法として、周波数域干渉法を提案し、その原理実証となる Hong-Ou-mandel (HOM)干渉[12]を実験し、HOM干渉の精度を表すビジビリティが古典限界である50%を超えことをはじめて実証した[13]. 本手法は、空間域干渉から周波数域干渉に落とし込むことによって、干渉する2光子を同じ光軸上に置くことができるため実験系が空間的に大規模化してしまうことを抑えられ、またその結果光学素子の使用量を減らしロスを減少させることが期待される。

一方、昨年の実験系では、周波数を2-f分光系により空間分解しており、装置のコンパクト化と光学的損失の低減において改善の余地があると我々は考えた。そこで本年度は、群速度分散素子である chirped fiber Bragg grating (CFBG)を用いることによって2光子の周波数を同じ光軸上で時間分解し、さらなる効率化に改善することを試みた。一方でこの方法では、分解された光子同士の重なりが空間分解と比較して大きく、分解能が低下することにより最終的に得られるビジビリティの劣化が危惧される。

最初に、昨年度と同様の空間分解-周波数域 HOM干渉実験におけるビジビリティの向上から行った。

2. 基礎理論

2-1. 光学素子によるボゾンサンプリングの実行とその複雑性[15]

図1のように、入力モードと出力モードがそれぞれ m モードであり、ビームスプリッタと位相シフタで構成された線形ユニタリー演算量子回路を考える。

入力モード、出力モードにおける光子数をそれぞれ s_i, t_i とし、その状態をそれぞれ $|S\rangle = |s_1 s_2 \dots s_m\rangle$, $|T\rangle = |t_1 t_2 \dots t_m\rangle$ とする。また、各ビームスプリッタの反射率と位相シフト量によって決まる、回路のユニタリー変換を U とする。この時、ある入力状態からある出力状態へ遷移する確率は次の式で表すこ

とが出来る

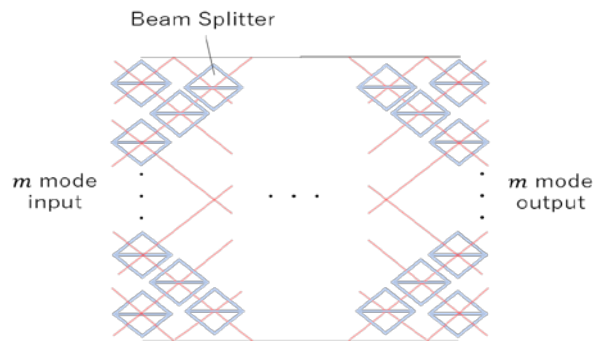
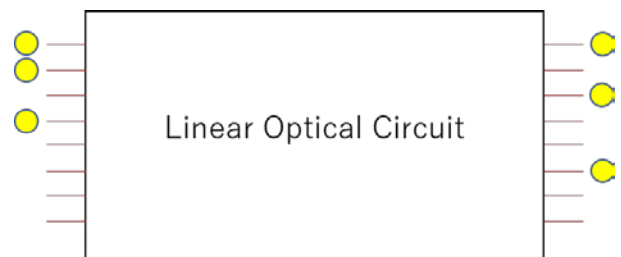


Fig. 1 Schematic of photonic Boson sampling setup. (Phase shifter is placed before the beam splitter.)

$$\Pr[S \rightarrow T] = \frac{|\text{Per}(U_{S,T})|^2}{s_1! s_2! \dots s_m! t_1! t_2! \dots t_m!}$$

ここで、 $U_{S,T}$ は、 $n \times n$ の U の部分行列であり、図2のように U のうち、光子が存在するポート番号に対応する行列を取り繋げたものである。



U_{11}	U_{12}	U_{13}	U_{14}	U_{15}	U_{16}	U_{17}	U_{18}
U_{21}	U_{22}	U_{23}	U_{24}	U_{25}	U_{26}	U_{27}	U_{28}
U_{31}	U_{32}	U_{33}	U_{34}	U_{35}	U_{36}	U_{37}	U_{38}
U_{41}	U_{42}	U_{43}	U_{44}	U_{45}	U_{46}	U_{47}	U_{48}
U_{51}	U_{52}	U_{53}	U_{54}	U_{55}	U_{56}	U_{57}	U_{58}
U_{61}	U_{62}	U_{63}	U_{64}	U_{65}	U_{66}	U_{67}	U_{68}
U_{71}	U_{72}	U_{73}	U_{74}	U_{75}	U_{76}	U_{77}	U_{78}
U_{81}	U_{82}	U_{83}	U_{84}	U_{85}	U_{86}	U_{87}	U_{88}

Fig. 2 Submatrix in Permanent calculation corresponding to red elements.

このパーマネント計算とは、行列式の計算のマイナス符号を全てプラスにしたものと捉えることが

できる. 計算複雑性理論においては, このパーマネント計算を古典計算によって行うことは#P 困難クラスに相当し, 入力モード数が増えるにつれ指数関数的に計算時間が増えてしまうような特性を持っている.

2.2 空間域 HOM 干渉

光学的ボゾンサンプリングを考えた時, その最も基礎となっているものが HOM 干渉である. ボゾンサンプリングにおいては複数のビームスプリッタを使用しているが, 一つのビームスプリッタの2入力にそれぞれ光子を入れた時の出力状態に起きる現象が空間域 HOM 干渉である.

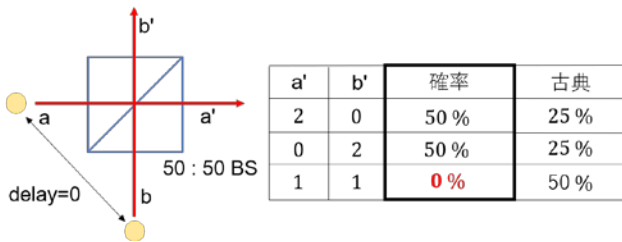


Fig. 3 Schematic of spatial HOM interference between photons with no delay.

理想的には, 出力状態は必ずどちらかのポートに2光子出力される. しかし現実の実験系においては光子の純粋度が低い, あるいは検出器のダークカウントや検出効率などによって, 2ポートで1光子ずつ同時検出(コインシデンスを取るという)される確率が生じてしまう.

そこで, 実験においてはビジビリティを定義し, HOM 干渉の精度の指標としている. 入力2光子のディレイが0となった場合には HOM 干渉が起こり, ディレイが離れていくにつれて光子間干渉が弱まり干渉が起こらなくなる. 結果, 出力2ポートを光子検出器につなぎ, コインシデンスを取った場合のみ取得すと, 図4のような結果が得られる.

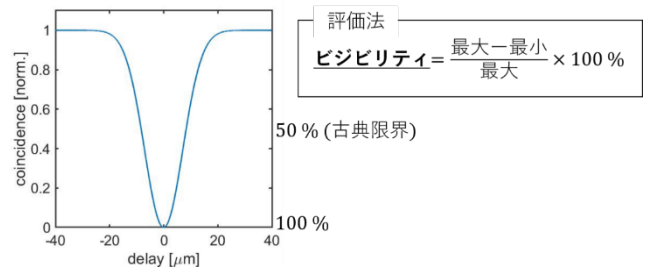


Fig. 4 HOM dip obtained by changing delay.

HOM 干渉の精度はこのディップ深さを指標として図ることが出来, この深さをビジビリティとして定義する.

2.3 周波数域 HOM 干渉

上記のような HOM 干渉を周波数域において実現することが出来ることが昨年度提案され, 実証された. 図5に実験概念図を示す.

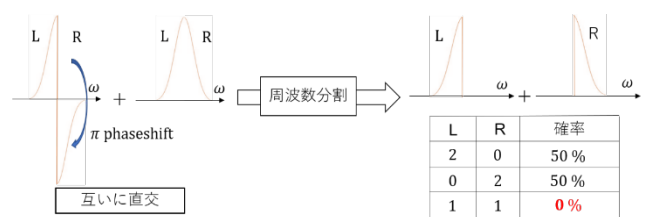


Fig. 5 Schematic of frequency domain HOM interference.

図5左のように直交したスペクトルを持つ光子対を生成し, ディレイを合わせる. それらを2-f分光系などにより周波数分割し, 図5右のようなスペクトルに空間分割する. この時, 空間域 HOM 干渉と同様の現象が起こる. すなわち, 最初に用意した2つのスペクトルが入力モードに, 周波数分割されたスペクトルが出力モードに対応し周波数域 HOM 干渉を起こす.

さらに空間域の場合と同様にして周波数域 HOM 干渉の入力モードを拡張することによって, 集ハウス域ボゾンサンプリングが実現する. 例えば, 図6左のような14モード分割された直交スペクトル光

子対に対して同様に周波数分割を行い, 出力モードを計測すると, 図 6 左図の, 通常的空間域ボゾンサンプリングと等価の結果が得られる。

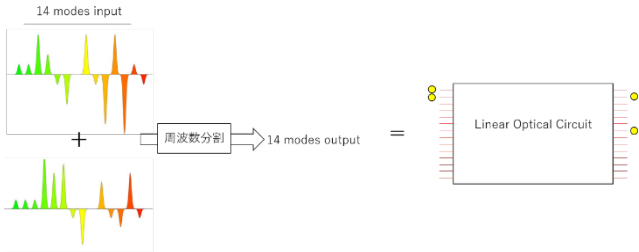


Fig. 6 Schematic of frequency domain Boson sampling.

3. 実験セットアップの改良と結果

3.1 CFBG を用いた時間分解—周波数域ボゾンサンプリングの提案

昨年度は周波数分割法として $2-f$ 分光系とミラーによる周波数分割を行っていた。

そこでより効率の良い手法として CFBG を用い

た時間分解による周波数分割を用いたボゾンサンプリングを提案した. CFBG の構造を図 7 に, 今回の時間分解法を図 9 に示す。

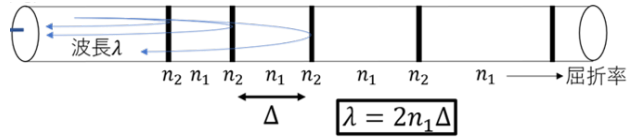


Fig. 7 Structure of CFBG

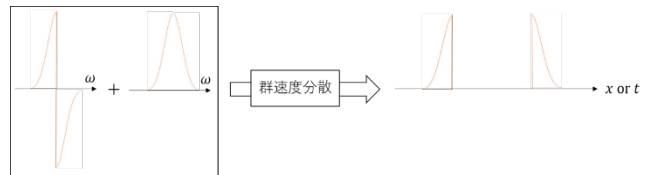


Fig. 8 Schematic of temporal separation of different frequency modes by CFBG.

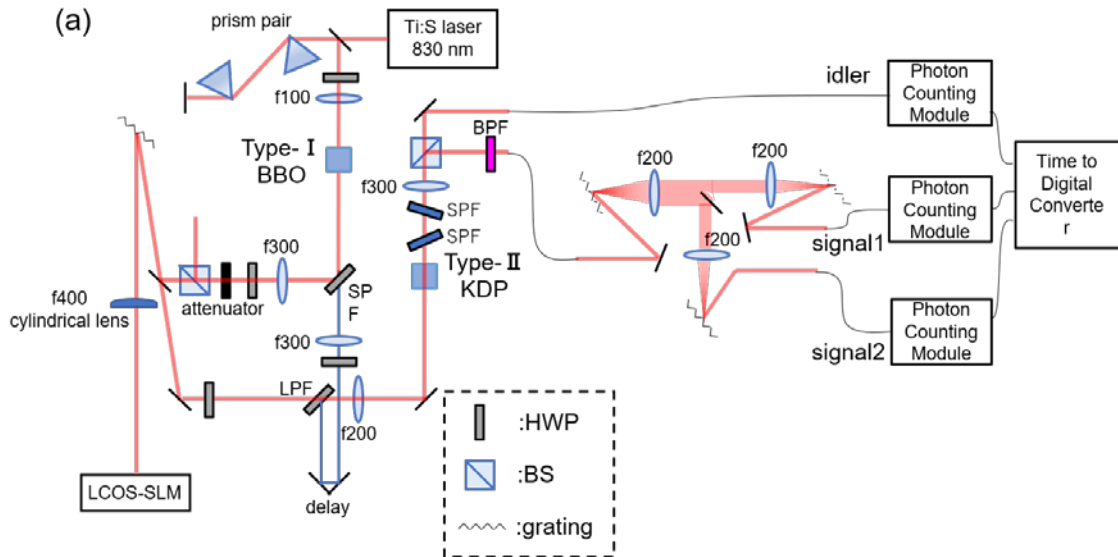


Fig. 9 Modified experimental setup of frequency-domain HOM interference.

CFBG はファイバー内部に周期的な屈折率分布を形成したものであり, その周期間隔は位置によって変化していく. この周期間隔に応じて各波長の反射

率が変化することによって, 反射後の光に対して群速度分散を乗せることができる. CFBG のような群速度分散を持つ媒質を通すことによって, 2 出力モ

ードは同一光軸上,あるいは同一時間軸上に離れて並ぶ. すなわち時間分解されるので, 同一の検出器で検出が可能であり, 空間分解のように周波数モード増加に従い光学系を拡大させる必要がない.

3.2 HOM 干渉のビジビリティ向上

昨年度の実験からビジビリティを向上させるために図9のような系を組み, 実験を行った. 変更点は, ミラーを全て誘電体ミラーから低分散ミラーに変更した事と, 時間分解分光系の前に BPF を入れたことである.

レーザー光源として 830 nm フェムト秒レーザー (Maitai HP, Spectra Physics, 繰り返し周波数 80 MHz, パルス幅 100 fs) を用い, それをプリズム対により分散補償された状態で長さ 0.5 mm の Type-I BBO 結晶 (EKSPA OPTICS) に集光し 415 nm SHG 光を発生させた. それを Type-II KDP 結晶 (EKSPA OPTICS) に入射し, 自発パラメトリック下方変換 (SPDC : Spontaneous Parametric Down Conversion)[14] を起こ

し, 光子対を生成した. 結晶後には必ず SPF を置き, 透過するポンプ光を完全にカットした. SPDC は SHG の逆過程であり, 入力光子に対して半分のエネルギーを持つ光子を 2 つ生成する. Type-II 位相整合では必ず直交偏光で生じる為, 偏光ビームスプリッター (PBS : Polarizing beam splitter) によって分割することが可能である. 一方の光子はアバランシェ単一光子検出器 (Perkin Elmer, SPCM-AQR-14-FC) で検出され, もう一方の光子の存在が自明となり, もう一方の光子が単一光子源として利用することができる (ヘラルディングという). [15]

HOM 干渉に必要な光子源のもう一方は, 元の光源である 830 nm コヒーレント光とした. 本来はこちらも SPDC 光子源とするのが好ましいが, 光子生成レートが低く測定の現実性に乏しいため, コヒーレント光とした. コヒーレント光を LCOS-SLM (Liquid Crystal on Silicon - Spatial Light Modulator, santec, SLM-100-01-0002-00) に入射し, 所望の

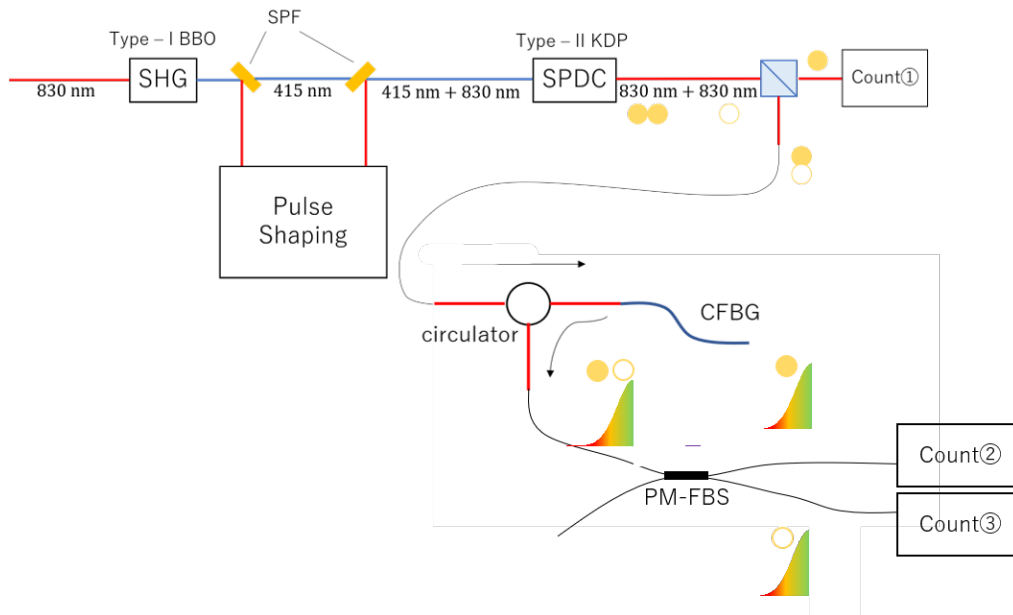


Fig. 10 Experimental setup of time-resolved frequency-domain HOM interference with CFBG

π 反転スペクトルを形成し, アッテネータにより十分パワーを弱めることで光子源として近似的に用

いた. これらを重ね合わせた状態に対し $2-f$ 分光系を用いて周波数を空間的に分解し, それぞれ光子

検出を行った。検出された光子は Time to digital converter (TDC, ID Quantique SA, ID801 – Advanced Time to Digital Converter)に送られ、光子検出と測定時間が対応付けられる。その信号を用いて2つの測定器における到着時間を関連付けコインシデンス検出を行った。

今回、ミラーを低分散ミラーに変更することによって、以前のセットアップで生じていた高次分散を取り除き、光子間の空間モードマッチングを向上させた。さらに、分光系の前に BPF を設置することにより光子の周波数スペクトル幅を一致させ、光子間の周波数スペクトルマッチングを向上させた。さらに光子の純粋度も高めた[13]。結果図 11 のように $74.3 \pm 3.6\%$ のビジビリティが得られ、これまでの結果と比較して9.5%の向上が見られた。

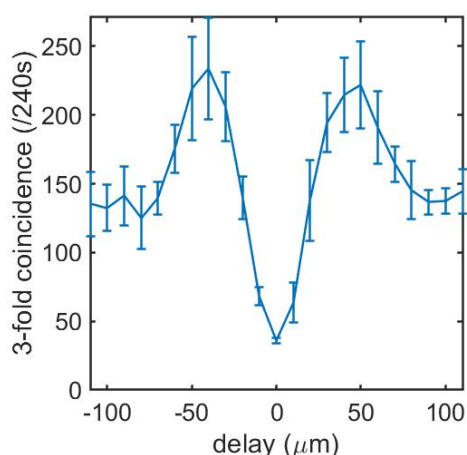


Fig. 11 Measured HOM dip with improved visibility.

3.3. CFBG を用いた時間分解一周波数域 HOM 干渉実験

時間分解一周波数域 HOM 干渉を実証するために図 12 のような実験系を用いた。2つの光子を生成し空間的に重なるまでは、空間分解の場合と同様である。これらを、サーキュレータ (HAPHIT)を利用して CFBG (TeraXion, EP59666-0007, $D2 = 55 \text{ ps/nm}$)に入射させ得られた時間分解光子を PM-FBS (Polarization Maintaining – Fiber Beam Splitter, Thorlab,

PBC780PM-FC)によって分割しそれぞれ検出することでコインシデンスを計測した。検出された光子は TDC に送られ、周波数と時間を対応付けたコインシデンス検出を行った。

本実験において、古典限界 (ビジビリティ50%) を超えるビジビリティを得ることが出来なかった。その原因としては3つ考えられる。まず、光子源として一方を微弱コヒーレント光としていることによりビジビリティが劣化していたことである。二つ目に、CFBG の群速度分散が不足していたことである。今回用いた CFBG の群速度分散は 55 ps/nm であり、用いた光子検出器の時間分解能が 50 ps (FWHM)、TDC の分解能が 81 ps (FWHM)であったため、干渉が古典限界を超える程度に適切に分解されない。実際に時間波形と、光子検出器・TDC の時間分解能によるインパルス応答 (時間分解能を FWHM としたガウシアン波形)を畳み込み、最終出力をシミュレーションすると図 12 のように、2つが完全には分解されず、一部検出確率が被る部分が生じてしまった。この分解能 (正しく分解される割合)は78.0%であり、今回の場合最終的に得られるビジビリティは単純に58.0%にまで制限されることがわかる。分解能をあげるためにフィルタを外して昨年度の条件に戻す方法も行ったが、HOM 干渉ビジビリティが元通りに減少し、最終的に得られるビジビリティは結局61.4%に制限され、改善は得られなかった。理想的には古典限界である50%を超えるはずであるが、検出効率が10%程度と低く、測定時間が非常にかかってしまうことによって、定盤の不安定性等の影響で、最大ビジビリティが得られても長時間保つことが困難であった。

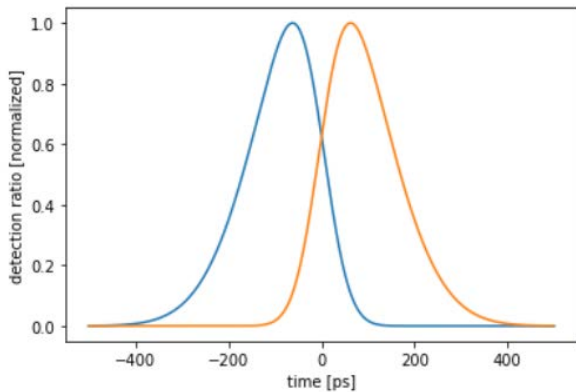


Fig. 13 Overlap of two photons in the time domain.

4. まとめ

これまでの光学的ボゾンサンプリング法の改良案として、CFBGを用いた時間分解-周波数域ボゾンサンプリングを提案し、その準備としてHOM干渉のビジビリティを向上させた。しかし用いたCFBGが適切ではなく期待していた改善は得られなかった。単一光子源同士の干渉を利用しビジビリティを向上させる事に加え、適切なCFBGを用いた干渉実験でのデモが必要である。

References

- [1] F. Flamini, N. Spagnolo, and F. Sciarrino, “Photonic quantum information processing : a review,” *Rep. Prog. Phys.* **82**, 016001 (2019).
- [2] A. W. Harrow and A. Montanaro, “Quantum computational supremacy,” *Nature* **549**, 203-209 (2017).
- [3] S. Aaronson and A. Arkhipov, “The computational complexity of linear optics,” in *Proc, 43rd Annu, ACM Symp, Theory of Comput, A. Press, Ed.*, pp. 333-342 (2011)
- [4] L. Viliant, “The complexity of computing the permanent,” *Theor. Comput. Sci.* **8**(2), 189-201 (1979).
- [5] J. Carolan et al., “Universal linear optics,” *Science* **349**, 711-716 (2015).
- [6] A. P. Lund et al., “Boson sampling from a Gaussian state,” *Phys. Rev. Lett.* **113**, 100502 (2014).
- [7] C. S. Hamilton et al., “Gaussian boson sampling,” *Phys. Rev. Lett.* **119**, 170501 (2017).
- [8] S. Barkhofen et al., “Driven boson sampling,” *Phys. Rev. Lett.* **118**, 020502 (2017)
- [9] F. Arute et al., “Quantum supremacy using a programmable superconducting processor,” *Nature* **574**, 505-510 (2019).
- [10] J. Huh et al. “Boson sampling for molecular vibronic spectra,” *Nat. Photonics* **9**, 615-620 (2015).
- [11] C. Sparrow et al., “Simulating the vibrational quantum dynamics of molecules using photonics,” *Nature* **557**, 660-667 (2018).
- [12] Hong et al., “Measurement of subpicosecond time intervals between two photons by interference,” *Phys. Rev. Lett.* **59**, 2044-2046 (1987).
- [13] 富田雅也, “波長多重プログラマブル線形量子回路の構築,” 慶應義塾大学大学院修士論文 (2018).
- [14] Burnham et al., “Observation of simultaneity in parametric production of optical photon pairs,” *Phys. Rev. Lett.* **25**, 84 (1970)
- [15] Hong et al., “Experimental realization of a localized one-photon state,” *Phys. Rev. Lett.* **56**, 58-60 (1986).