

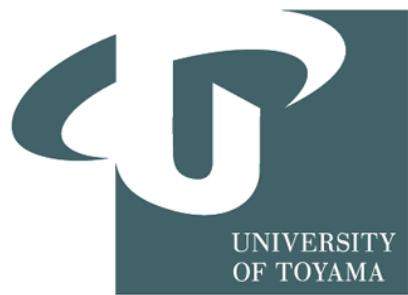
令和7年電子デバイス工学特論の実施について

令和7年度は、最近の光量子コンピューティングを中心とした論文輪読を行うこととした。

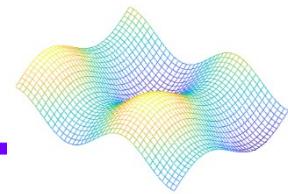
以下、各学生の紹介した内容を示す。

Experimental Quantum Teleportation

量子テレポーテーションの実験的実証



論文の紹介

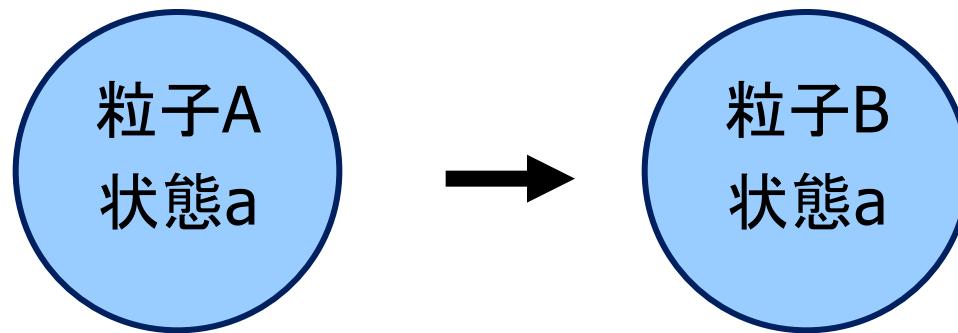


D. Bouwmeester, J-W. Pan, L. Mattle, *et al.*
“Experimental quantum teleportation.”
Nature **390**, 575–579 (1997).
<https://doi.org/10.1038/37539>.

量子テレポーテーションとは

物質そのものではなく、「情報」を転送する技術

量子テレポーテーションとは、量子状態（粒子の持つ情報）を別の場所にある粒子に転送する現象



ゲームなどに登場する「物質の瞬間移動」とは異なり、粒子そのものは移動せず、量子力学特有の性質を利用して「情報のみ」を転送する。

なぜ量子テレポーテーションは重要？

量子技術の未来を切り開く基礎原理

量子テレポーテーションは、量子情報を完全に転送できる唯一の方法であり、量子コンピュータと量子通信の実現に不可欠な基盤技術



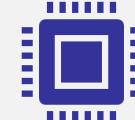
超安全な量子暗号

盗聴が物理的に不可能な通信を実現し、従来の暗号を遙かに超える安定性を提供



量子ネットワーク

量子コンピュータ同士を繋ぐ量子インターネットの実現に不可欠



量子コンピュータ

複数の量子プロセッサを連携させる分散型量子計算を可能に

量子の奇妙な性質

日常の世界とは異なるミクロの世界のルール

量子力学とは、原子や光子などの極小の世界で起こる現象を説明する物理学。私たちの日常感覚では理解しがたい「奇妙な性質」を持っている。



重ね合わせの原理

量子は複数の状態を同時に持つことができます。0と1が同時に存在するような状態



観測による影響

量子を観測すると、その瞬間に一つの状態に収束します。観測行為自体が状態を変える

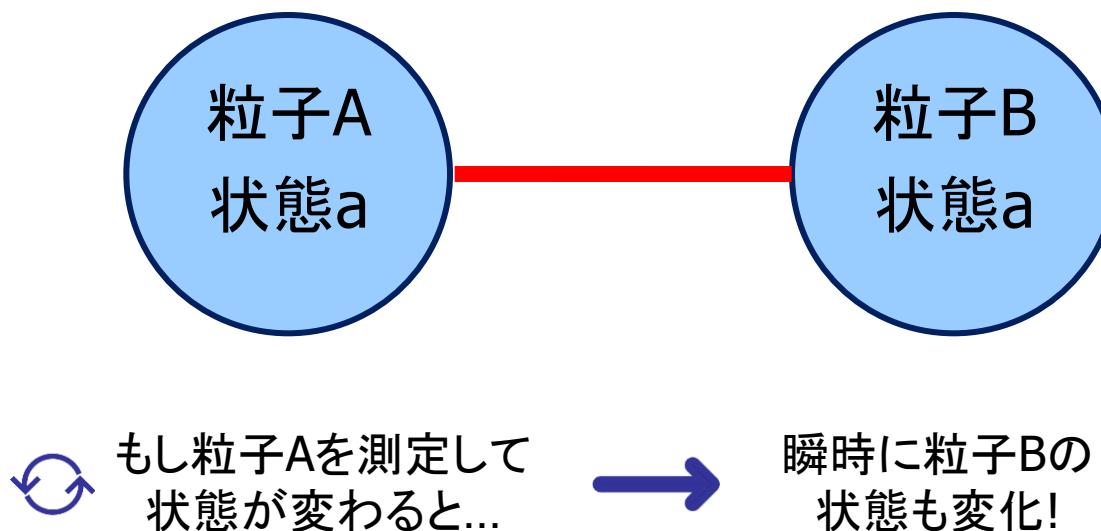


不確定性原理

位置と運動量を同時に正確に測定することは原理的に不可能です。片方を正確に測ればもう片方が不確かになる

エンタングルメントとは

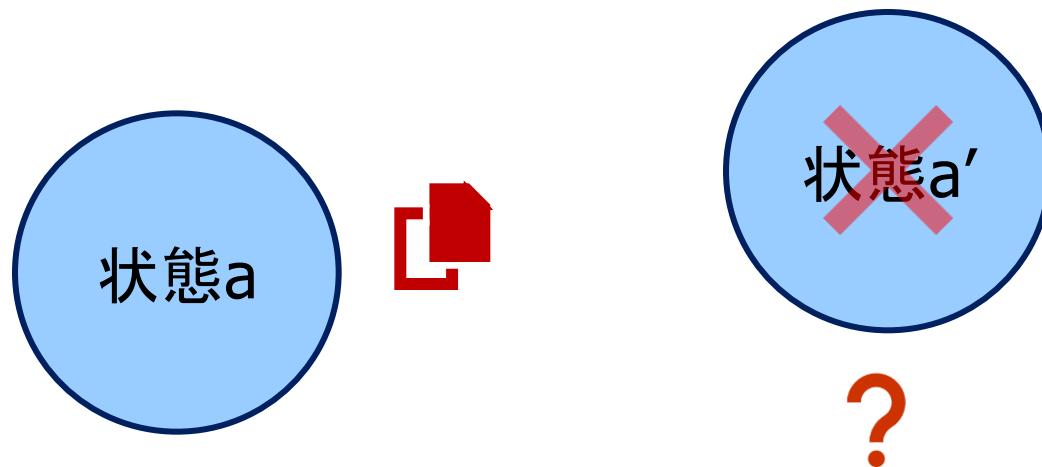
「量子もつれ」-離れていても影響し合う粒子の不思議な関係
二つの粒子が特殊な方法で生成されると、どれだけ離っていても「運命共同体」のように互いに影響し合うようになる。片方の状態を測定すると、もう片方の状態が瞬時に決まる。



量子情報の複製問題

量子情報は直接コピーできない(ノークローン定理)

量子力学では、未知の量子状態を完全に同一のコピーとして複製することは原理的に不可能。これは「ノークローン定理」とよばれる量子力学の基本法則。

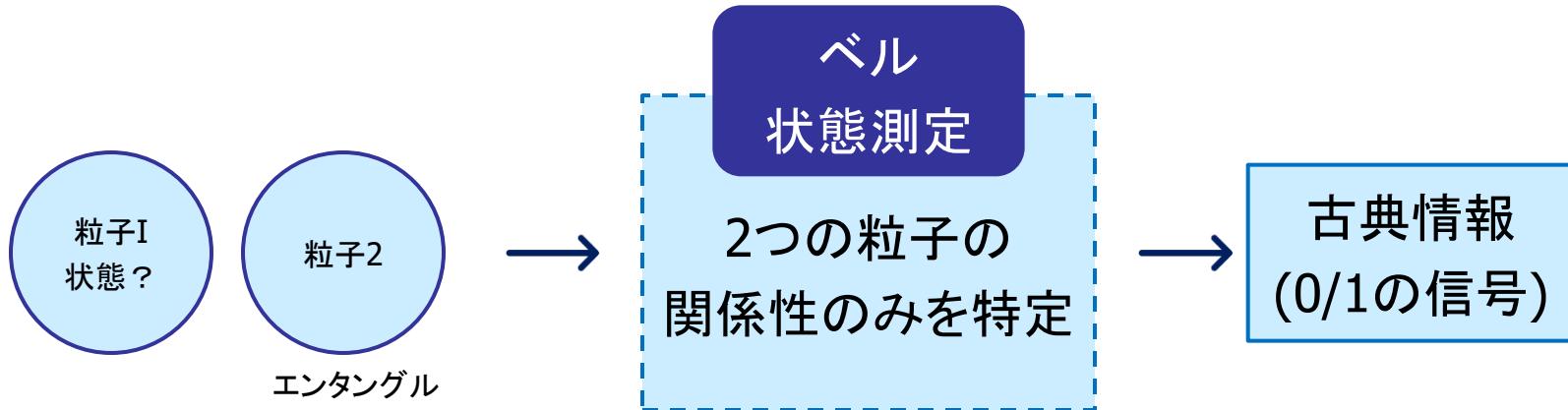


量子状態を測定すると元の状態が変化してしまうため、完全なコピーを作るために必要な情報を得ることができない。これが、通常の「コピー＆ペースト」が量子世界では不可能な理由。

ベル状態測定(BSM)とは？

量子テレポーテーションの核心となる測定技術

ベル状態測定とは、2つの粒子が特定の「絡み合い状態(ベル状態)」にあるかどうかを調べる方法。この測定は粒子の個々の状態ではなく、2つの粒子の関係性だけを測定する。



この測定によって、測定された粒子1と2の個別の量子状態は失われるが、粒子2とエンタングルしていた別の粒子に、粒子1の量子状態が転送される。

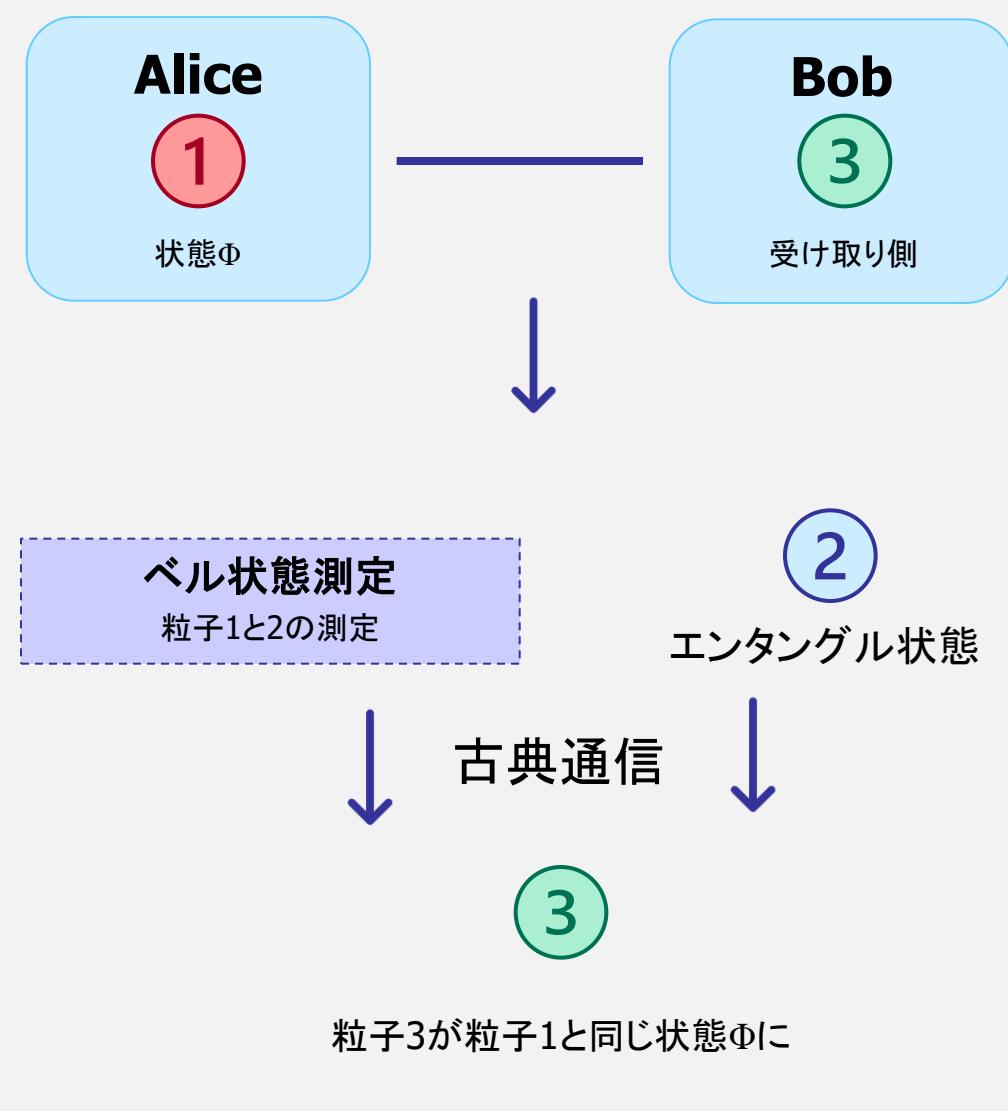
ベルの不等式-質問

「局所実在論」

ベルの不等式とは、量子もつれが古典的説明を超えていていることを検証するための基準。実験でこの不等式が破られることにより、量子力学の非局所的な性質が確認された。

$$|E(a,b) - E(a,b')| + |E(a',b) + E(a',b')| \leq 2$$

量子テレポーテーションの原理



原理の解説

- ① Aliceは、テレポートしたい未知の量子状態 Φ を持つ粒子1を所持
- ② AliceとBobは前もってエンタングル状態の粒子ペア(2と3)を共有
- ③ Aliceは粒子1と2にベル状態測定(BSM)を行う
- ④ この測定によって、粒子1の状態情報は破壊されるが、測定結果には量子状態の情報は含まれていない
- ⑤ Aliceは測定結果を古典的手段でBobに伝える
- ⑥ Bobは測定結果に基づいて粒子3に特定の操作を行うと、粒子3が粒子1と同じ状態 Φ になる

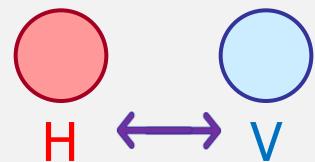
光子ペアの生成

パラメトリックダウンコンバージョンとは



ポンプ光子
(高エネルギー)

タイプIIパラメトリックダウンコンバージョン:1つの高エネルギー光子が2つの低エネルギー光子に分裂

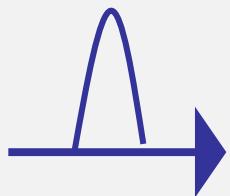


エンタングルした光子ペア

- ① 非線形結晶に高エネルギーの光子(ポンプ光子)を入射させると、低エネルギーの光子ペアに分裂するプロセス
- ② タイプIIでは、分裂した光子ペアは互いに直交する偏光を持つ
- ③ 特殊なパラメータ設定により、2つの光子間に量子エンタングルメントが生まれる
- ④ 結晶から出た光子は、直交する偏光を持つ2つのリング上に放出される
- ⑤ この実験で重要なのは、光子の位置も時間も予測できないが、必ずペアで現れること

実験のセットアップ

UVパルス



非線形結晶
(1回目)

②

非線形結晶
(2回目)

①

③

④

検出器

f1

検出器

f2

(-45°)

検出器
d1

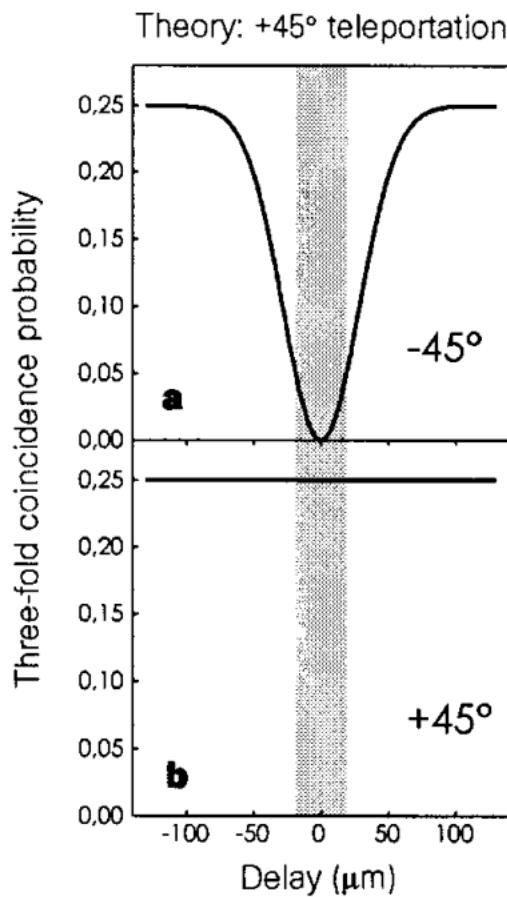
検出器
d2

ベル状態測定(BSM)

実験装置の解説

- ① 非線形結晶(1回目): パラメトリックダウンコンバージョンにより、エンタングル光子ペア(2と3)を生成
- ② 非線形結晶(2回目): テレポートしたい光子1とトリガー用の光子4を生成
- ③ ビームスプリッタ(BS): 光子1と2の重ね合わせ、「区別できなく」することでベル状態測定を可能に
- ④ 検出器d1とd2: BSの出力で同時検出を記録し、光子1と2のベル状態の測定を実現
- ⑤ 検出器f1とf2: +45°と45°の偏光解析で、テレポートされた光子3の状態を確認

理論的予測

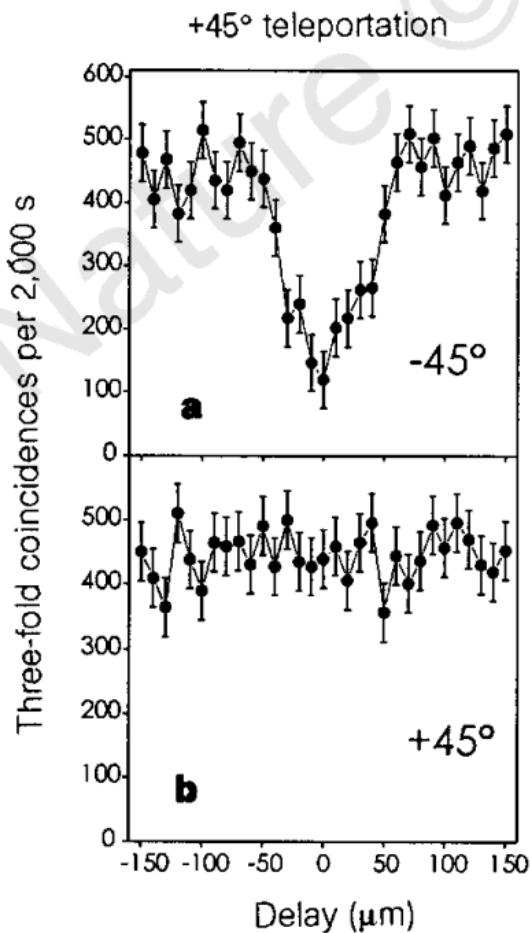


理論予測の解説

- ① テレポーテーションが成功すると、 -45° 偏光解析時に谷が現れる
- ② 一方、 $+45^\circ$ 偏光解析では常に一定値になる
- ③ 谷は遅延時間ゼロ付近で最も深くなる(確率が0になる)
- ④ この谷は、光子1の量子状態が光子3に完全に転送された証拠になる
- ⑤ 実験結果がこの理論曲線に近くほど、テレポーテーションの成功の精度が高いことを意味する

3重コインシデンス確率とは:3つの検出器(d, f_1, f_2)が同時に光子を検出する確率。

実験結果1: $+45^\circ$ 偏光テレポーテーション

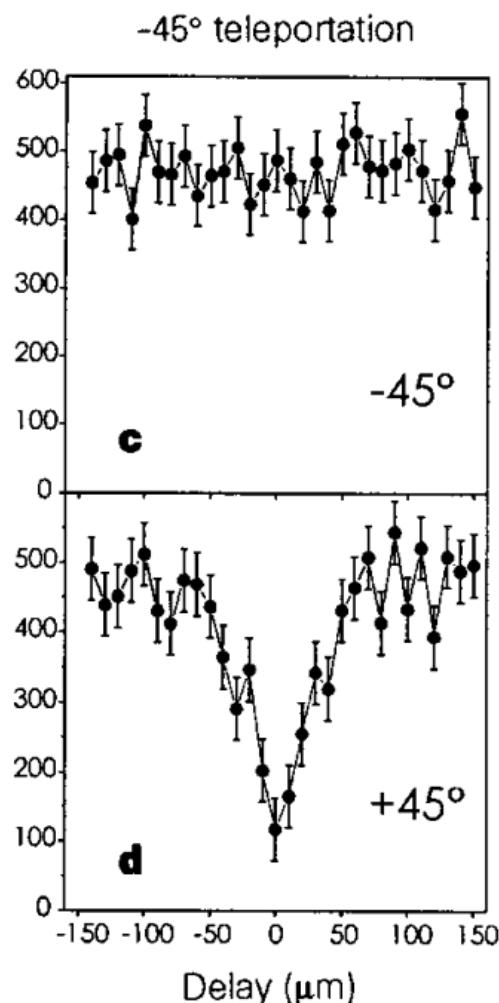


実験結果の解説

- ① $+45^\circ$ 偏光の光子をテレポートする実験では、光子1に $+45^\circ$ 偏光を準備した
- ② 理論によれば、テレポーテーションが成功すると、Bob側の光子3も $+45^\circ$ 偏光になるはず
- ③ 実験では、3つの検出器(コインシデンス)で同時に信号を検出した頻度を、光子の時間遅延を変えながら測定
- ④ 上のグラフは -45° 方向(直交方向)で解析した結果。信号の急激な減少を観測
- ⑤ 下のグラフは $+45^\circ$ 方向で解析した結果。フラットな信号

結論:光子3が光子1の偏光状態を保持しており
量子テレポーテーションが成立していることを確認

実験結果2:-45° 偏光テレポーテーション

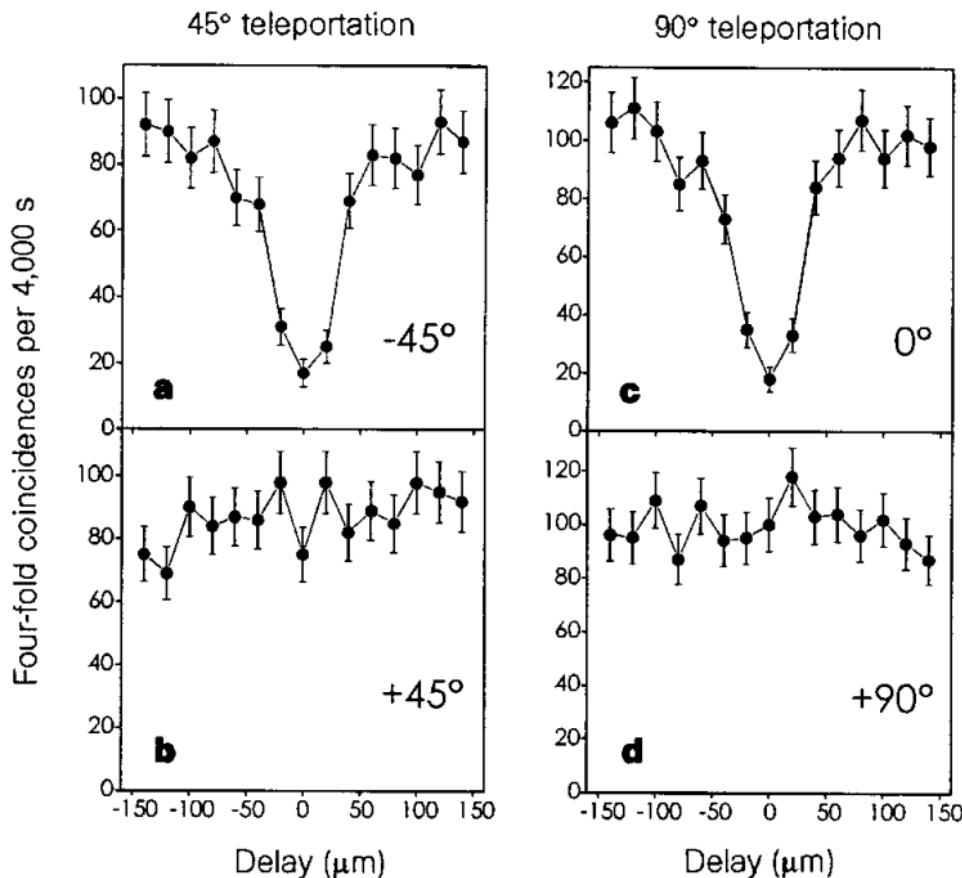


結論:-45° 入力光子に対しても量子
テレポーテーションが成功

実験結果の解説

- ① 入力光子は -45° 偏光状態に準備されている
- ② 理論によれば、テレポーテーションが成功すると、Bob側の光子3は -45° 偏光を再現
- ③ 実験では、3つの検出器(コインシデンス)で同時に信号を検出した頻度を、光子の時間遅延を変えながら測定
- ④ 上のグラフは -45° 方向(入射偏光)で解析した結果。フラットな信号
- ⑤ 下のグラフは $+45^\circ$ 方向(直交方向)で解析した結果。信号の急激な減少を観測

より精密な測定-四重コインシデンス



四重コインシデンスの重要性

- ① 四重コインシデンスとは、4つの検出器での同時検出を測定すること
- ② トリガー光子(光子4)も含めた同時計測でバックグラウンドノイズを除去
- ③ 時間遅延ゼロ地点で -45° 解析時に明確な谷が確認できる
- ④ ノイズ除去により可視度が約70%まで向上(三重コインシデンスでは約63%)
- ⑤ この高い可視度は、テレポートした量子状態の高度な転送を証明
- ⑥ さまざまな偏光状態($0^\circ, 90^\circ$, 円偏光)でも同様の可視度を達成

各偏光状態の結果

入力偏光状態	可視度(%)
+45°	63 ± 2
-45°	64 ± 2
90°	66 ± 2
90°	61 ± 2
円偏光	67 ± 2

重要ポイント:複数の非直交状態(互いに区別できない状態)でのテレポートが成功したこと、真の量子テレポートーションの証明となつた

可視度のデータの意味

- ① 可視度(Visibility)とは、テレポートーションの精度・成功率を表す指標
- ② テレポートされた偏光状態と入力状態の一一致度を表す
- ③ 可視度100%は完全なテレポートーション、50%は古典的限界値
- ④ すべての偏光状態で60%前後の可視度の達成。これは量子テレポートーションが実際に起きている証拠
- ⑤ さまざまな偏光状態でテレポートーションが検証できたことは、任意の量子状態が転送可能なことを示している

成功率と精度 - 70%の可視度の意味

可視度 (Visibility) とは？

実験での「可視度」とは、量子テレポーテーションが理想通りに機能したかを示す指標。100%なら完璧な転送、0%なら全く転送されていないことを意味する。

70%の可視度

70%の可視度とは？

テレポートされた光子の70%が、元の光子と同じ量子状態を示した、という意味。当時としては非常に高い精度であり、量子テレポーテーションが実際に機能することの明確な証拠となつた。

なぜ重要？ この実験により、量子情報を失うことなく転送できることが科学的に証明され、量子通信の実用化への重要な一歩となつた。

可視度と信用度の違い-質問

定義

可視度(Visibility)・・・干渉のコントラストを表す量

信頼度(Fidelity)・・・量子状態そのものの重なり具合を図る指標

可視度

$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$$

信頼度

$$F = \langle \psi | \rho | \psi \rangle$$

	メリット	デメリット
可視度	再現性が高い	状態の全体像を表せない
信頼度	量子状態の一致度を直接評価	ノイズの扱いが難しい

可視度と信用度の違い-質問

3ビットの場合の光子を検出する確率

$$P = \frac{1}{16} \left| \sum_{i=0}^3 (-1)^{f(i)} \right|^2 \cdot f(i) = 0 \text{ or } 1 \quad \text{for } i = 0, 1, 2, 3.$$

<https://pubs.aip.org/aip/apq/article/1/4/046105/3317725/Four-bit-input-linear-optical-quantum-computing>

将来の展望

量子テレポーテーション技術が切り拓く未来

この実験は、量子情報化学の新たな可能性を示す画期的な一歩。ここからさらに発展し、私たちの生活や科学技術に大きな改革をもたらす可能性がある。



量子暗号通信

絶対に解読できない量子暗号による超安全な通信網の実現。量子鍵配達と組み合わせた新たな方法セキュリティの確率。



分散型量子コンピュータ

離れた量子コンピュータ同士を量子テレポーテーションで接続し、計算能力を飛躍的に向上させる分散型量子計算の実現。



量子インターネット

量子情報を自由にやりとりできる新たな通信ネットワーク。現在のインターネットを超える次世代情報基盤を構築。

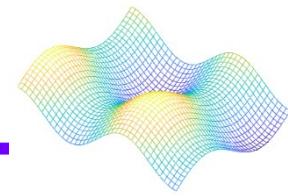


量子センシングと精密測定

量子もつれを利用した超高感度センサーの開発。医療診断や物質分析、重力波検出などの精度を向上。

Multi-photon emission from a resonantly pumped quantum dot





Multi-photon emission from a resonantly pumped quantum dot (共鳴励起量子ドットからの多光子放出)

DOI :

<https://doi.org/10.1364/OPTICAQ.557604>

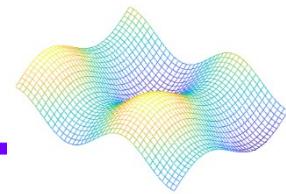
著者 :

F. Giorgino, P. Zahálka, L. Jehle, L. Carosini, L. M. Hansen,
J. C. Loredo, P. Walther , Optica Quantum 3 (2025) 402.

Journal :

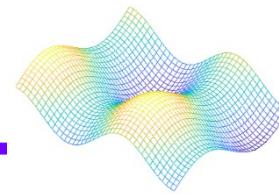
"Multi-photon emission from a resonantly pumped quantum dot," Optica Quantum **3**, 402-407 (2025)

量子コンピュータの種類



ゲート方式

	超電導	イオントラップ	量子ドット	光量子
原理	ジョセフソン結合	イオンのエネルギー状態	ラビ振動	光子の偏光
動作環境	~10mK	真空	~1.5K	常温、大気
コヒーレンス時間	100μs	15s	数μs	0.15ms
メリット	集積化 高速動作	長いコヒーレンス時間	半導体技術に適用	外乱に強い
デメリット	冷却が必須	ゲート操作が低速	制御が困難	集積化が困難 エラー率が高い



量子コンピュータ

IBM Quantum System One (超伝導)

2019年 世界初の実装

2021年 ibm_Kawasaki (国内初)



<https://www.ibm.com/jp-jp>

光量子コンピュータ

原理：光子の偏光

動作：常温・大気中

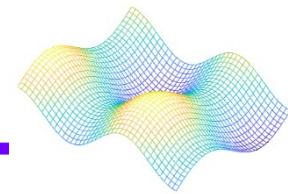
利点：外乱に強い

欠点：エラー率が高い

コヒーレンス時間：~ 0.1 ms



https://www.u-tokyo.ac.jp/adm/uci/ja/projects/quantum/project_00005.html



量子技術

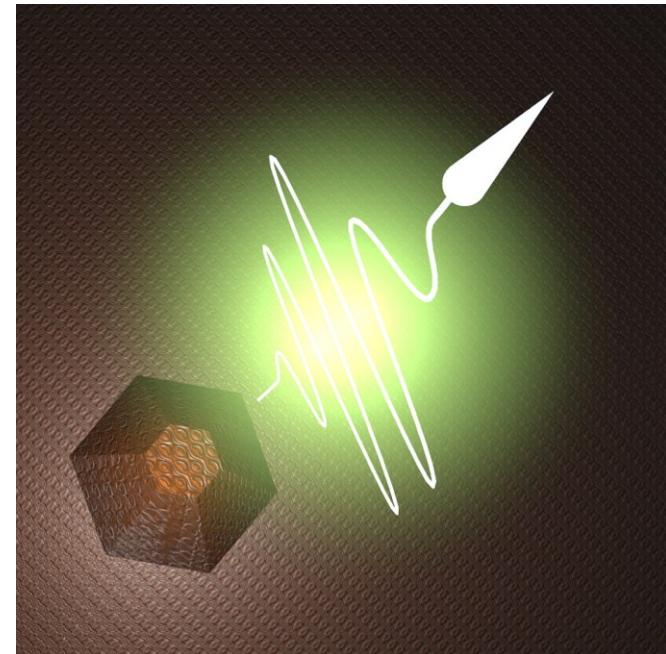
单一光子源



量子ドット(QD)

→紫外光の照射により発生

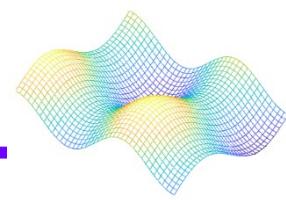
- ・ 直径2~10(nm)程度
- ・ 単一発光体



https://keytech.ntt-at.co.jp/en/ktn_crystal/prd_2044.html

※多光子放出というノイズが性能を制限する課題がある

目的



共鳴励起量子ドットからの多光子放出を定量化し
発光純度向上への道を探る

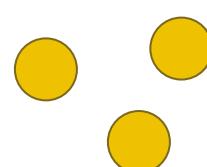
单一光子の放出

- ・多光子放出の精密な定量評価



多光子の放出

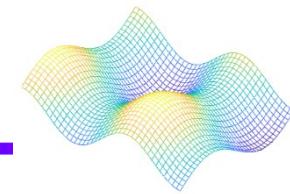
- ・多光子発生メカニズムの解明



- ・効率的な抑制手法の開発

半導体量子ドットの多光子放出を詳細に解析し、
より理想に近い単一光子源を実現する

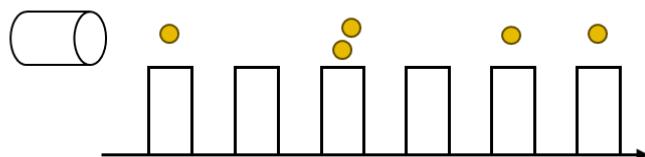
単一光子源の性質



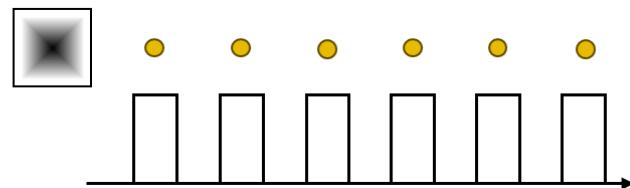
単一光子源 (Single-photon source)

正確に「1個の光子」を任意のタイミングで発生できる光源

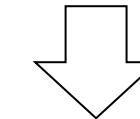
- ・微弱光源



- ・単一光子源



单一光子状態

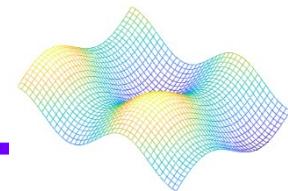


同時に 2 個以上の光子が
存在しない

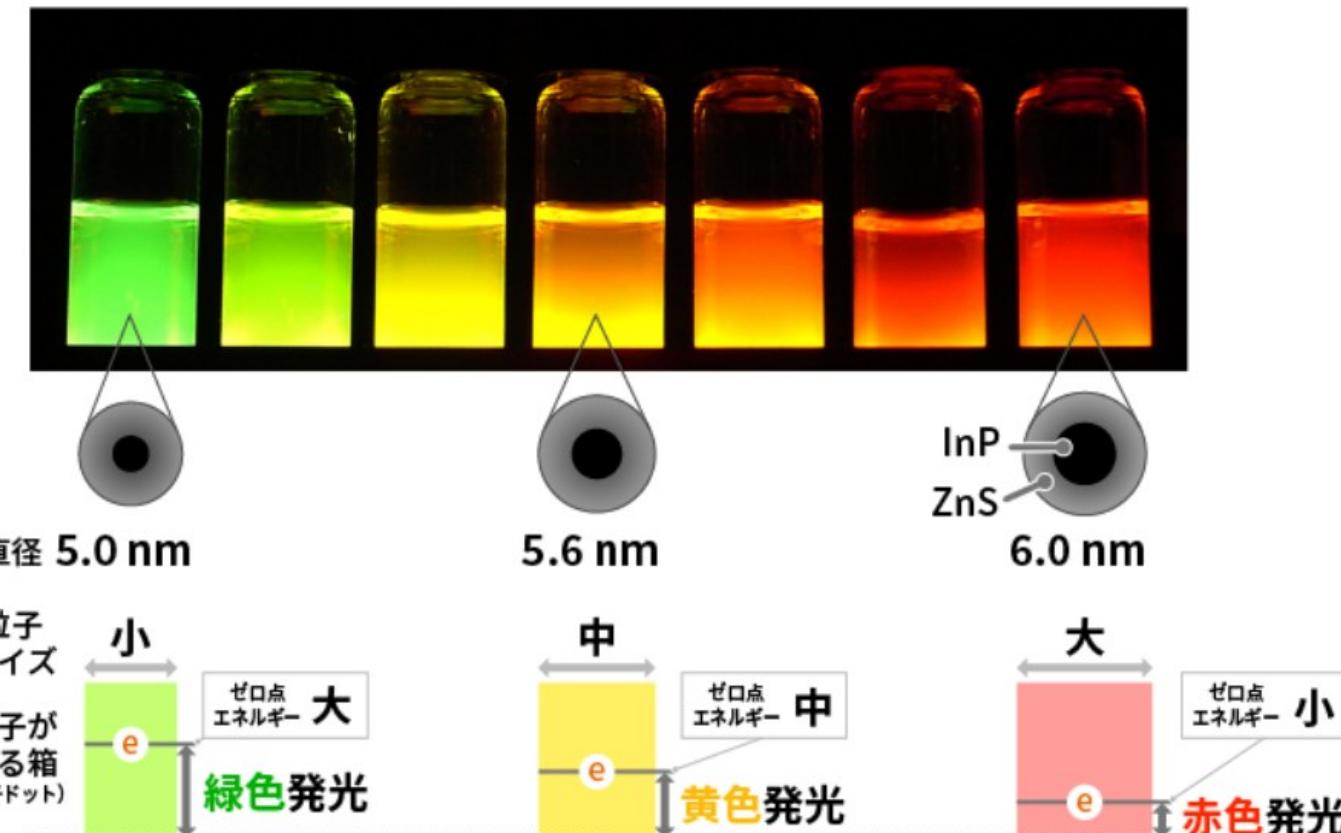
単一光子源の課題

- ・多光子放出：望ましくない複数光子の同時放出
- ・純度：単一光子状態の純度 ($g^{(2)}(0)$ 値)
- ・効率：任意のタイミングでの発光確率
- ・区別不可能性：放出される光子の波束重なり度

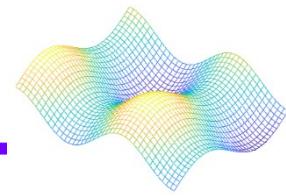
量子ドット



量子ドット(Quantum Dot)：電子を3次元すべての方向から閉じ込めた、ナノスケール(2~10 nm)の半導体微粒子



单一光子源としての量子ドット



量子ドットは固体ベースの決定論的单一光子源として、量子技術の様々な分野で重要な役割を果たす

量子暗号通信

单一光子による量子鍵配達 (QKD)
傍受による擾乱を検知可能
絶対安全な通信リンクの構築

量子センシング・計測

超高感度光計測
ショットノイズ限界を超える精度
量子イメージング技術

光量子コンピュータ

確定的光子源として量子ビット生成
量子干渉・エンタングルメントの生成
線形光学的量子演算の基盤素子

量子メトロロジー

量子標準としての利用
高精度時間・周波数基準
量子技術の校正・標準化

单一光子源の理想特性

高純度

$$g(2)(0) \approx 0$$

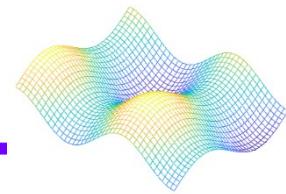
高効率

$$\eta > 90\%$$

高区別不可能性

$$M > 99\%$$

実験：拡張HBTセットアップ



Hanbury-Brown-Twiss (HBT) 実験の拡張版を用いて、
高次の自己相関関数を同時測定できるシステムを構築

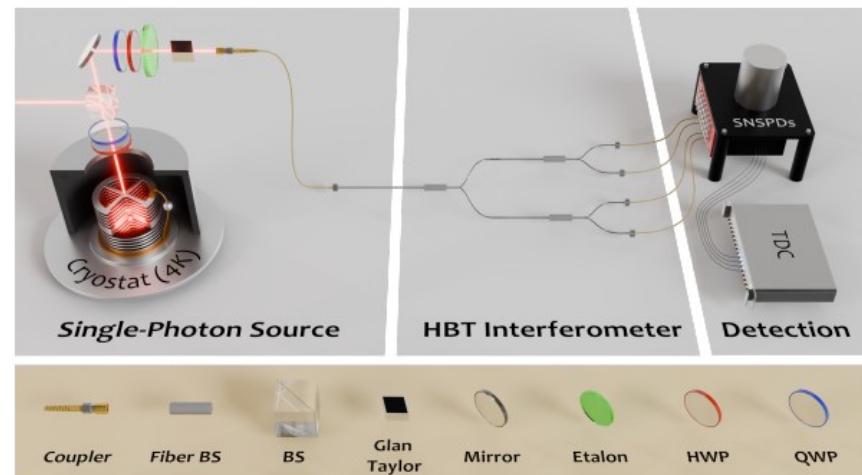
従来のHBT実験との違い

従来：2つの検出器での $g^{(2)}$ のみ測定可能

本研究：4つの検出経路で最大4次($g^{(4)}$)までの自己相関を同時測定

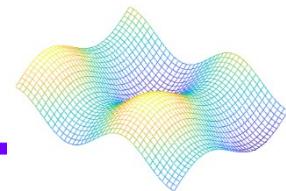
測定システムの特徴

- ・共鳴励起：微小柱キャビティ内の量子ドットを短パルスで励起
- ・高感度検出：超伝導ナノワイヤ単一光子検出器(SNSPD)で単一光子検出
- ・同時測定：タグ付きロジックによるコインシデンス計測
- ・高時間分解能：ヒストグラム bin 幅 3.125 ns($g^{(3)}$)、12.5 ns($g^{(4)}$)で構築



Generalized Hanbury–Brown Twiss experiment.

自己相関関数 $g^{(2)}$ の測定と解釈①



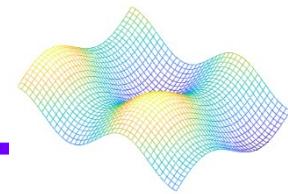
自己相関関数 $g^{(2)}(\tau)$ は光子の到着時間相関を表し、
量子光学における光子統計の基本指標

$g^{(2)}$ 関数とは？

2つの検出器で光子検出の時間差 τ の相関を測定

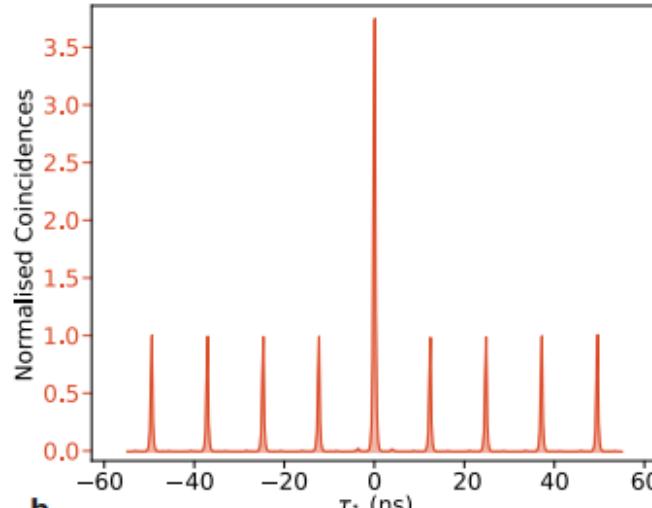
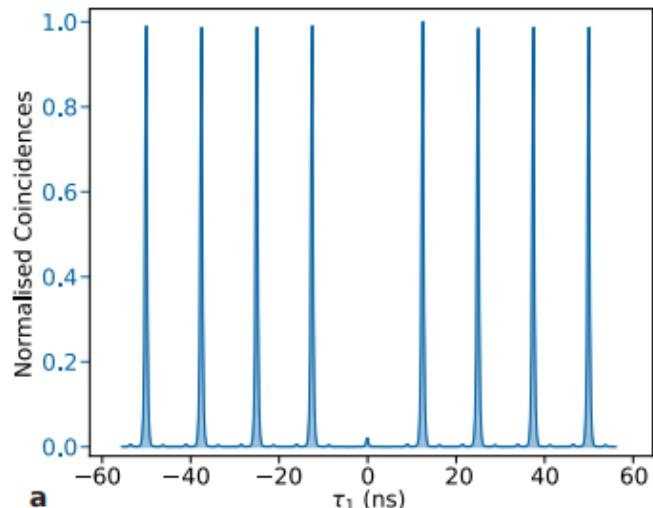
- $g^{(2)}(0) < 1$: アンチバンチング → 単一光子の証拠
- $g^{(2)}(0) = 0$: 完全な单一光子状態 (2光子以上の成分が全くない)
- $g^{(2)}(0) > 1$: バンチング → 複数光子が同時に来る傾向

自己相関関数 $g^{(2)}$ の測定と解釈②



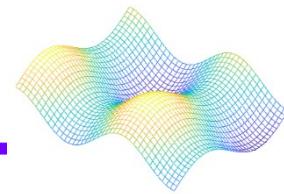
実験結果の解釈

- π パルス励起時 : $g^{(2)}(0) = 0.031 \pm 0.001$
→ 強いアンチバンチングで高純度な単一光子生成を実証
- 2π パルス励起時 : $g^{(2)}(0) = 4.08 \pm 0.01$
→ 強いバンチングで多光子放出が支配的
- 時間的に遅れた相関 ($\tau \neq 0$) ではすべての場合で相関消失
→ 異なるパルス間の相関はない



Auto-correlation histograms.
(a), (b) Second-order auto-correlation function

補足：自己相関関数 $g^{(2)}$



$$g^{(2)}(\tau) = \frac{\langle \hat{a}^\dagger(t)\hat{a}^\dagger(t+\tau)\hat{a}(t+\tau)\hat{a}(t) \rangle}{\langle \hat{a}^\dagger(t)\hat{a}(t) \rangle^2}$$

量子ドットの強度相関

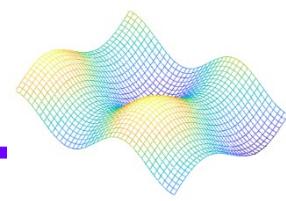
$$g^{(2)}(\tau) = 1 - e^{-(\gamma + \omega)\tau}$$

$$g^{(2)}(0) = 0$$

アンチバンディングを示す

ω ：単位時間内に基底状態 $|a\rangle$ から励起状態 $|c\rangle$ を経て発光の始状態 $|b\rangle$ へ励起されるレート

γ ： $|b\rangle$ から $|a\rangle$ への輻射緩和 レート

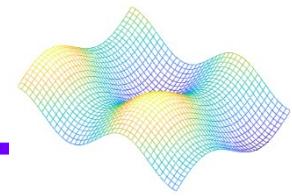


高次自己相関関数：3光子以上の同時検出統計を測定する手法
より詳細な多光子特性評価が可能に

$g^{(3)}, g^{(4)}$ の測定と物理的意義

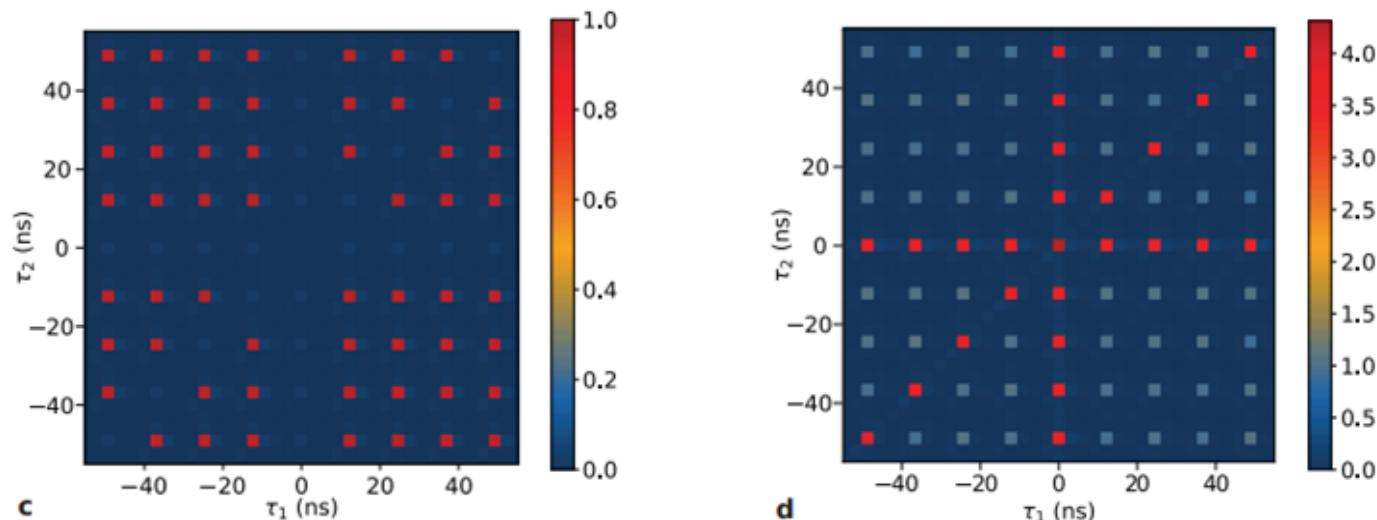
- $g^{(3)}(\tau_1, \tau_2)$: 3光子の同時相関関数
完全な単一光子源では理論的に $g^{(3)}(0,0) \approx 0$
- $g^{(4)}(\tau_1, \tau_2, \tau_3)$: 4光子の同時相関関数。
光子統計の高次の揺らぎを評価
- 4経路HBTセットアップで3光子・4光子の同時検出を計測
- 従来研究では殆ど測定されなかった高次相関の完全な解析を実現

$g^{(3)}$ 結果



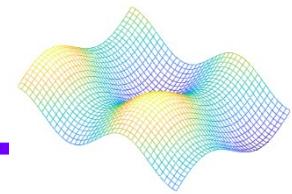
測定結果 (Fig 2c-f)

- π パルス励起時 : $g^{(3)}(0,0) = (5.08^{+0.9}_{-1}) \times 10^{-4} \ll 1$
→ 強い3光子アンチバンチング
- 2π パルス励起時 : $g^{(3)}(0,0) = 4.31 \pm 0.08 > 1$
→ 明確な3光子バンチング

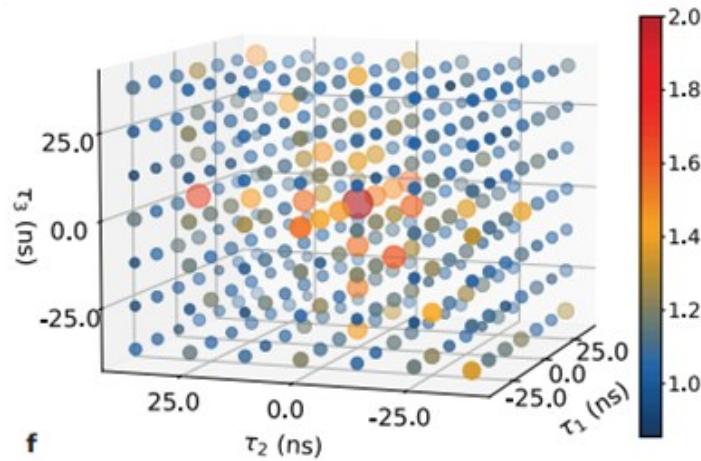
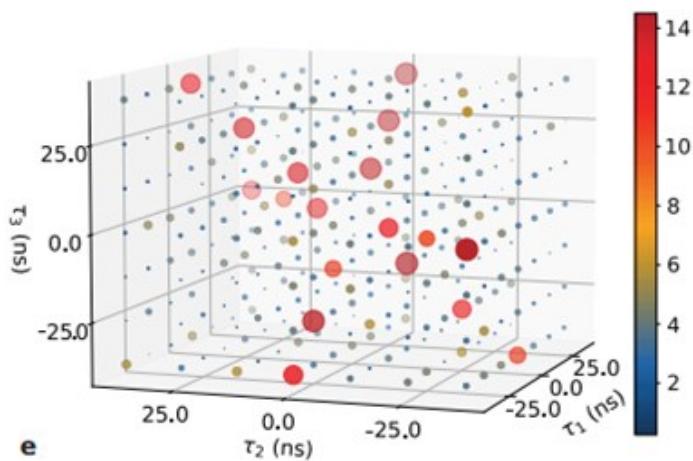


Analogous correlation maps $g(3)(\tau_1, \tau_2)$

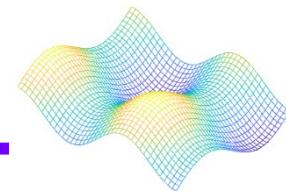
$g(4)$ 結果



- $g^{(4)}$ 測定： 2π パルスで $g^{(4)}(0,0,0) \approx 4.5$ 、 6π パルスで更に増加
- 高次相関ヒストグラムの形状から多光子放出の時間構造を解析可能



Normalized fourth-order auto-correlation function $g(4)(\tau_1, \tau_2, \tau_3)$

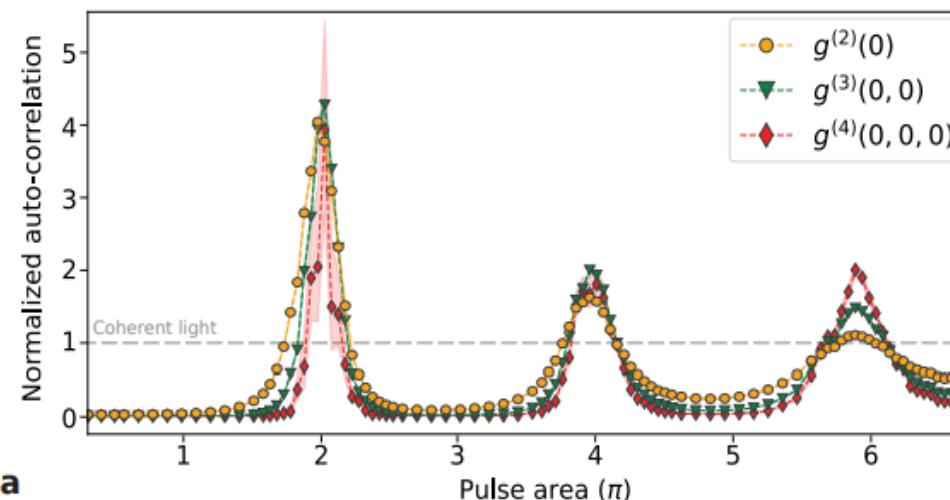


光子統計の種類

- ($g^{(2)}(0) < 1$) 単一光子源：サブポアソン統計
- ($g^{(2)}(0) = 1$) レーザーなどの古典的光源：ポアソン統計
- ($g^{(2)}(0) > 1$) 光子がバンチングする光源：スーパーポアソン統計

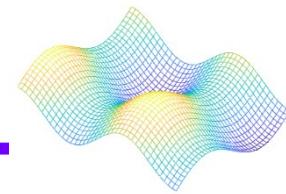
パルスエリア依存性 (Figure 3)

- 奇数 π パルス励起 ($\pi, 3\pi, 5\pi$)
強いアンチバンチング ($g^{(2)}(0) \ll 1$) を示し、単一光子放出が支配的
- 偶数 π パルス励起 ($2\pi, 4\pi, 6\pi$)
バンチング ($g^{(2)}(0) > 1$) を示し、多光子成分が増加



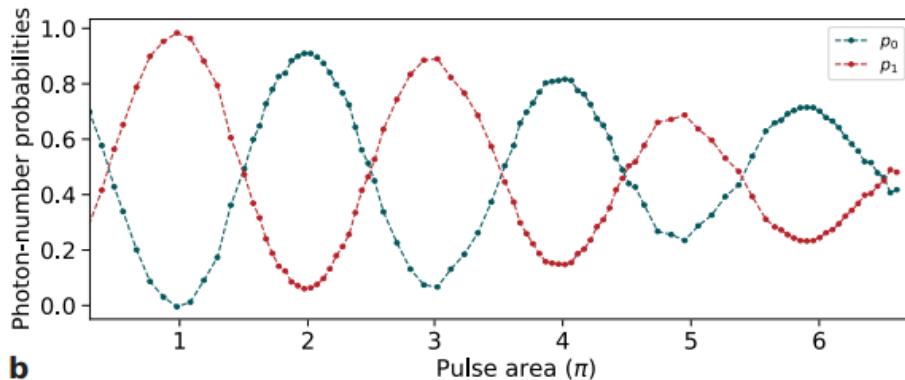
Experimental auto-correlation measurements versus pulse area showing oscillations

光子数統計の詳細分析



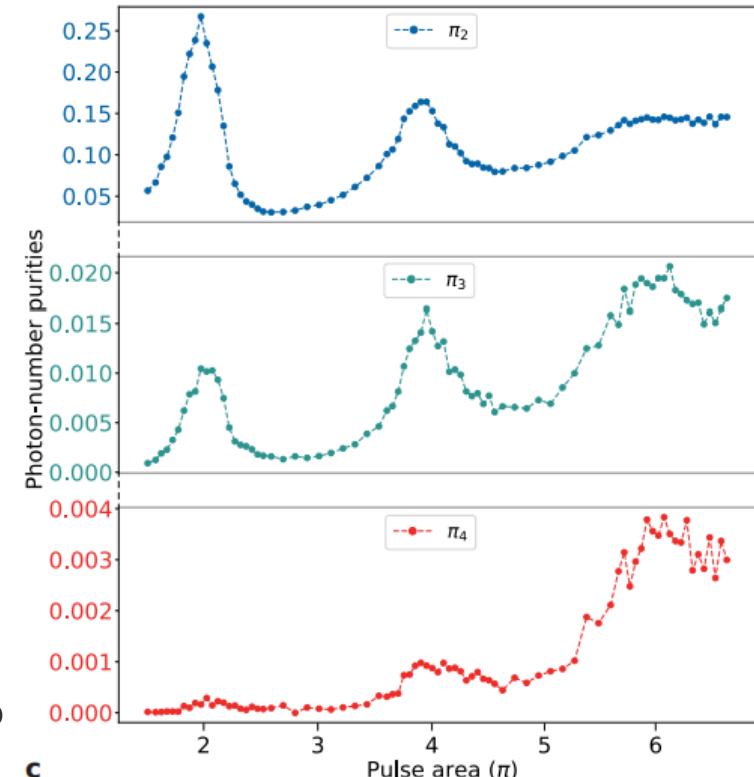
- Rabi振動

励起パルスエリア増大に伴い、光子数確率 (p_0, p_1) が振動し、
励起状態の占有確率と対応

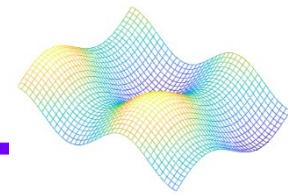


Probability of emitting zero or one photon versus excitation pulse area

- 多光子純度：真空成分を除外した場合でも、 2π パルスでの2光子純度は約27%、3光子は約1%、4光子は約0.05%と徐々に減少



Two-, three-, and four-photon emission probabilities for different pulse areas, renormalized by excluding the vacuum probability.



パルスエリア (Pulse Area) は、共鳴励起パルスの強度と時間幅の積であり、量子状態の回転角を決定する

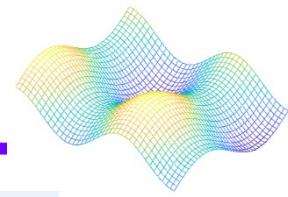
Rabi振動とは

- 定義：共鳴励起された2準位系で、基底状態と励起状態間を周期的に遷移する現象
- π パルス：1回の完全な基底
→励起状態遷移を起こすエネルギー (180° 回転に相当)
- 2π パルス：一旦励起状態に上がり、再び基底状態に戻る (360° 回転に相当)

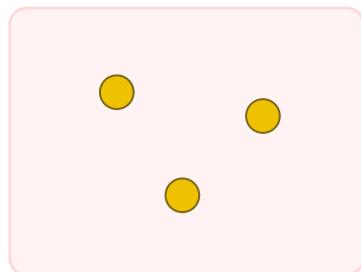
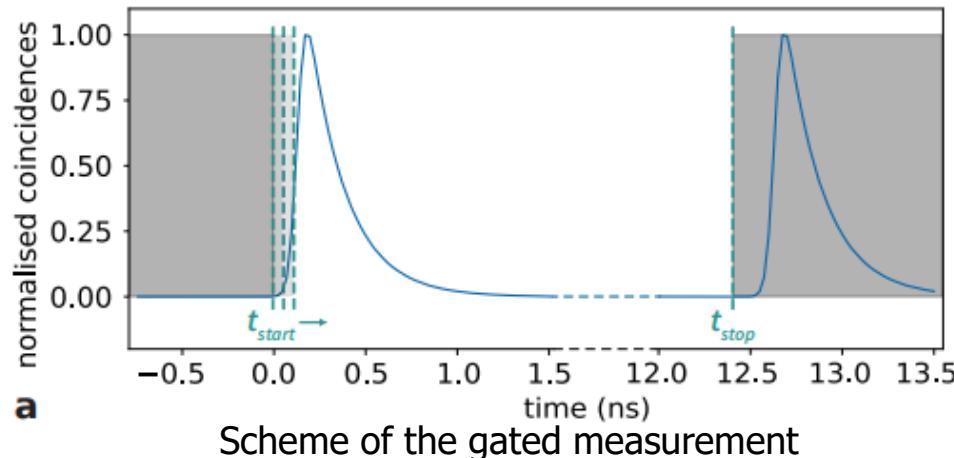
実験で観測された現象

- 光子放出確率 (p_1) はパルスエリアとともに振動
 π パルスで最大、 2π で最小
- 多光子成分 (π_2, π_3, π_4) は偶数 π パルスで増加
- 振動の減衰はフォノン誘起デコヒーレンスが原因
- 振動パターンから2準位系としての量子ドットの挙動が確認できる

時間ゲート測定の仕組み



時間ゲート測定 (Time-gated acquisition) とは、光子検出イベントを特定の時間窓内だけに限定して取得する測定手法



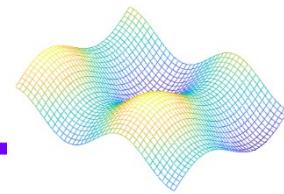
ゲートなし : $g^{(2)}(0) \approx 0.031$



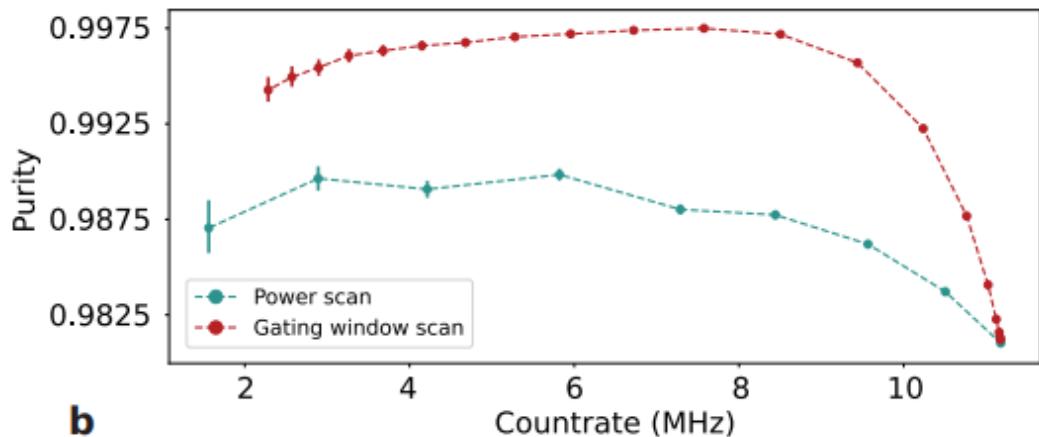
ゲートあり : $g^{(2)}(0) < 0.01$

利点：最小限の効率損失(~8.5%)で
单一光子純度を最大1.6倍に向上できる

ゲート測定による純度向上効果



時間ゲート測定による単一光子純度の向上効果は顕著で、高効率のまま $g^{(2)}(0)$ 値を大きく低減できる

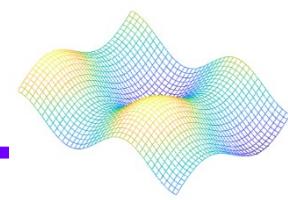


$P = 1 - g^{(2)}(0)$ as a function of the measured count rate

ゲート測定による純度向上の実験結果

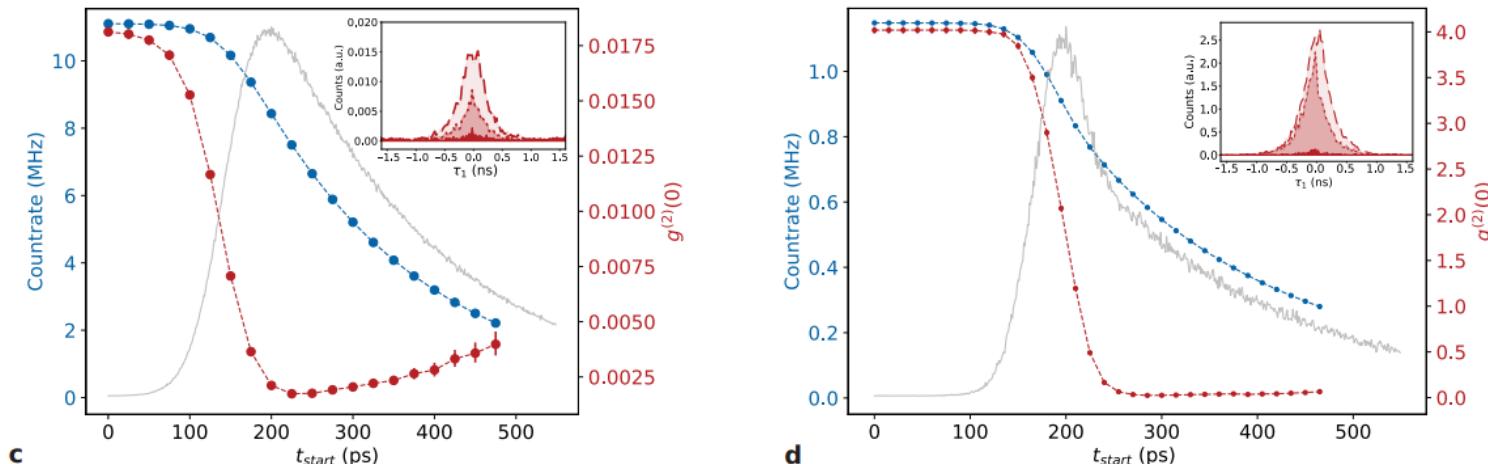
- 純度 $P = 1 - g^{(2)}(0)$ の向上： π パルスで $t_{\text{start}} = 150 \text{ ps}$ で純度約1.6倍に向上（カウントレート損失は僅か8.5%）
- 多光子成分の選択的除去： 発光初期（立ち上がり）部分を除去することで多光子成分を効果的に低減
- 時間分解測定から判明： 多光子成分は励起パルス中の再励起プロセスに起因

ゲート測定による純度向上効果



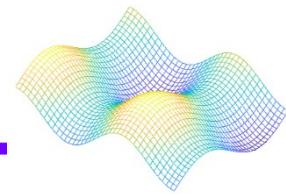
効率と純度のトレードオフ

- 時間ゲート幅を狭めるほど純度は向上するが、検出効率は低下する
- π パルスでは $t_{\text{start}} = 150 \sim 200 \text{ ps}$ が純度と効率の最適バランス点
- 2π パルスでも同様の効果が確認されるが、より顕著な多光子成分を含む



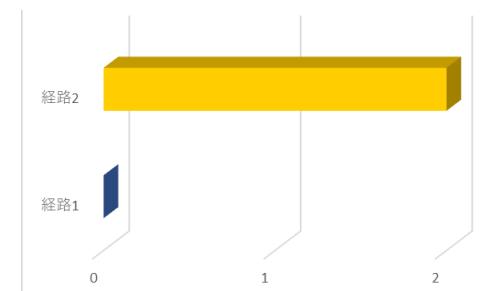
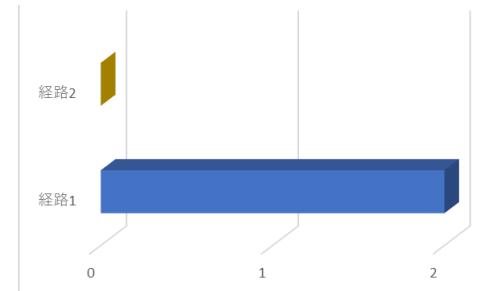
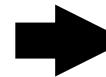
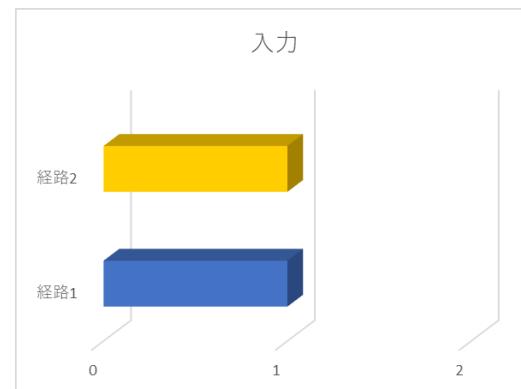
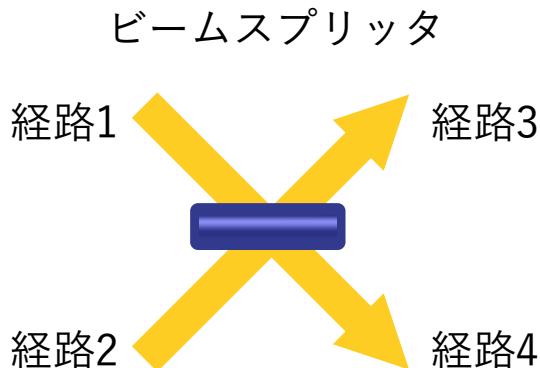
Count rate and $g(2)(0)$ as a function of t_{start}

Hong–Ou–Mandel (HOM) 干渉測定結果



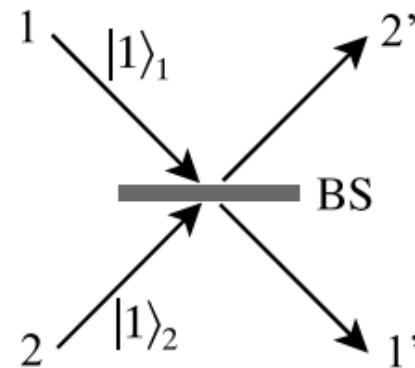
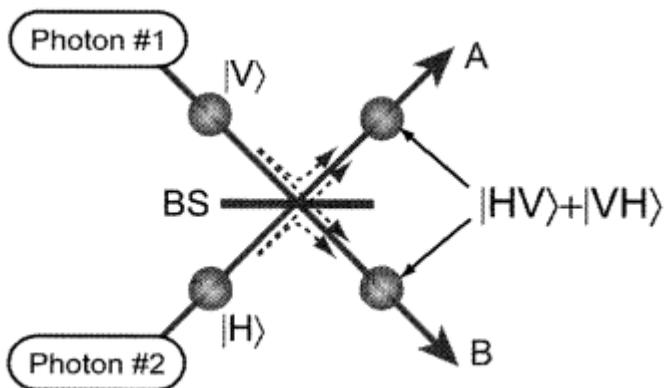
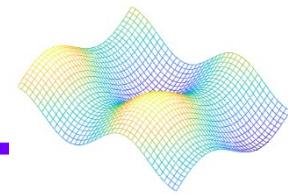
HOM干渉実験の特徴

- ・波束重なり度 (**M**) 測定：単一光子の区別不可能性 (indistinguishability) を定量評価できる
- ・量子的性質：光の粒子性と波動性の両方を同時に示す量子干渉現象
- ・実験方法：不平衡マッハツェンダー干渉計 (MZI)
出力の相関測定



$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|HV\rangle + |VH\rangle)$$

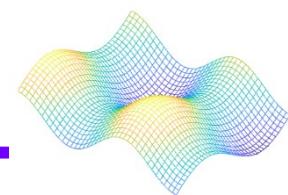
Hong–Ou–Mandel (HOM) 干涉：補足



入射狀態 $|\Psi\rangle = |1\rangle_1 |1\rangle_2 = \hat{a}_1^\dagger \hat{a}_2^\dagger |00\rangle$

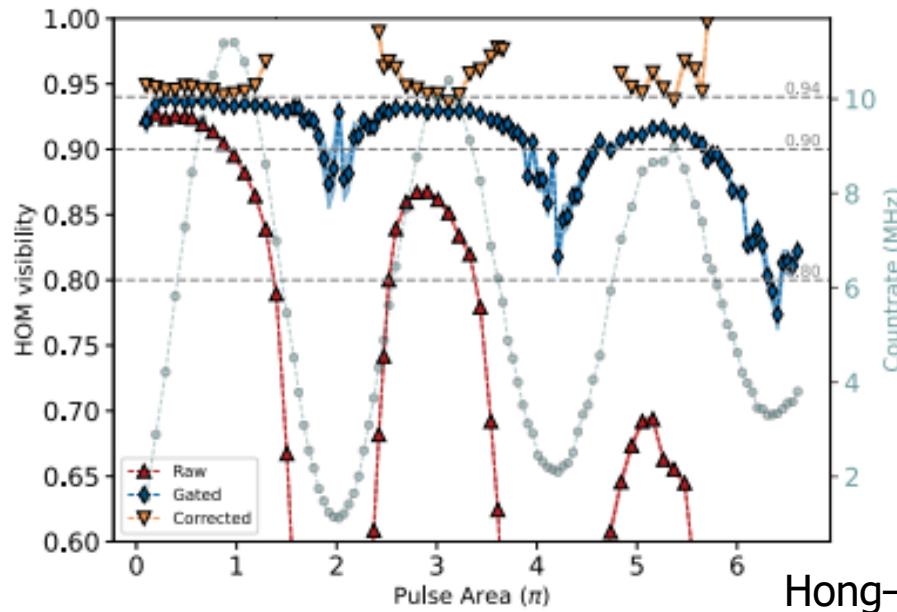
BS變換 $\begin{pmatrix} \hat{a}_{1'} \\ \hat{a}_{2'} \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{a}_1 \\ \hat{a}_2 \end{pmatrix}$

出力狀態
$$\begin{aligned} |\Psi'\rangle &= \frac{1}{2} (\hat{a}_{1'}^\dagger + i\hat{a}_{2'}^\dagger)(\hat{a}_{1'}^\dagger + i\hat{a}_{2'}^\dagger)|00\rangle \\ &= \frac{1}{2} \left\{ i(\hat{a}_{1'}^\dagger)^2 + i(\hat{a}_{2'}^\dagger)^2 + \hat{a}_{1'}^\dagger \hat{a}_{2'}^\dagger - \hat{a}_{1'}^\dagger \hat{a}_{2'}^\dagger \right\} |00\rangle \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|2\rangle_1, |0\rangle_{2'} + |0\rangle_1, |2\rangle_{2'}) \end{aligned}$$



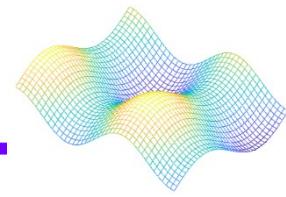
測定結果

- Raw visibility (V_{HOM}) :
奇数 π パルス励起時に最大の可視度を示す（特に π パルス近傍）
- 波束重なり度 (M) :
多光子補正後の値は約94%と高い区別不可能性を確認
- ゲート解析効果 :
 V_{HOM}^g で示される通り、時間選択によりさらに可視度が向上
- パルスエリア依存性 :
偶数 π パルス(多光子成分増加)で可視度低下、奇数 π で高い識別不可能性



$$V_{\text{HOM}} = M_s - \left(\frac{1 + M_s}{1 + M_s} \right)$$

$$M_s = \frac{V_{\text{HOM}} + g^{(2)}}{1 - g^{(2)}}$$



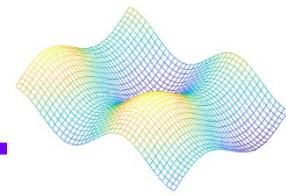
重要な発見：共鳴駆動した量子ドットからの多光子放出は、時間的に順序付けられており、同一モードの高次フォック状態ではない

再励起過程による多光子放出

- 初期励起: パルス光により量子ドットが励起状態へ
- 自発放出: 励起子が再結合し、第1光子を放出
- 再励起: パルス光がまだ存在する間に再度励起される
- 連続過程: 自発放出→再励起→放出のサイクルが繰り返される

なぜ高次フォック状態でないのか？

- フォック状態定義: 同一モード内に複数光子が存在する量子状態
- 位相関係: 量子ドット放出光子は異なる時間に生成され、位相関係が保たれない
- コヒーレンス: 時間差のある光子間にコヒーレンスがなく、純粹な量子状態を形成しない

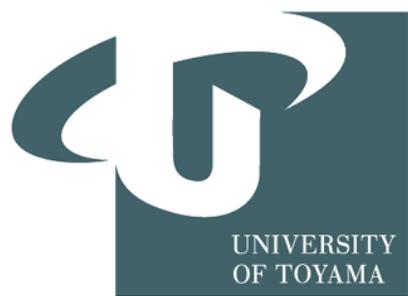


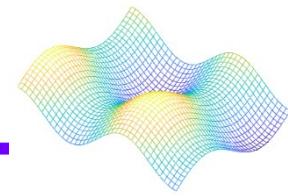
本研究の主要な結論

- **多光子放出の定量化**：4次自己相関関数 $g^{(4)}$ を用いて共鳴励起量子ドットからの多光子放出を詳細に解析
- **Rabi振動と光子統計**：パルスエリア (Θ) 依存性を示し、奇数 π でサブポアソン、偶数 π でスーパーポアソン統計を確認
- **多光子純度の定量評価**： 2π パルス時の真空除去多光子成分 ($\pi_2 \sim 27\%$ 、 $\pi_3 \sim 1\%$ 、 $\pi_4 \sim 0.05\%$) を測定
- **時間構造の解明**：多光子放出は同一モードでなく時間順序を持つ連続過程であることを実証
- **純度向上手法**：acquisition time gatingによる効率的な单一光子純度向上法を実証（効率低下8.5%で純度1.6倍向上）

Quantum computational advantage using photons

光子を用いた量子計算の優位性の実証





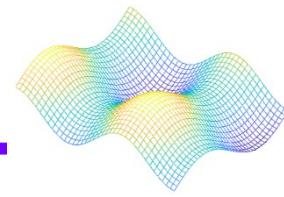
著作者

Han-Sen Zhong, Hui Wang, Yu-Hao Deng,
Ming-Cheng Chen, Li-Chao Peng, Yi-Han Luo,
Jian Qin, Dian Wu, Xing Ding, Yi Hu, Peng Hu,
Xiao-Yan Yang, Wei-Jun Zhang, Hao Li,
Yuxuan Li, Xiao Jiang, Lin Gan, Guangwen Yang,
Lixing You, Zhen Wang, Li Li, Nai-Le Liu,
Chao-Yang Lu, Jian-Wei Pan

Science Vol 370, Issue 6523 pp. 1460-1463 掲載

DOI: 10.1126/science.abe8770

量子コンピュータとは



- 量子力学の原理を活用した新しいコンピュータ
- 従来のコンピュータで解決困難な問題を高速に解ける可能性
- 様々な分野への応用が期待される

従来型コンピュータ

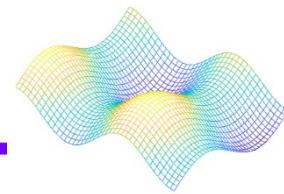
処理時間:数十億年



量子コンピュータ

処理時間:数分～数時間

量子コンピュータの基本原理



重ね合わせ

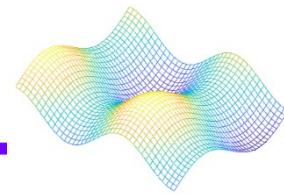
複数の状態(0と1)が
同時に存在できる状態
→並列計算が可能

量子もつれ

離れた量子同士が
瞬時に影響しあう現象
→情報処理の高速化

干渉

量子状態の振幅が
干渉して強化or相殺
→特定の解を効率的に見つけられる

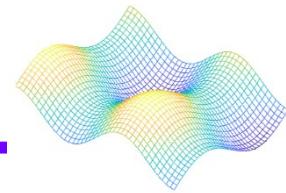


量子計算優位性(Quantum computational advantage)

古典計算機では現実的な時間で解けない問題を、
量子コンピュータが解決できる状態

判断基準

- ・計算時間の圧倒的な差(数十億年vs数分)
- ・問題の規模
- ・計算精度と信頼性

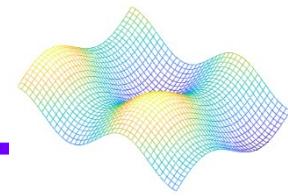


ボソンサンプリングの基本概念

- ・光子(ボソン粒子)を多モードの光学ネットワークに入力
- ・光の干渉効果により複雑なパターンの出力
- ・出力パターンのサンプリングが量子計算の一種

なぜ古典計算機では困難か

- ・出力の確率計算が極めて困難
- ・光子数、モード数が増えると計算量が指数関数的に増大
- ・50光子以上で既存スペックンでも事実上計算不可能



ガウス型ボソンサンプリングとは

従来型との違い

従来型: 単一光子を入力

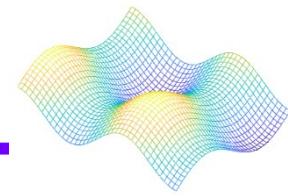
ガウス型: スクイーズド光を入力

大規模化、効率化の利点

- ・光源の確定的な生成が可能
- ・入力光状態の純度が高い
- ・拡張性に優れた実験装置構成

応用可能性

- ・量子化学シミュレーション
- ・量子機械学習のサブルーチン



量子光源アレイ

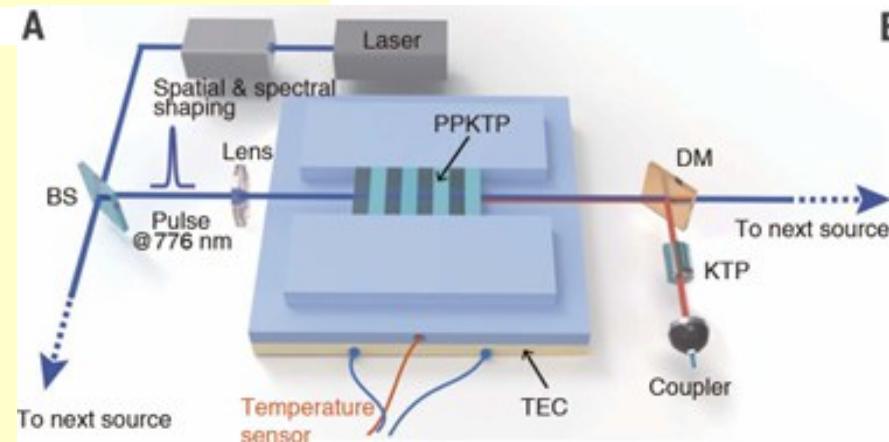
- ・25個のPPKTP結晶で圧搾状態を生成
- ・50個の単一モード圧搾状態(SMSS)に相当

100モード干渉計

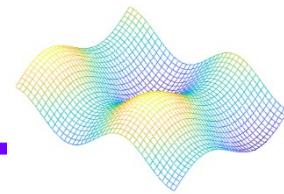
- ・超低損失(透過率97.7%)
- ・全結合(フルコネクティビティ)
- ・ランダム行列による複雑な光路設計

検出器と制御系

- ・100個の高効率单一光子検出器
- ・出力結合効率約90%
- ・高精度位相ロックシステム



量子光源の仕組み



レーザーパルス(13経路に分割)



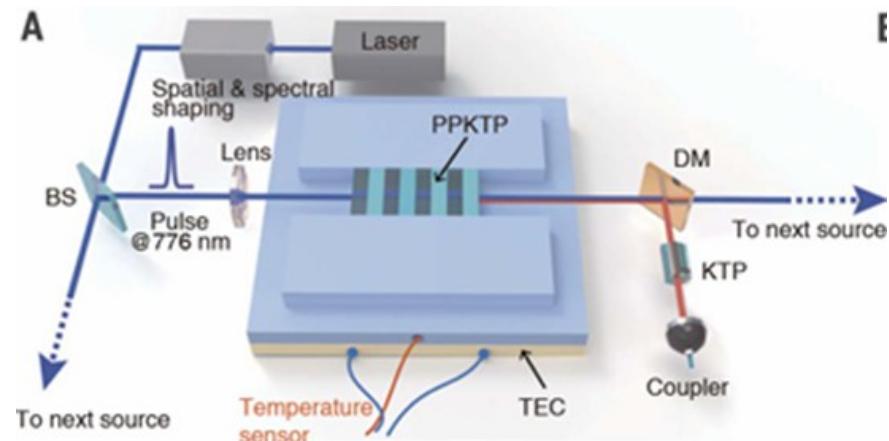
25個のPPKTP結晶



25個のTMSS(2モード圧搾状態)



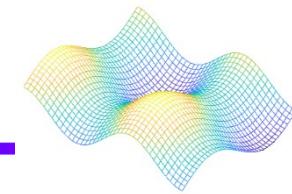
50個のSMSS(单一モード圧搾状態)



平均純度
0.938

収集効率
0.628

大規模干渉計



超低損失干渉計

全結合(フルコネクティビティ)

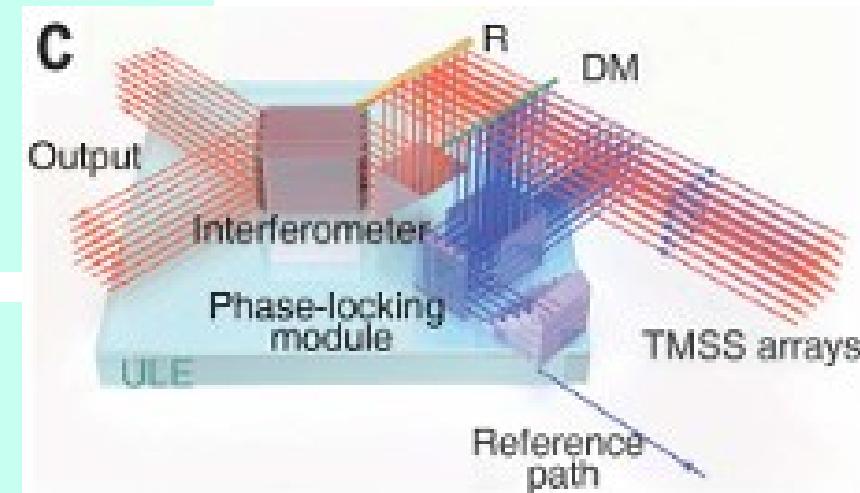
すべての入力がすべての出力と干渉可能

ランダム光学経路

ランダム行列による干渉で
超大規模状態空間を実現

高い位相安定性

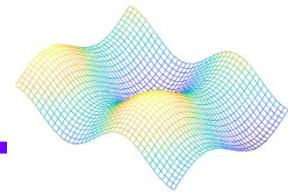
高精度に位相をロック



透過率
97.7%

出力結合効率
約90%

安定度維持時間
3.5時間以上



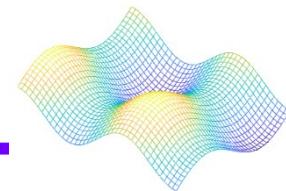
検出器の役割

- ・干渉計からの出力を正確に検出
- ・単一光子レベルの微弱な光も捉える
- ・複数光子の同時検出が可能

検出器の性能

- ・高効率: 最先端の光子検出効率
- ・低ノイズ: 誤検出を極限まで制御
- ・高速応答: nsレベルの時間分解能

実験条件と測定

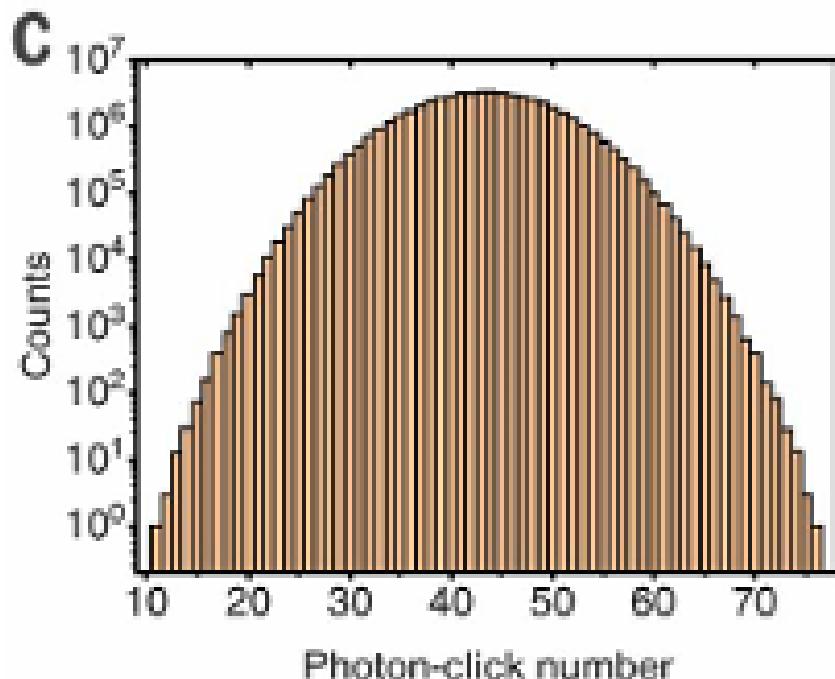


条件: TMSS...25個、しきい値検出器使用

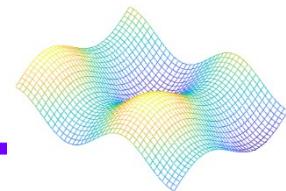
結果: 平均...43光子クリック(3,097,810回)、
最大...76光子クリック

実験の規模

- ・100個の単一光子検出器を配置しすべての出力を同時監視
- ・200秒で約300万イベント取得



古典計算との比較

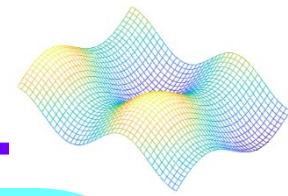


量子優位性の度合い: 約 10^{14} 倍

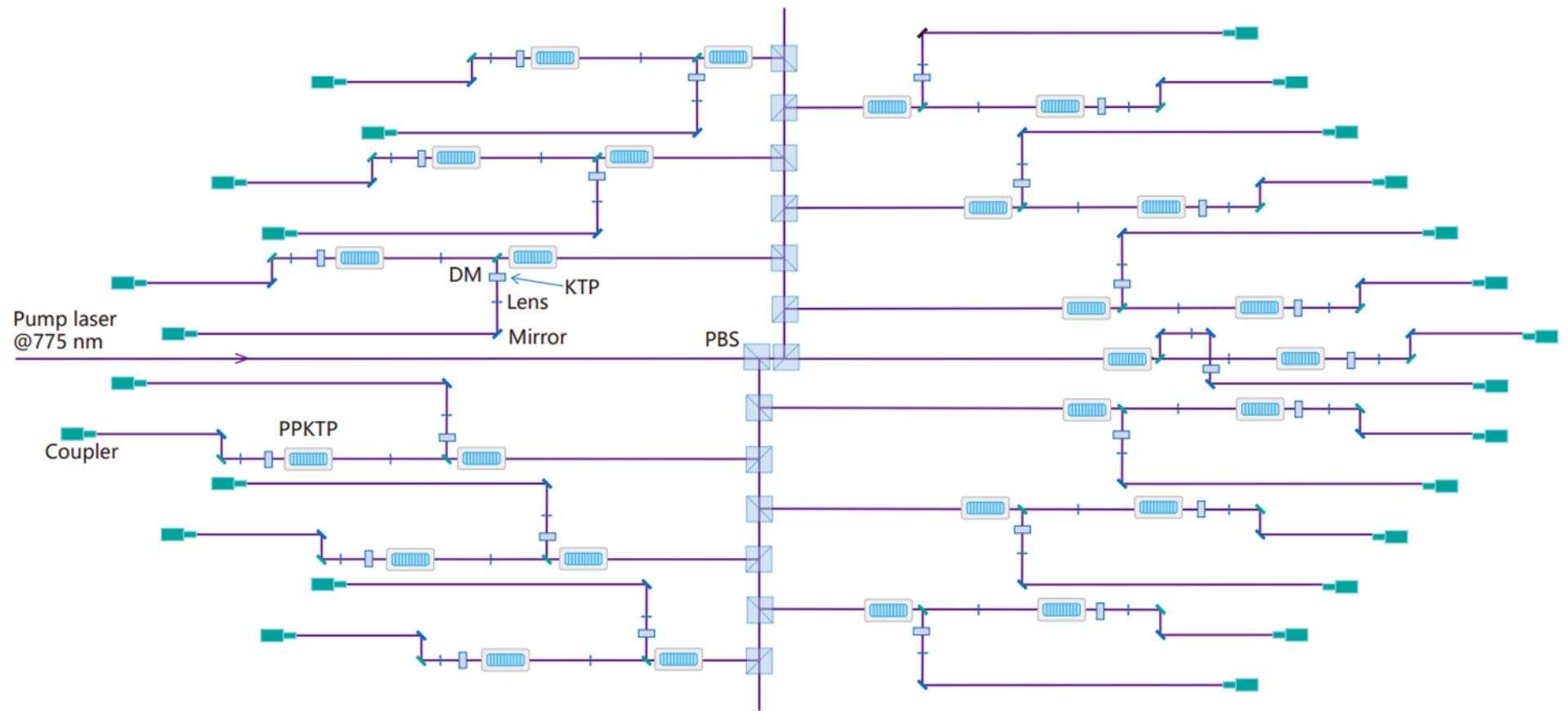
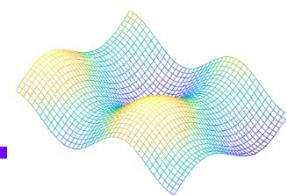
システム	サンプル生成時間
Jiuzhang	200秒
Sunway TaihuLight	約25億年
富岳	約6億年

実験	出力状態空間次元
Jiuzhang	10^{30}
超電導量子ビット	10^{16}
単一光子実験	10^{14}

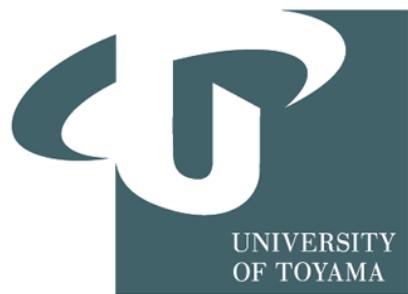
本研究の意義



- ・量子計算優位性を目に見える形で実証
理論的な可能性から実験的証明への飛躍的進歩
 - ・前例のない規模の量子システム
従来の超伝導量子回路などと比較して状態空間で
14~16桁の拡大を実現
 - ・計算時間の劇的短縮
スーパーコンピュータの数十億年の計算を数分で実行
- 実用的な量子コンピュータへの具体的な一步

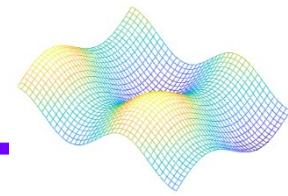


シリコンナノフォトニックCNOTゲートの 量子テレポーテーション



参考文献:<https://doi.org/10.1364/OPTICAQ.554577>

Citation



Kai-Chi Chang, Xiang Cheng, Felix Ribuot-Hirsch, Murat Can Sarihan, Yujie Chen, Jaime Gonzalo Flor Flores, Mingbin Yu, Patrick Guo-Qiang Lo, Dim-Lee Kwong, Chee Wei Wong.

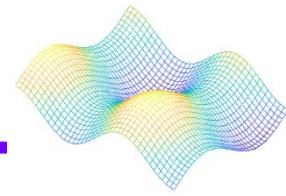
カリフォルニア大学

シンガポール、マイクロエレクトロニクス研究所

上海産業技術研究所

"Quantum teleportation of a silicon nanophotonic CNOT gate," Optica Quantum **3**, 381-388 (2025).

研究背景



量子コンピュータを大規模化するには、たくさんの量子ビットを制御する必要がある

しかし、量子ビット同士の距離が離れると、直接相互作用させるのが

難しくなる



そこで

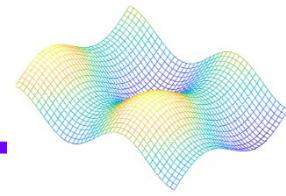
量子状態テレポーテーション

量子ゲートテレポーテーション

が注目されている

特にCNOTゲートのような2量子ビットゲートを遠隔で実行できれば
、離れたモジュールを結んだ分散型量子計算が可能になる

研究目的



シリコンフォトニックチップ上の局所CNOTゲートを、遠隔の量子ビット間にテレポートする



実現できる

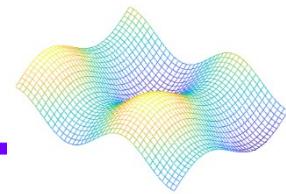
シリコンフォトニクスを使うことで

- CMOS技術と互換性がある
- 高集積化・量産が可能
- 光子を使うためでコヒーレンスが少ない

拡散可能な分散量子計算アーキテクチャを構築する基盤

基盤が作成可能になる

実験手法



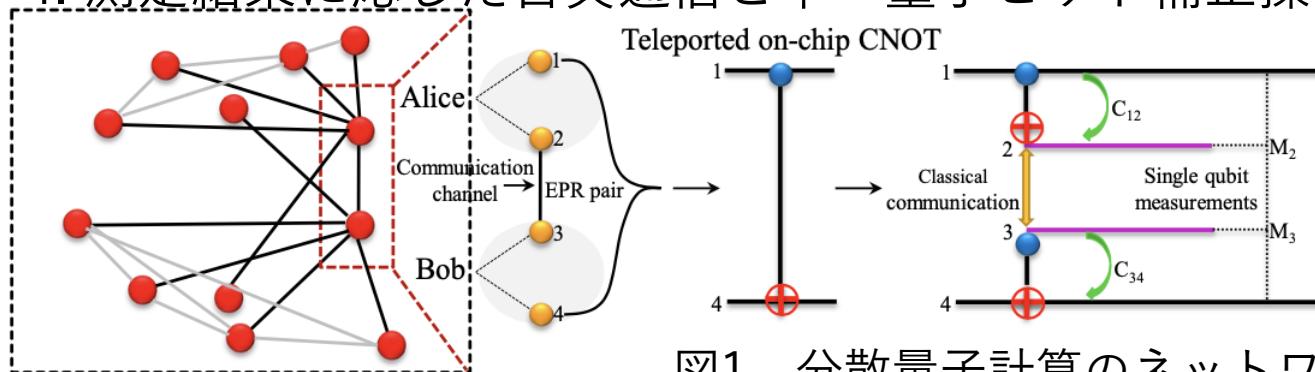
実験系

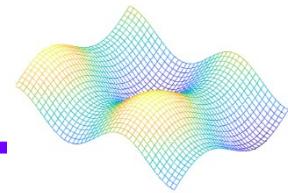
- ・「Alice」と「Bob」の2種類の量子ノードで構成
- ・各ノードは2量子ビットを保持(Alice:1,2 Bob:3,4)
- ・量子ビット2と3はEPRペア(エンタングル状態)で接続
- ・Aliceの局所CNOT(C_{12})をBob側の遠隔ビット(1,4)にテレポート

テレポーテーションの手順

1. EPR対(2,3)の共有
2. AliceとBobがそれぞれ局所CNOTを実行
3. EPRペアの測定(M_2, M_3)
4. 測定結果に応じた古典通信と単一量子ビット補正操作

直接相互作用させずに、ゲート操作だけを転送する仕組み





チップ設計

- ・シリコン導波路厚 : 220nm
- ・導波路間ギャップ : 400nm
- ・結合長 : 11.5μm
- ・デバイスサイズ : $50 \times 50\mu\text{m}^2$
- ・実装素子 : 偏光方向性結合器

チップスケールの偏波分割を効率的に行うためのチップ設計条件

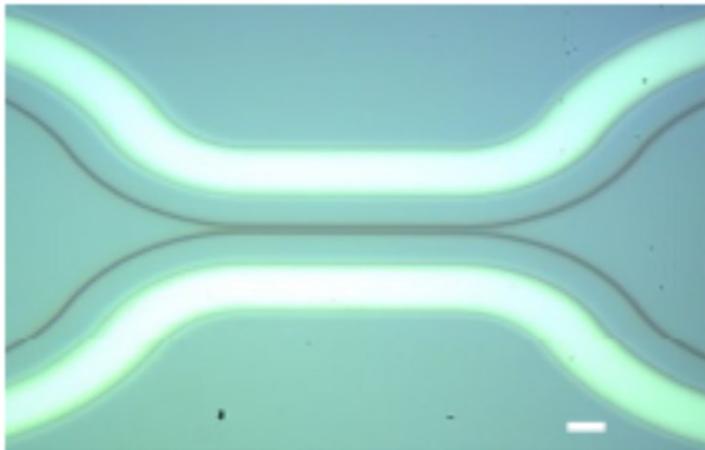
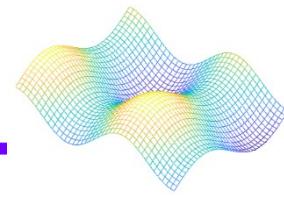


図2 オンチップCNOTゲートの光学顕微鏡写真

実験手法



フォトニックリソース生成

- ・光子のペアは、Type-II自発的パラメトリック下方変換により生成
- ・Alice側のCNOTは、シリコンチップ上の偏光方向性結合器で実現
- ・Bob側は、自由空間のMach-Zehnder干渉計を使ってCNOTを構成
- ・それぞれの出力は光検出器でコインシデンス測定され、テレポーテーションによる出力を統計的に評価する

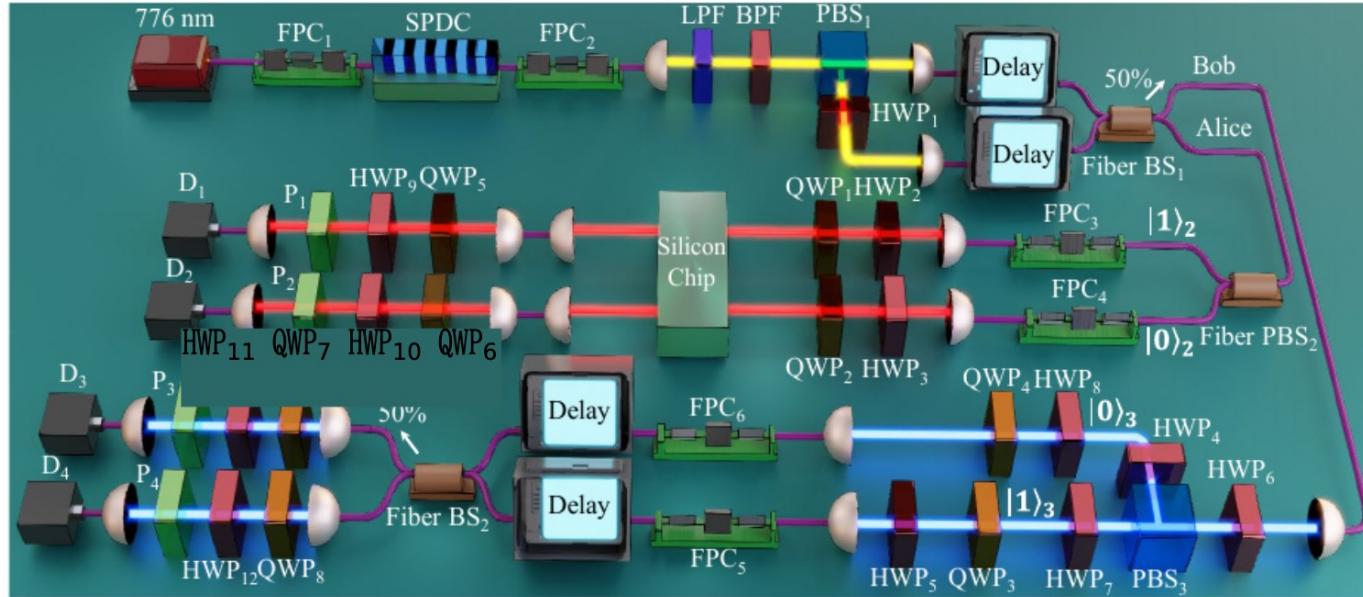
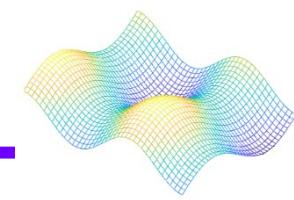


図3 オンチップCNOTゲートの量子テレポーテーションのための実験セットアップ

各素子の役割



FPC … ファイバー内偏光を補正(SPDC効率を最大化)

SPDC … 光子ペアの生成

LPF … 高波長側だけ通す(生成光子の波長整形)

BPF … 特定波長だけ通す(ノイズ除去)

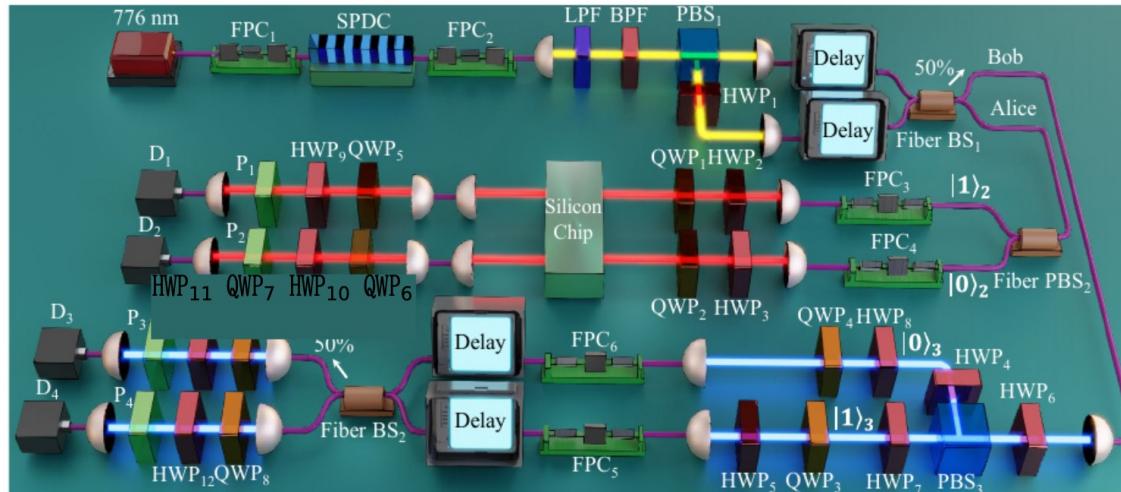
PBS … HとVを分離(偏光を経路に変換)

HWP … 偏光の回転(45°、半波長)

QWP … 1/4波長板(位相制御)

Fiber BS … 経路の干渉(ベル測定に必須)

Fiber PBS … ファイバー内で偏光分離



結果

CNOTの動作確認(平均ゲート忠実度)

- Alice側チップのCNOT : $97.9 \pm 0.3\%$
- Bob側自由空間CNOT : $98.1 \pm 0.3\%$

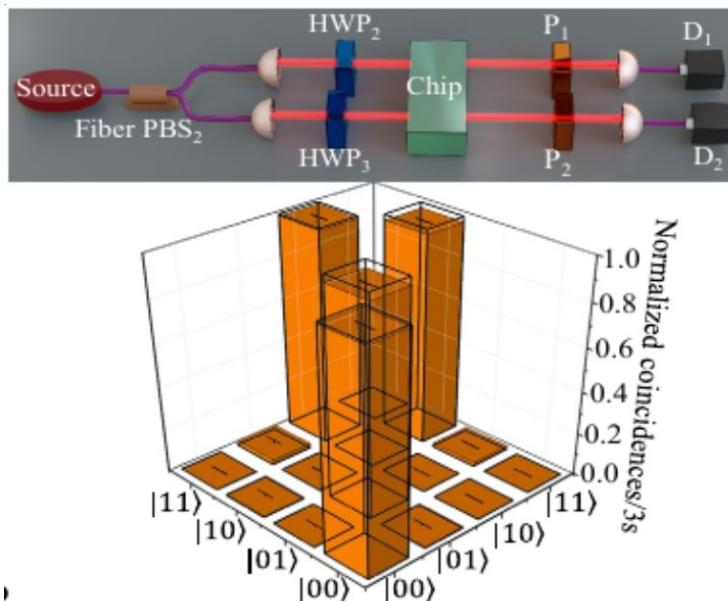


図4 Alice側のテレポート真理値テーブル

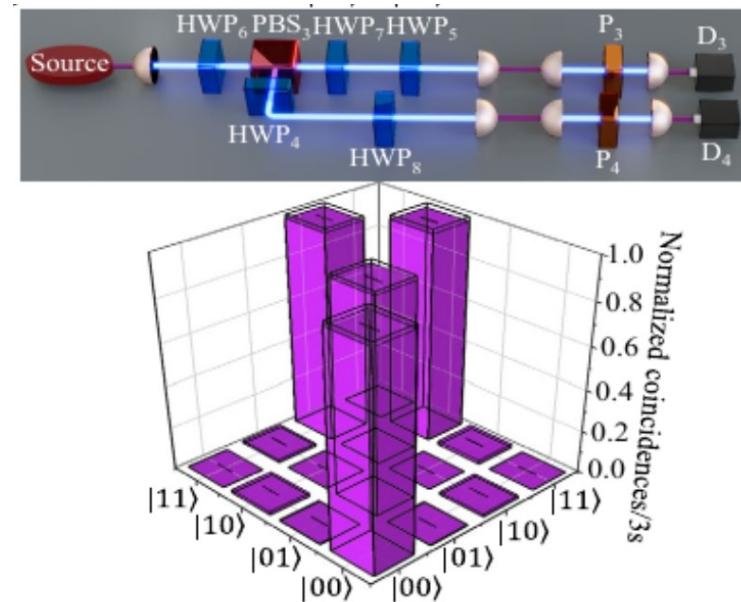


図5 Bob側のテレポート真理値テーブル

結果

実際テレポート行った場合

非局所CNOTの真理値忠実度
 $93.1 \pm 0.3\%$



チップのCNOTが遠隔に
再現されていることが確認

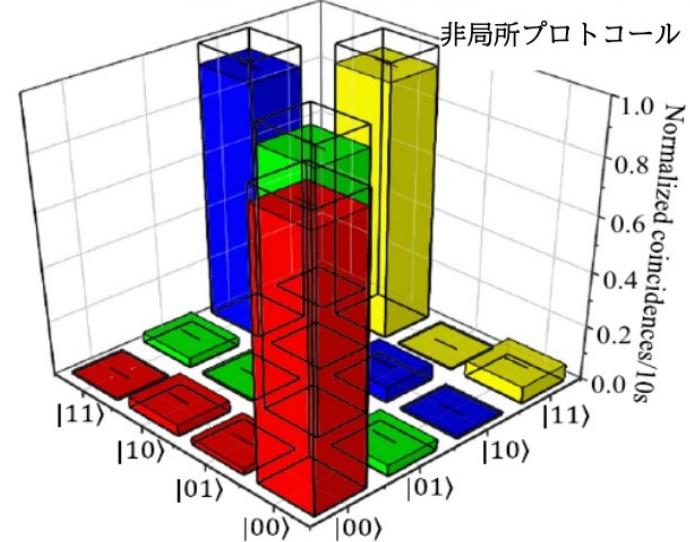
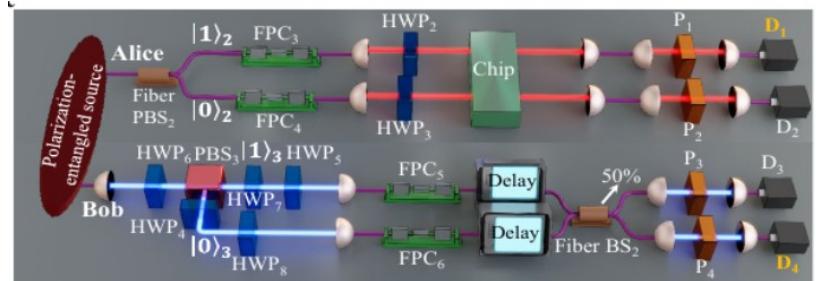


図6 実際テレポートを行ったCNOTの真理値テーブル

結果

量子状態トモグラフィ

- 平均量子状態忠実度: $87.0 \pm 2.2\%$
- ベル状態生成の忠実度: $86.2 \pm 0.8\%$
- プロセス忠実度: $83.1 \pm 2.0\%$
- 平均ゲート忠実度(総合値): $86.5 \pm 2.2\%$



- 非局所CNOTゲートが約86%の精度で正しく転送された
- 光子ベースのチップで行う研究として非常に高い精度である

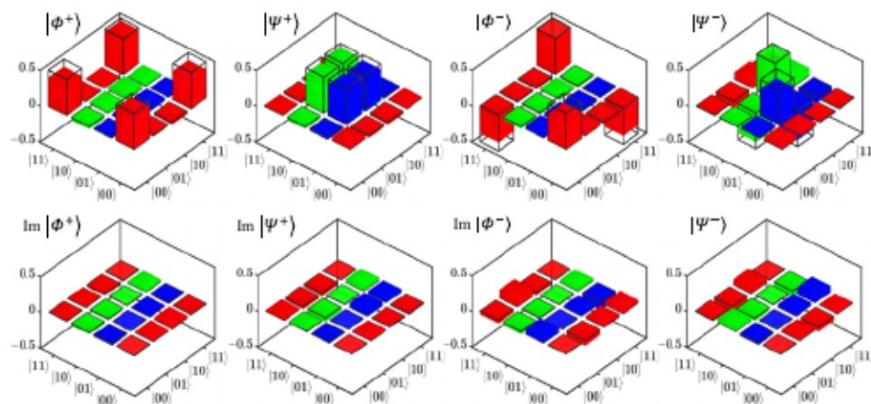


図7 生成されたベル状態の量子プロセストモグラフィ

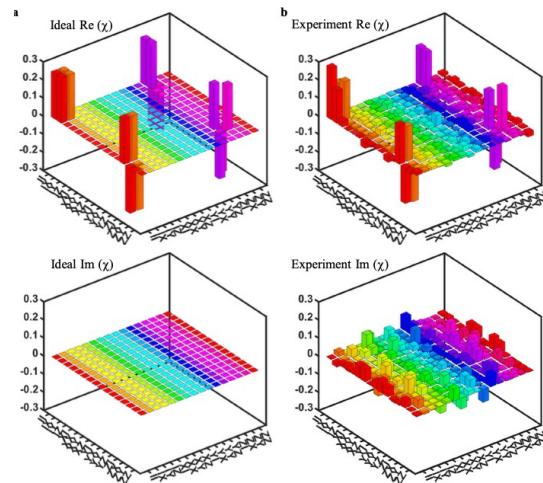


図8 オンチップCNOTゲートのテレポート量子プロセストモグラフィ

ベル状態と量子プロセストモグラフィ

ベル状態・・・2量子ビットが取れる最大エンタングル状態の代表的な4つの状態

$$|\phi^+ = (\lvert 00 \rangle + \lvert 11 \rangle)/\sqrt{2}$$

$$|\phi^- = (\lvert 00 \rangle - \lvert 11 \rangle)/\sqrt{2}$$

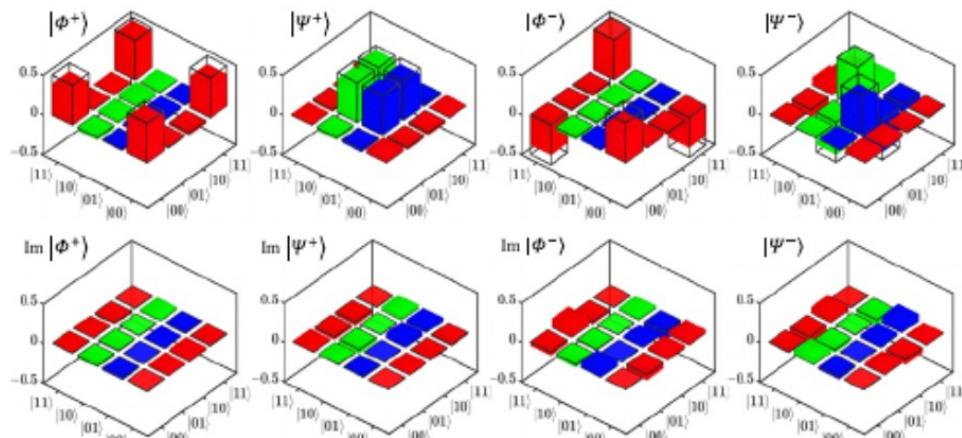
$$|\psi^+ = (\lvert 01 \rangle + \lvert 10 \rangle)/\sqrt{2}$$

$$|\psi^- = (\lvert 01 \rangle - \lvert 10 \rangle)/\sqrt{2}$$

ベル状態の
理論密度行列

$$P_{\phi^+} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$P_{\psi^+} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$



虚部は理想状態でほぼゼロになる
ノイズや干渉器の位相ズレで、
わずかな柱が立つ

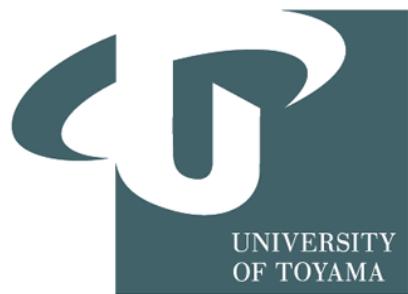
- ・シリコンチップ上でCNOTゲートの量子テレポーテーションを初めて実証
- ・平均ゲート忠実度は約86%
非局所エンタングルメント生成にも成功

今後の展望

- ・チップ間のテレポーテーション
- ・光源とゲートの一体化
- ・CMOS技術を使って光量子ネットワークの大規模構築

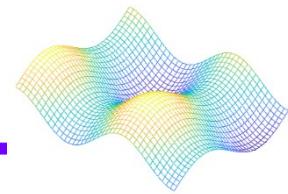
Classical-decisive quantum internet by integrated photonics

(集積フォトニクスによる古典決定型
量子インターネット)

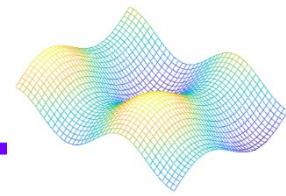


参考文献: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.adx6176>

Citation

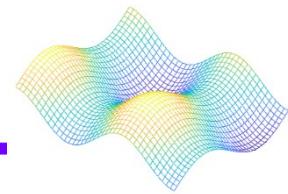


Yichi Zhang, Robert Broberg, Alan Zhu,
Gushu Li, Li Ge, Jonathan M. Smith, and
Liang Feng
Science, **389**, 6763, pp. 940-944 (2025).



- ・量子情報を既存の光ネットワークへ統合する手法を提案
- ・フォトニックチップ上で古典制御と量子ペイロードを同期
- ・高精度なエンタングルメント分配と誤り補償の実証

従来の課題



- ・量子状態操作には事前測定が必要だが、量子信号を破壊する可能性がある
- ・光ファイバー伝送ではノイズや損失が大きく、リアルタイム保証が必要

従来のインターネット

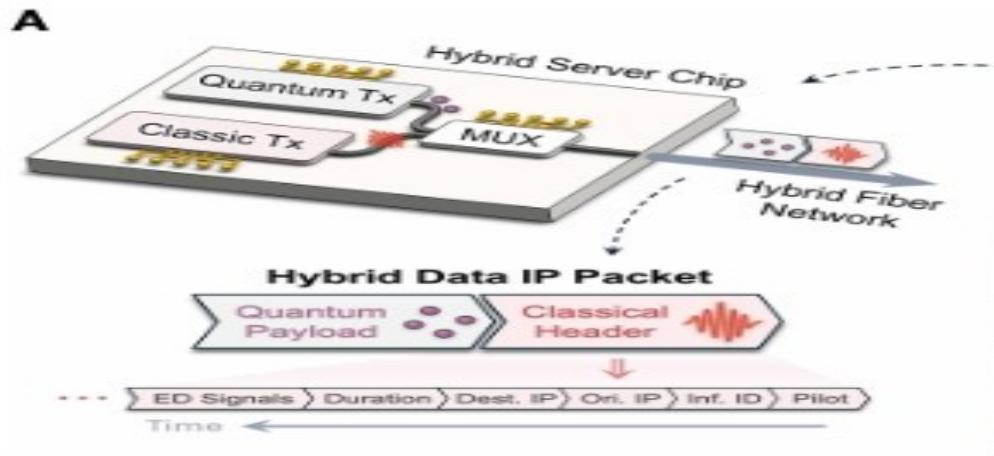
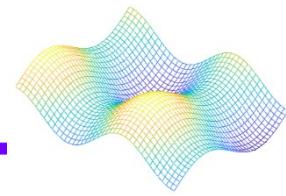


図1従来型決定的量子インターネットの概略図

- ・従来型トランスマルタ、量子Tx、WDM多重化器を含む、ハイブリッドサーバーチップにより駆動

テストベット構成図

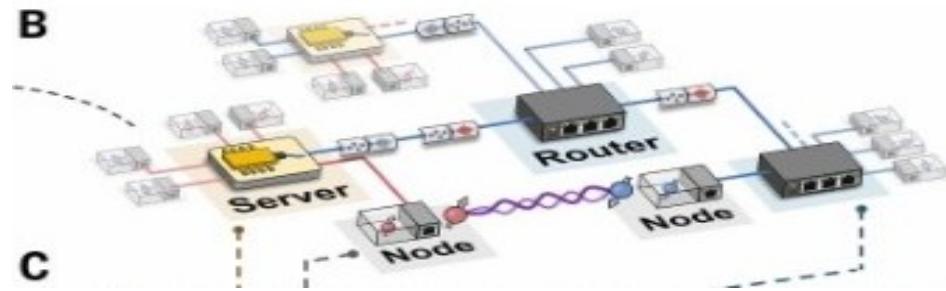
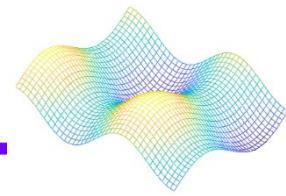


図2 量子-古典ハイブリッドインターネットの概略図

- ・各リンク距離 $1\text{ km} \times$ 複数リンク
(挿入損失 約4.3 dB)
- ・構成: サーバー1台、ルーター1台、ノード複数

テストベッド構成図

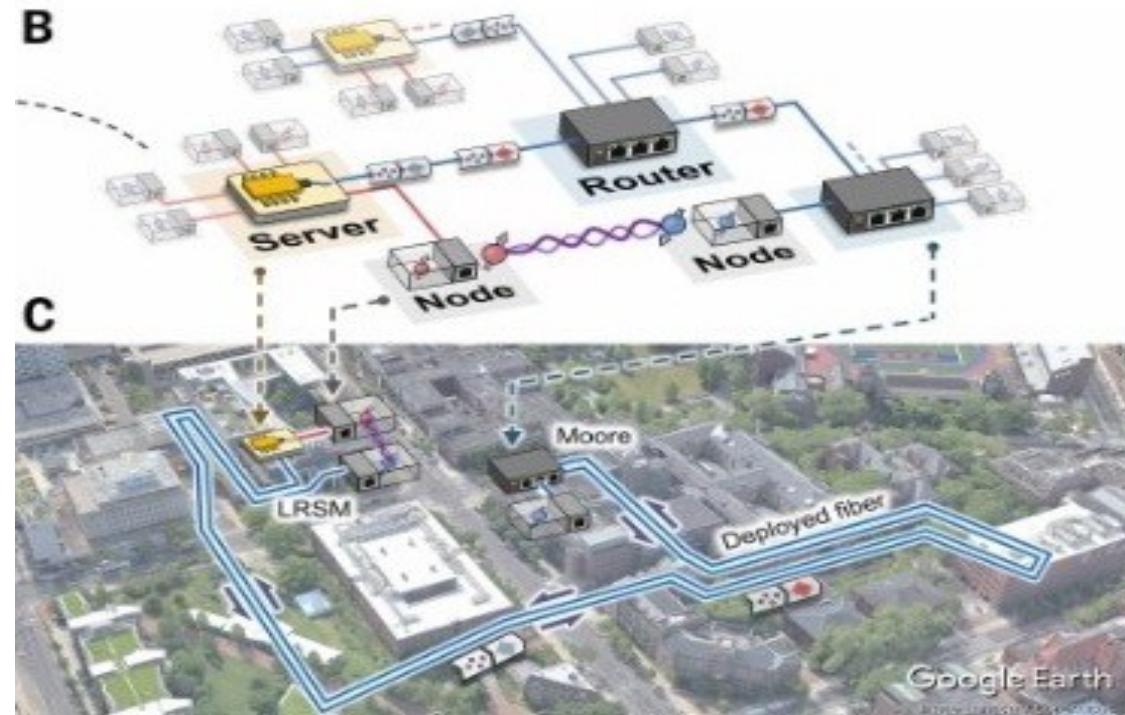
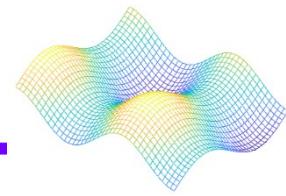


図3 ペンシルベニア大学のマルチノードキャンパスレベルのテストベッド

フォトニックサーバーチップ設計

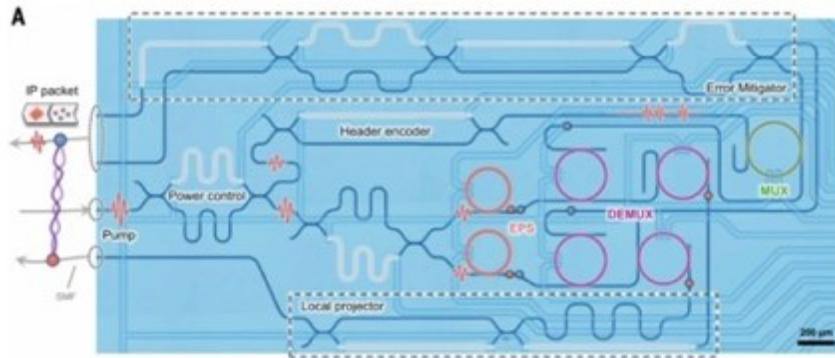
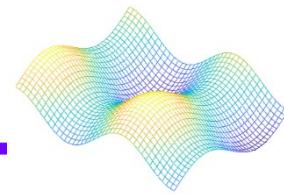


図4 フォトニックサーバーチップ

- ・ SiO_2 基板上に古典Tx(上側経路)と量子Tx(下側経路)を堆積
- ・多重化により古典ヘッダと量子ペイロードを同期送信
- ・チップ上でエラー補償、時間制御、波長分離を実現

エンタングルメント光子対生成



- ・レーザービームがポンプ光として機能し、高品質マイクロリング共振機内の自発4波混合によって生成
- ・レーザー波長に対して対照的に分布し、シグナル光子 1547.72 nm、アイドラー光子 1554.13 nmを中心とする

自発4波混合

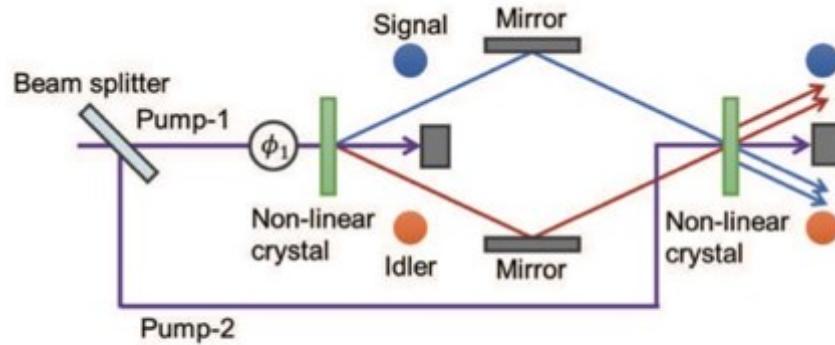
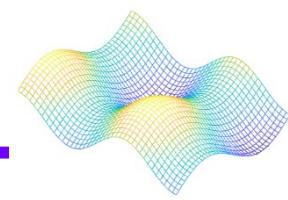
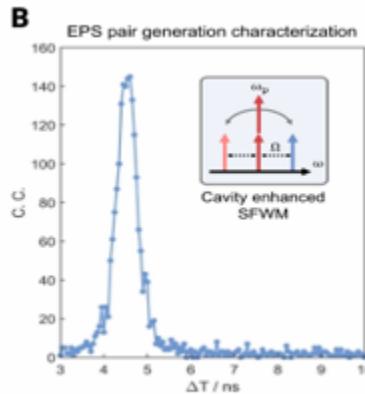
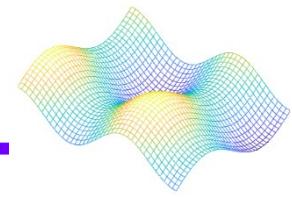


Fig. 1 Schematic of nonlinear interferometer.

図5 非線形干渉系

$$\text{エネルギー保存則: } \Phi_1 = 2\Phi_1 - \Phi_{s1} - \Phi_{i1}$$

量子状態トモグラフィによる特性評価



- ・コヒーレンス時間 0.54 nsを達成
- ・忠実度 $F=0.983$
高純度 $P=0.979$

図6 コヒーレンス時間

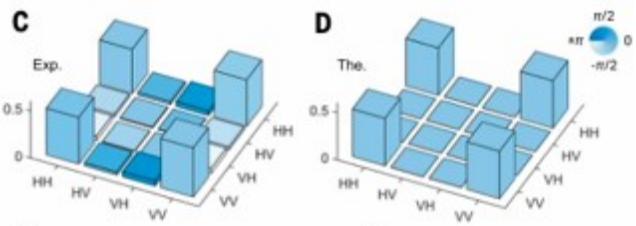


図7 忠実度と高純度の実証(C)、理論予想(D)

単一光子検出モジュールでの検証

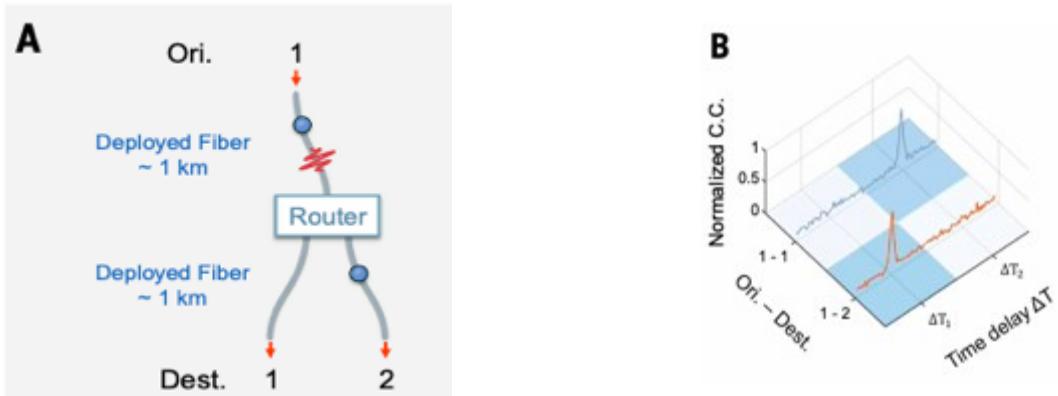
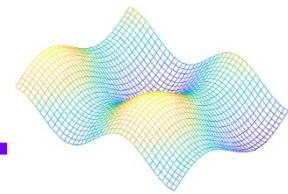


図8 1つの送信元IPアドレスと2つの宛先IPアドレス

- ・量子ルーティング精度 PR1=0.971

複数ルータ拡張

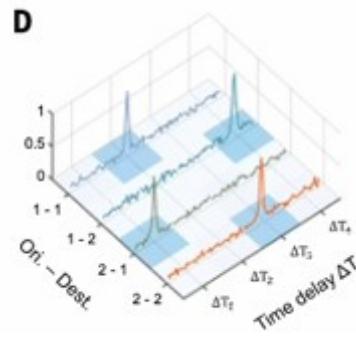
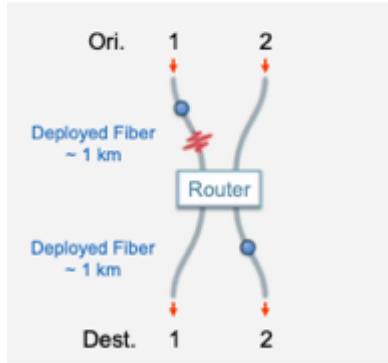
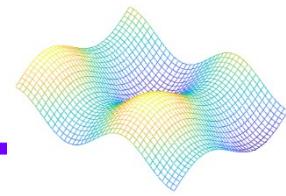


図9 2つの送信元IPアドレスと2つの宛先IPアドレス

- 量子ルーティング精度 PR2=0.962

複数ルータ拡張

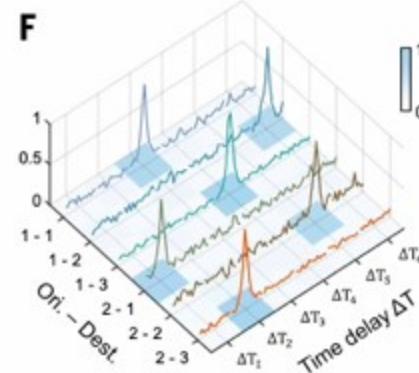
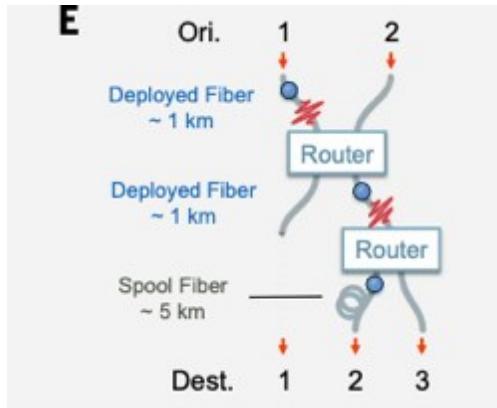
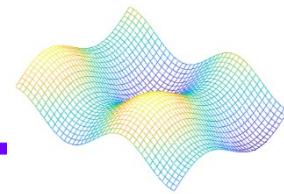
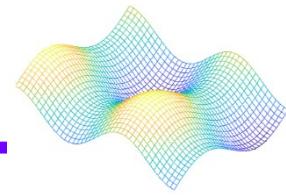


図10 2つの送信元IPアドレスと3つの宛先IPアドレス

- ・量子ルーティング精度 $PR_3=0.916$
- ・理想的なシナリオである $PR=1.0$ との僅かな偏差は量子ノイズに起因する



問題点

- ・振動、温度変化、幾何学的変形や回転により偏光状態が変わってしまう
- ・偏光変動の補正を行わなければ、量子情報の完全性が失われる

古典信号による補正

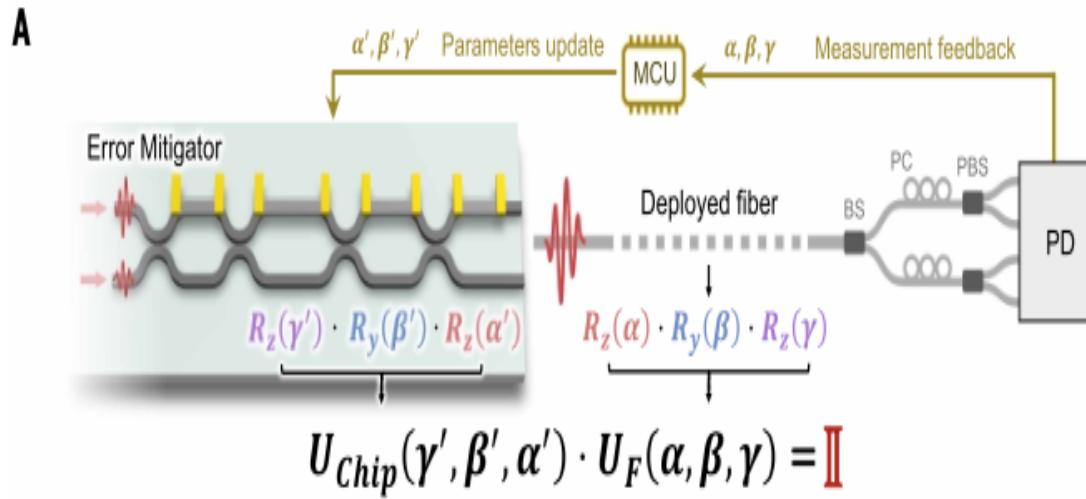
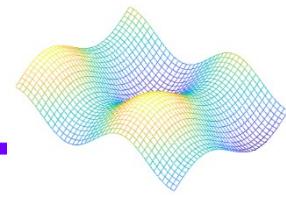


図11

エラー軽減アルゴリズムの概略図

誤差補償結果

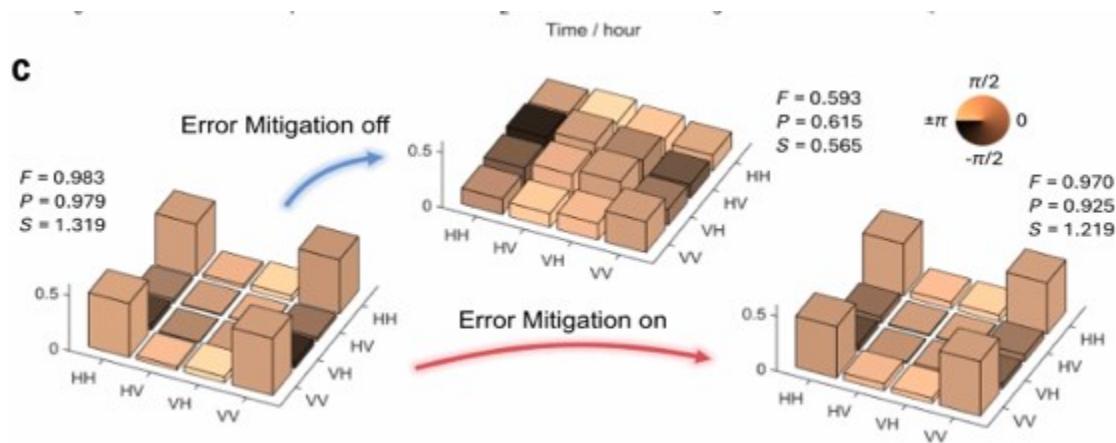
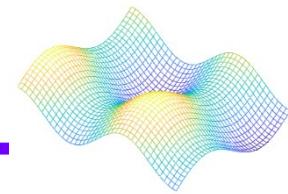
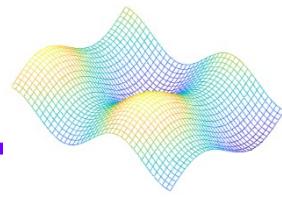


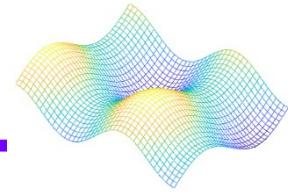
図12 分布した絡み合った光子の量子状態の断層撮影

- ・ エラー軽減機能有効時、97%以上の制度を維持 $F = 0.970$
- ・ 無効時 精度低下 $F = 0.593$



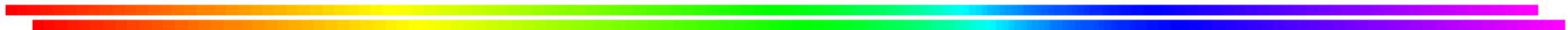
- ・量子情報処理と先進的光子技術を統合することにより、量子と古典のハイブリッドデータ通信が可能になる
- ・ハイブリッドIPネットワーキングは、量子情報の完全性を維持しつつ、エンタングメント分配を効率的に誘導する上で役立つ

今後の展望

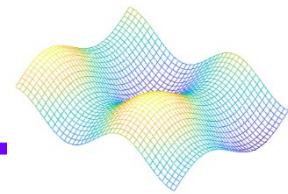


- ・実用的な量子通信インフラの構築
- ・量子暗号・量子鍵配達の安定化
- ・分散量子計算・クラウド量子処理への応用
- ・将来の量子メモリや高速フォトニクスとの連携

高次元クラスター状態を持つ 資源効率の良いフォトニック量子計算



Citation

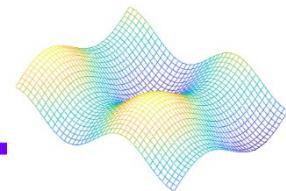


Ohad Lib^{1*} and Yaron Bromberg¹

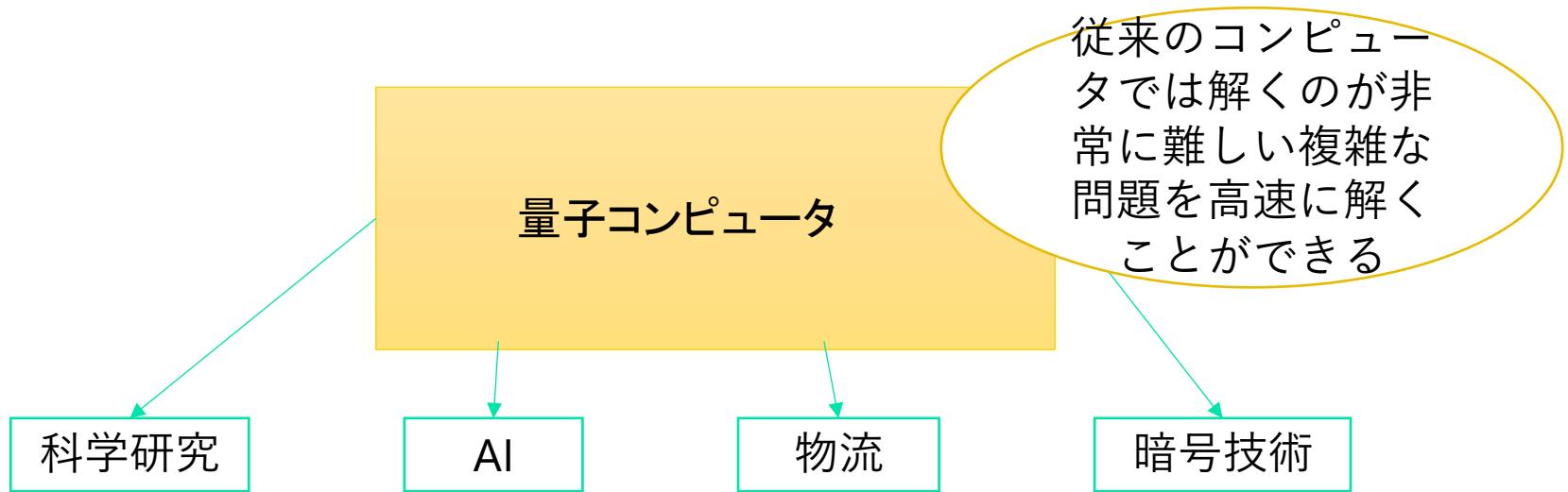
¹*Racah Institute of Physics, The Hebrew University of Jerusalem, Jerusalem, 91904, Israel

Lib, O., Bromberg, Y. Resource-efficient photonic quantum computation with high-dimensional cluster states. *Nat. Photon.* **18**, 1218–1224 (2024).

<https://doi.org/10.1038/s41566-024-01524-w>

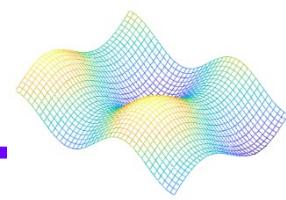


概要



大きな課題 スケーラビリティ

システムが、負荷の増減に対して、品質やパフォーマンスを維持しながら、柔軟に規模を拡大
・縮小できる能力



概要

高次元エンコーディングを用いたフォトニック量子計算

- 1つの光子に複数の量子ビットをエンコードすることで、9量子ビット以上のクラスタ状態を毎秒100回のレートで生成

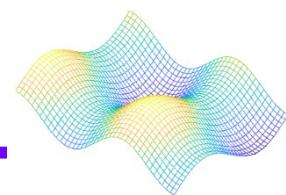


従来問題だった検出確率の低下を克服

- 同一光子内の量子ビット間での瞬時フィードフォワードを可能に



計算時間の大幅な短縮



概要

量子コンピュータは古典コンピュータを超える計算能力を示す可能性を持つ。しかし、物理的な実現は非常に困難である

- 物質ベースの量子システム

デコヒーレンスやノイズが問題。

- フォトニックシステム

光子間相互作用の弱さが2量子ビットゲートを難しくしている。

あらかじめ生成

クラスタ状態

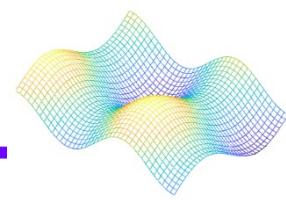
実際には大規模化は
困難

解決
策

測定ベースの量子コンピューティング(MBQC)パラダイム

高次元エンタングルメントを利用

最大9.28量子ビットのクラスタ状態
100Hzという高い検出率で生成



実験手法

①高次元MBQCクラスタ状態生成

1. 異なる光子間での高次元エンタングルメント生成
2. 各光子内にエンコードされた複数量子ビット間のエンタングルメント確立
3. 異なる基底での測定によるMBQC操作の実現

②高次元空間エンタングルメントの生成

- ③同一光子内の量子ビット間エンタングルメント
- ④高次元測定と多面光変換 (MPLC)
- ⑤実証実験：2光子8量子ビットクラスタ状態

高次元MBQCクラスタ状態生成

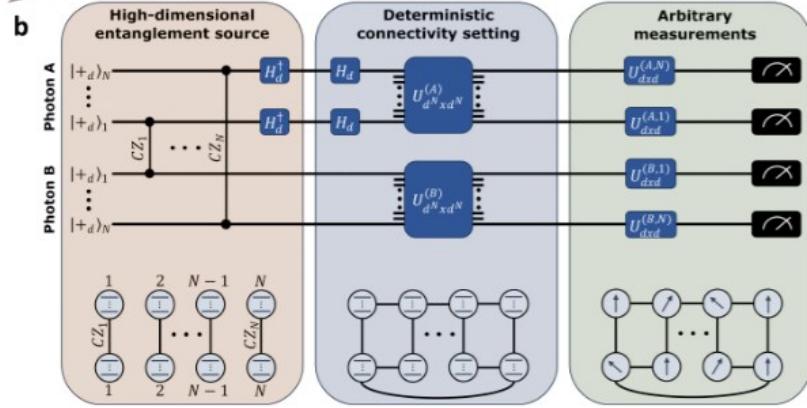
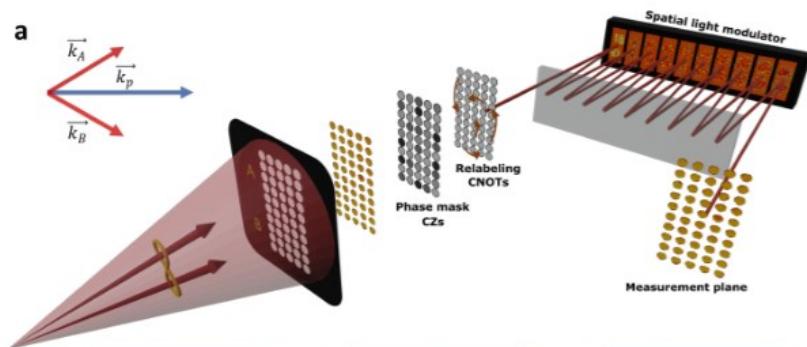
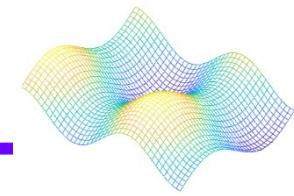


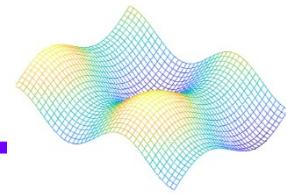
図1a) 実験装置構成

(図1b上) 等価量子回路

(図1b下) 結果としてのクラスタ状態構造

図1 高次元空間エンコードされたクラスタ状態

瞬時フィードフォワードを介した効率的なMBQC



MBQC

大規模クラスタ状態を準備し、その後の単一量子ビット測定によって量子ゲートを実現する枠組み

inter-feedforward (光子間)

- 異なる光子にエンコードされた量子ビット間のフィードフォワード

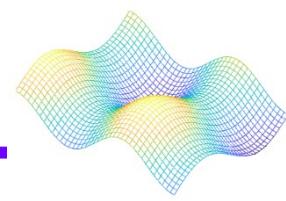
intra-feedforward (光子内)

- 同一光子内の量子ビット間のフィードフォワード

同じ光子内の複数量子ビットは同時に崩壊してしまうため ×

同一光子内の問題を逆に利用

瞬時・受動的フィードフォワード
(instantaneous passive feedforward)
を実現

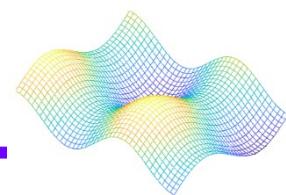


瞬時・受動的フィードフォワードの基本原理

- 光子の運動量（空間モード）に条件づけて偏光を測定するという先行研究を発展。
- 線形光学回路をあらかじめ設計された形で調整し、アクティブ制御なしに複数のフィードフォワードを同時に実行する。
- フィードフォワード操作を、等価な多量子ビットゲート（multi-qubit gate）として光子内ヒルベルト空間上にエンコード。
- その後、光子に含まれるすべての量子ビットを同時測定する。



本来は逐次的（多ステップ）に必要だった測定を、1ステップで完了できる。



このアプローチを、5量子ビット線形クラスタ状態で検証

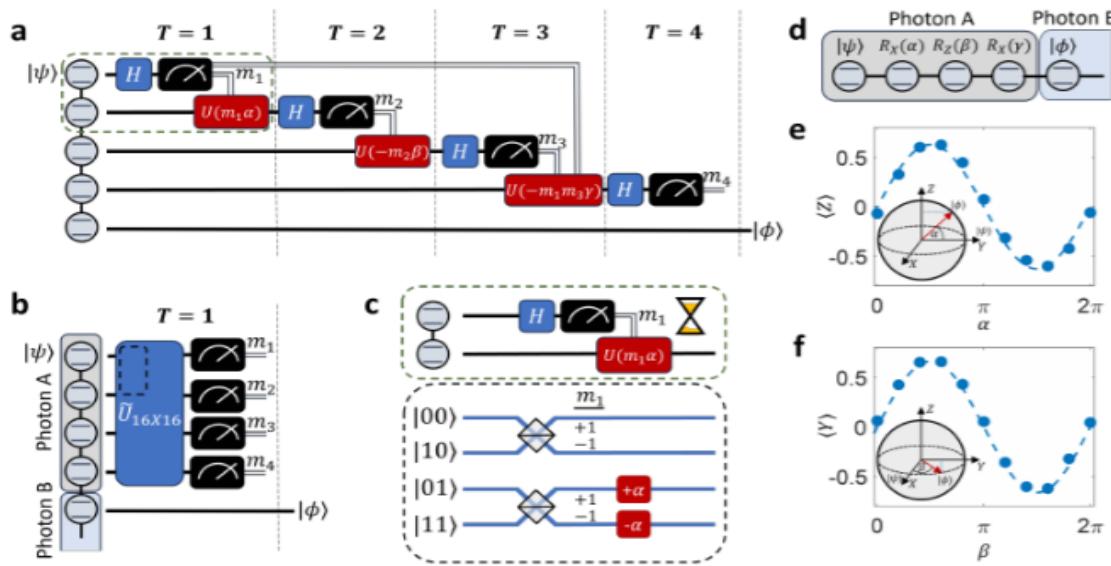


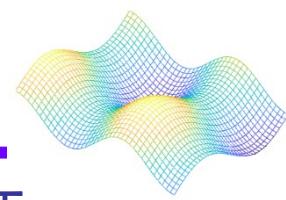
図3 瞬時イントラフィードフォワードを用いた1量子ビット回転

結果

- 測定結果：出力期待値は理論曲線と良好に一致（図3d-f）
- 若干の視認性低下は、主に実験的忠実度の不完全性による。



瞬時フィードフォワード内操作が実際にMBQCで有効に機能することを確認



Qudit($d=5$)の高次元クラスタ状態の生成・実証

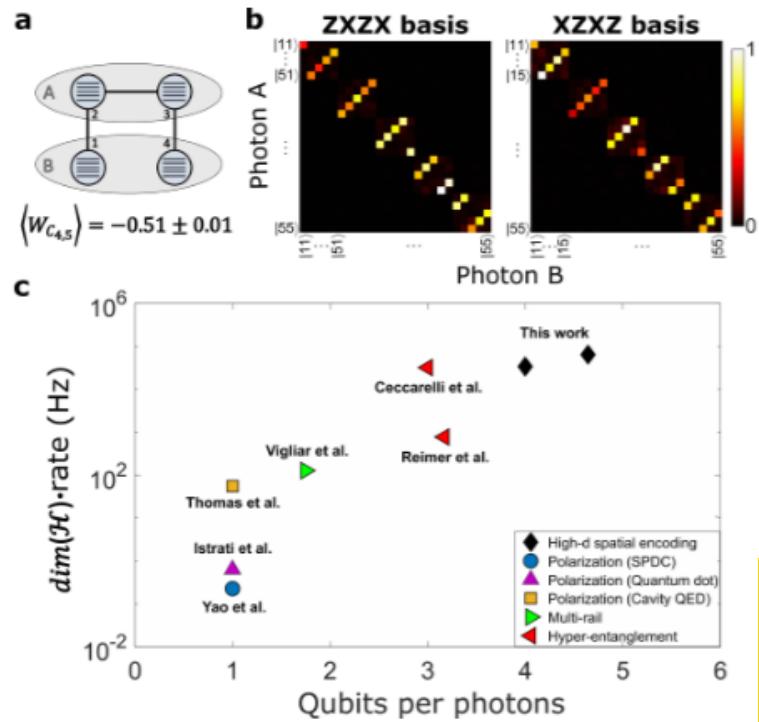


図4 $d = 5$ quditクラスタの状態

実験内

構成

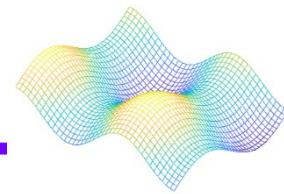
2光子系に計50個の空間モードを用いて、 $d = 5$ （五次元）の4-quditクラスタ状態を生成。

（ハーフ1/4モード+1/2モード+1モード用）
測定とエンタングルメントの確認

$d = 5$ quditクラスタ状態専用に適応したエンタングルメント証人を使用し、2つの相互に不偏な基底（MUBs）で測定を

測定結果： $\tilde{W} = -0.51 \pm 0.01$
⇒ 真正な4-quditエンタングルメントが明確に確認された
 $W = \alpha \hat{I} - |\psi\rangle\langle\psi|$

Qubitとqudit



- Qubit (キュービット): Quantum Bit (量子ビット)

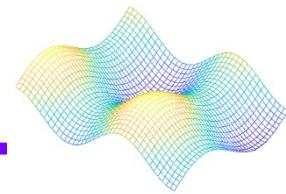
2準位の量子系

0と1という2つの状態、およびその両方を同時に取りうる「重ね合わせ状態」で情報を保持

- Qudit (キューディット): Quantum Digit (量子ディジット)

d準位 (d は2以上の整数) の量子系($0, 1, \dots, d-1$)という d 個の状態と、その重ね合わせ状態

最終結果

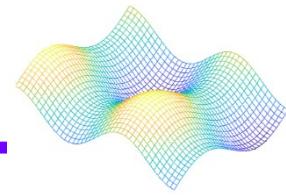


本実験で得られたクラスタ状態のヒルベルト空間次元

$$\dim(H)=625$$

→ これは **9.28量子ビット**に相当。

- 光子あたり4量子ビット以上のエンコードを行うことで、史上最高の有効量子リソース率を達成。
- 高次元エンコーディングは、瞬時フィードフォワードの利点を超えて、クラスタ状態生成の効率とスループットを劇的に向上させる。



■ ベクトル空間

「状態」をベクトルで表す場所。足し算（重ね合わせ）が可能

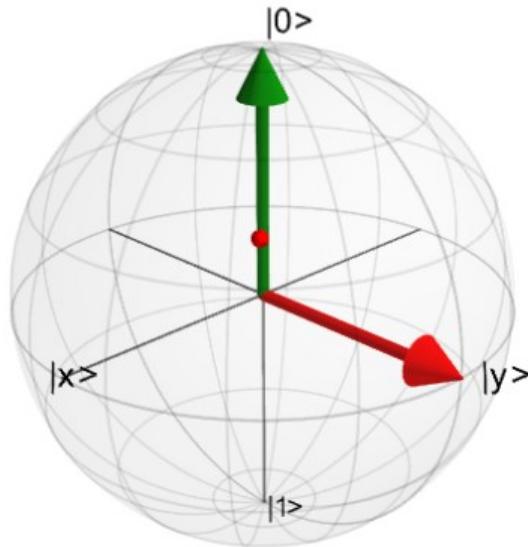
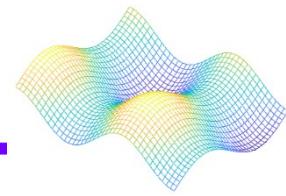
■ 内積

2つのベクトルから数値を計算。角度や長さを定義できる

■ 完備性

空間に「隙間」がないこと。極限（微分積分など）を安全に扱える

プロッホ球



$$\dim(H)=2$$

二次元ヒルベルト空間

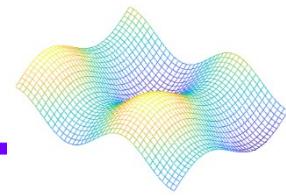
各点が一つの量子ビットの状態

0と1は古典的なビットの0と1に対応

xやyなど表面上のほかの点は0と1が重ね合わさった[重ね合わせ状態]

$$\dim(H)=25^2=625$$

光子1個につき25モードが絡み合つてうまれた空間



将来的な発展方向：

- より高次元のもつれ光子生成（薄膜やメタサーフェス利用）
- 大規模MPLC・集積フォトニクス回路の活用
- 高効率検出器（SNSPD, SPADアレイ）導入
- 複数光子クラスタへのスケールアップ

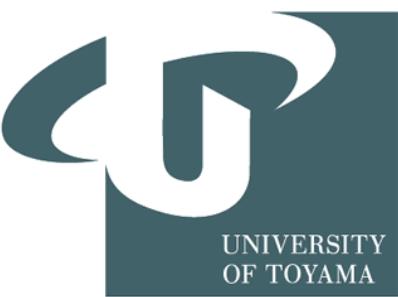
本研究は、

「量子ビット」ベースの限界を超えたフォトニック量子計算・通信の新しいパラダイムを示した。

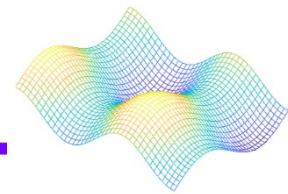
これにより、スケーラブルで実用的な測定ベース量子コンピューティング (MBQC) と、

将来の量子インターネットへの道が現実味を帯びた。

Quantum optical reservoir computing powered by boson sampling

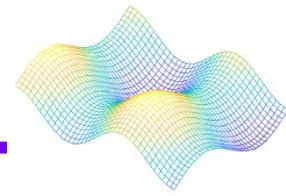


Citation



Akitada Sakurai, Aoi Hayashi, William John Munro, and Kae Nemoto, "Quantum optical reservoir computing powered by boson sampling," *Optica Quantum* **3**, 238-245 (2025)

<https://doi.org/10.1364/OPTICAQ.541432>

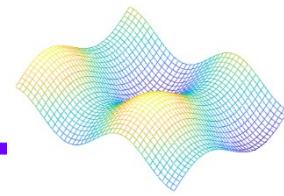


背景

- ・ボソンサンプリング: 同一光子がランダム干渉計を通過する確率分布をサンプリングする量子計算モデル
- ・実用化がこれまで難しかった

目的

- ・複雑なダイナミクスを活用し、量子光学リザーバ計算で画像認識を向上



「貯水池」

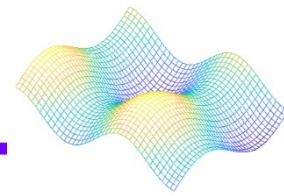
従来の方式

- ・ 箱の中の全部のスイッチを何千回も調整して学習する

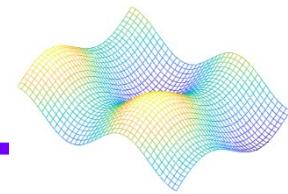
リザバー方式

- ・ 中のつなぎ目は最初からランダムで固定
- ・ 一切いじらない
- ・ 最後の「出力部分だけ」を高速で学習

ボソンサンプリング



- ・同一の光子がランダム干渉計を通過する際の確率分布をサンプリングする量子計算モデル
- ・古典的なコンピュータでは処理が非常に困難
- ・光子の性質を利用し、複雑な計算を可能にする



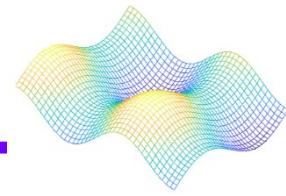
■定義

- ・ボソンサンプリングで生成される複雑な量子状態
- ・入力データ θ を非線形に変換した中間状態
- ・古典コンピュータでは再現不可能な高次元分布

役割

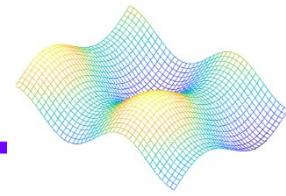
- ・入力 → 複雑変換 → 線形分類器
- ・誤差逆伝播法不要(学習は出力層のみ)

$$p_n = |\langle n | U(\theta) | 1 \rangle|^2$$

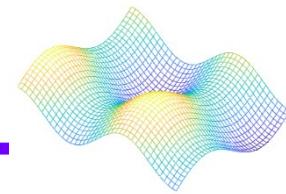


研究アプローチ

- ・量子リザーバ計算: 量子状態の非線形性を利用
- ・ボソンサンプリングでリザーバ状態生成
- ・手書き数字識別データセット、手書き平仮名データセット、ファッショントータセットの3種
- ・単一光子入力で高精度

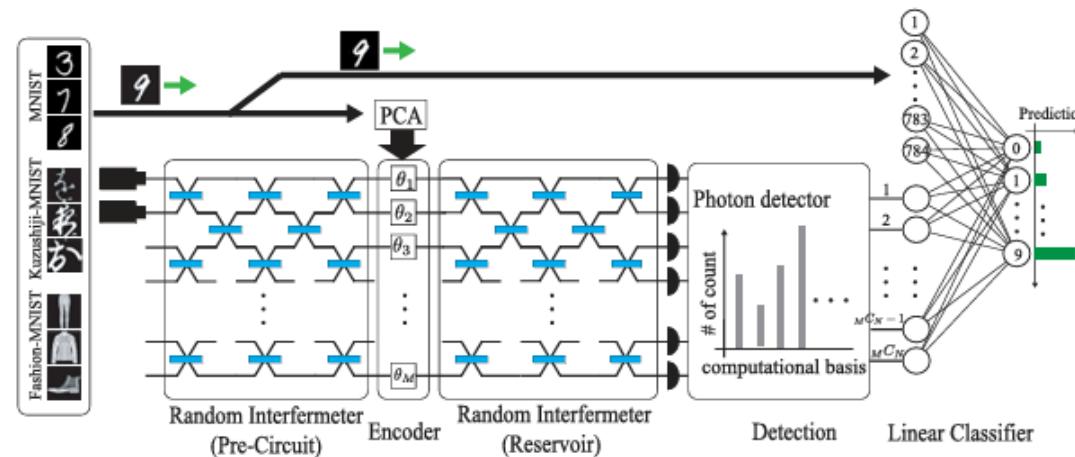


- ・量子状態の非線形性を利用した機械学習モデル
- ・入力→複雑変換→線形分類 - 誤差逆伝播法不要

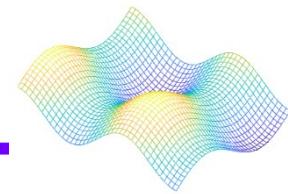


プロセス

1. 主成分分析で圧縮 ($\theta_1 \sim \theta_M$)
2. 単一光子をMモード干渉計に入力
3. 位相エンコーディングで埋め込み
4. バケット検出で確率分布測定
5. 線形分類器で最適化

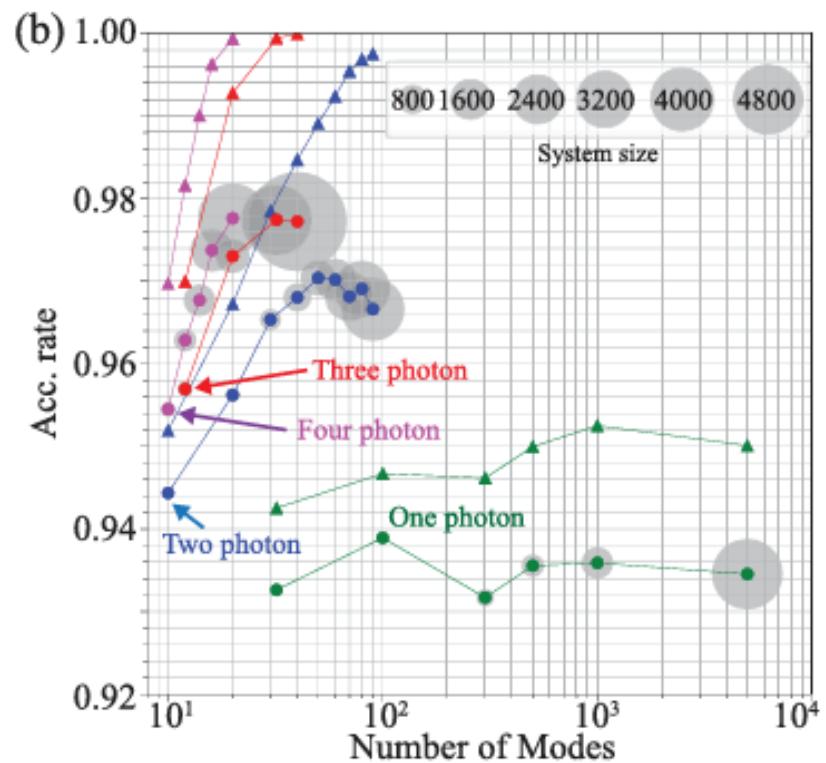
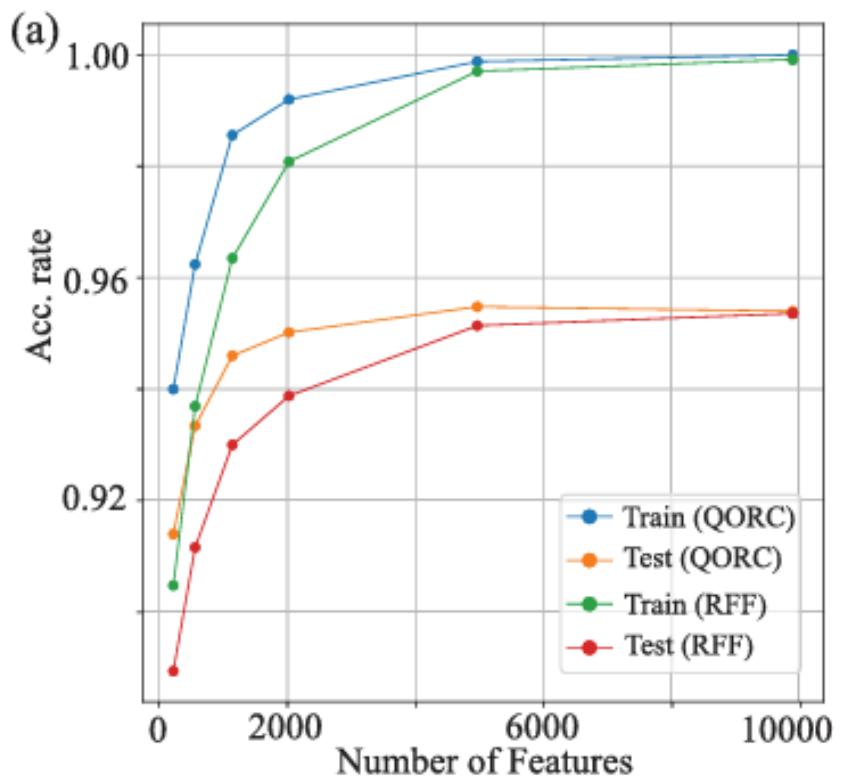
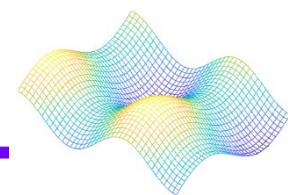


シミュレーション結果

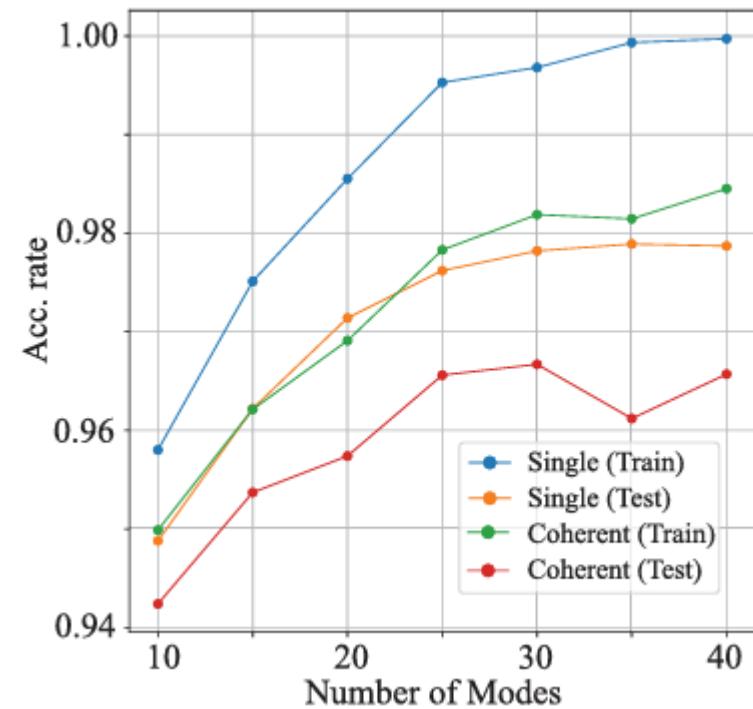
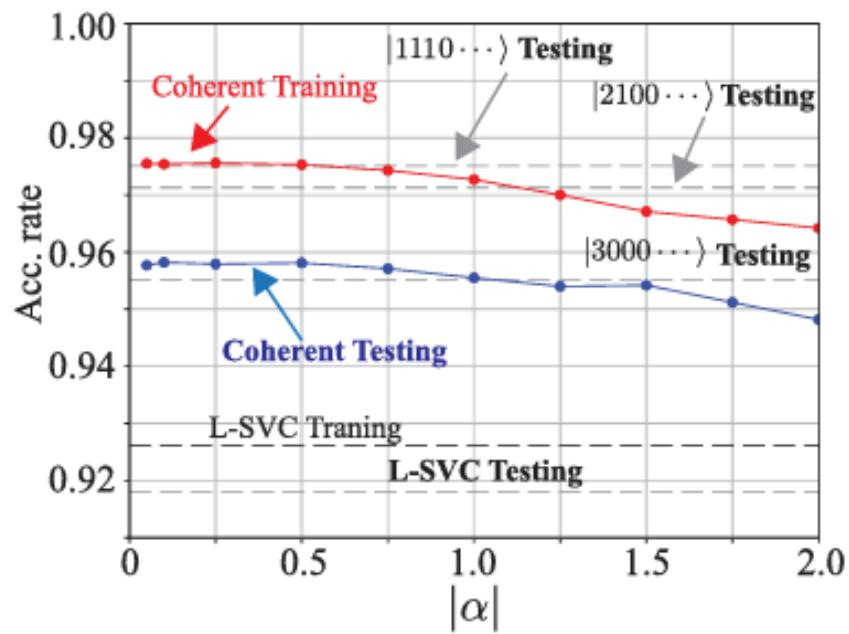
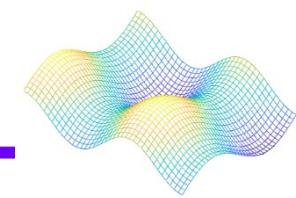


(N,M)	Dataset		
	MNIST	K-MNIST	Fashion-MNIST
(3,12)	0.9700 ± 0.0002	0.9310 ± 0.0003	0.8938 ± 0.0005
	0.9569 ± 0.0005	0.8176 ± 0.0011	0.8662 ± 0.0006
(3,16)	0.9853 ± 0.0003	0.9541 ± 0.0003	0.9050 ± 0.0004
	0.9688 ± 0.0004	0.8479 ± 0.0014	0.8750 ± 0.0010
(3,20)	0.9896 ± 0.0002	0.9663 ± 0.0004	0.9097 ± 0.0006
	0.9705 ± 0.0003	0.8643 ± 0.0010	0.8766 ± 0.0019
(3,24)	0.9953 ± 0.0002	0.9795 ± 0.0007	0.9173 ± 0.0003
	0.9753 ± 0.0007	0.8857 ± 0.0016	0.8801 ± 0.0020
(3,32)	0.9996 ± 0.0001	0.9932 ± 0.0003	0.9297 ± 0.0009
	0.9784 ± 0.0004	0.8991 ± 0.0011	0.8826 ± 0.0025
(3,40)	1.0000 ± 0.000	0.9978 ± 0.0002	0.9383 ± 0.0008
	0.9783 ± 0.0005	0.9013 ± 0.0016	0.8769 ± 0.0055
L-SVC	0.9262	0.835	0.873
	0.918	0.676	0.839
RFF	1.0000	0.9954 ± 0.0002	0.9337 ± 0.0006
	0.9713 ± 0.0002	0.8438 ± 0.0011	0.8752 ± 0.0020
RBF	0.999	1.000	0.972
	0.984	0.929	0.900

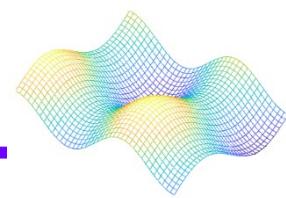
シミュレーション結果



コヒーレント状態との比較

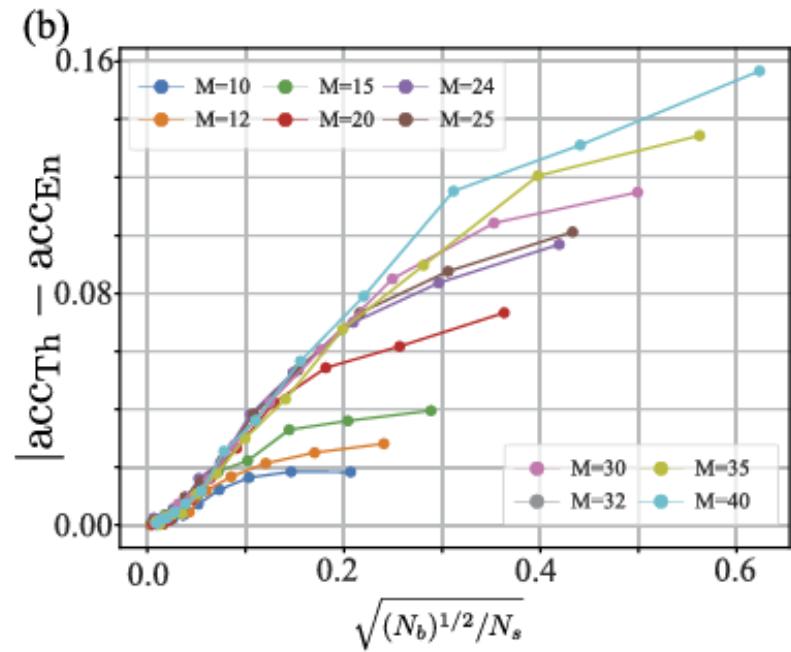
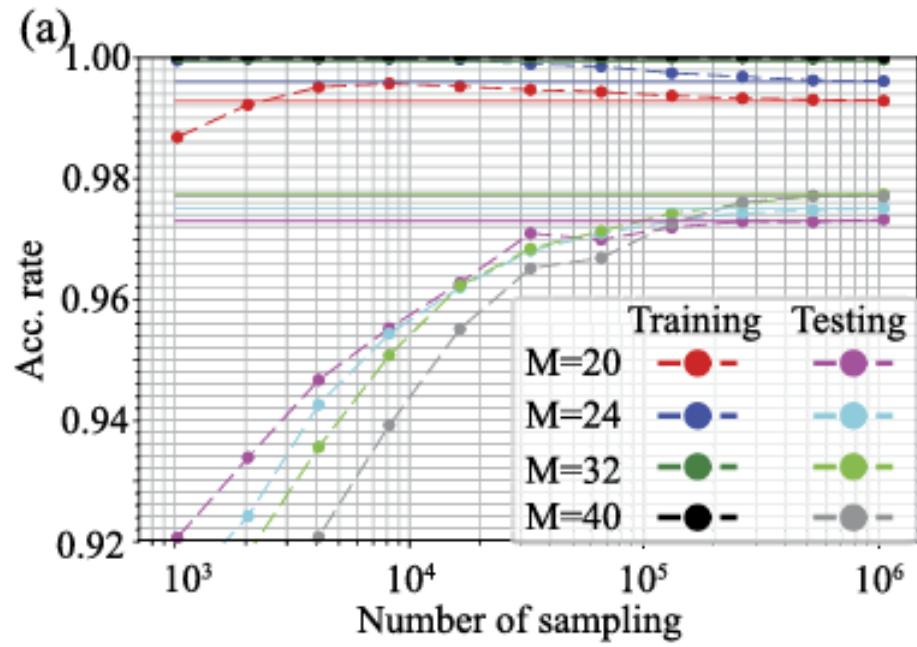


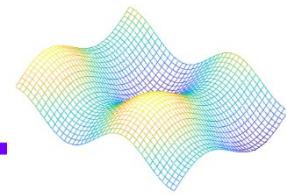
計算コストの分析



最適化コスト

- 量子光学リザーバ計算: $O(DLM + M^2\sqrt{N_b})$





1. 非古典的干渉

→ 古典では再現不能な複雑な確率分布

2. スケーラビリティ

→ M增加だけで性能向上（古典では計算爆発）

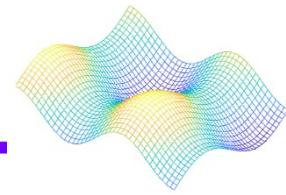
3. 効率的な学習

→ 出力層のみ最適化（誤差逆伝播法不要）

結論

→ 単一光子で古典を圧倒

東田昌了機械学習の「差答」



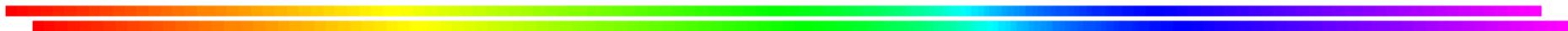
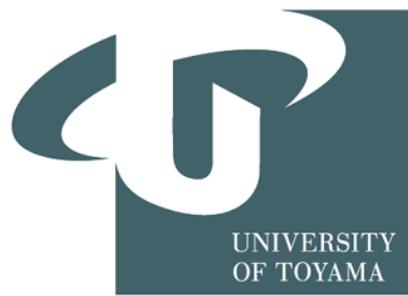
結論

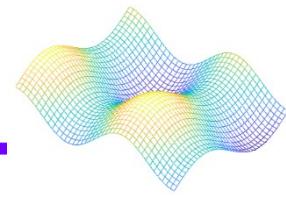
- ・ボソンサンプリングで高性能画像認識
- ・単一光子がコヒーレント状態を圧倒

展望

- ・大規模光子源・検出器の実験
- ・新しいエンコーディング手法

Robust quantum computational advantage with programmable 3050-photon Gaussian boson sampling

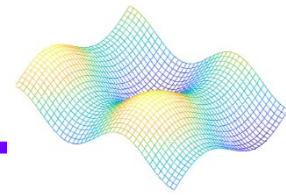




Hua-Liang Liu, Hao Su, Si-Qiu Gong, Yi-Chao Gu,
Hao-Yang Tang, Meng-Hao Jia, Qian Wei, Yukun Song,
Dongzhou Wang, Mingyang Zheng, Faxy Chen, Libo Li,
Siyu Ren, Xuezhi Zhu, Meihong Wang, Yaojian Chen,
Yanfei Liu, Longsheng Song, Pengyu Yang, Junshi Chen,
Hong An, Lei Zhang, Lin Gan, Guangwen Yang,
Jia-Min Xu, Yu-Ming He, Hui Wang, Han-Sen Zhong,
Ming-Cheng Chen, Xiao Jiang, Li Li, Nai-Le Liu,
Yu-Hao Deng, Xiao-Long Su, Qiang Zhang, Chao-Yang Lu,
and Jian-Wei Pan

参考文献:<https://arxiv.org/html/2508.09092v3>

2025年8月24日



光子損失・ノイズに強くプログラム可能な大規模光量子システムで、量子の計算優位性を示すこと

量子の計算優位性

因数分解や、本研究のGBS実験において

古典コンピュータ
指数関数的に増大

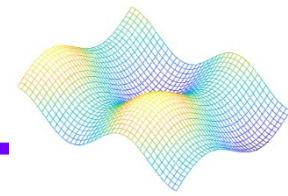
<

量子コンピュータ
多項式時間で収まる

量子コンピュータの方がはるかに計算能力が高い

光子損失・ノイズに強くプログラム
可能な大規模光量子システム
(ガウス・ボソン・サンプリング)

→ Jiuzhang4.
0



ボソン・サンプリング

光子などのボソンが特定の光学回路を通過した際に生じる複雑な干渉効果を利用して、特定の確率分布からサンプリング（標本抽出）を行う量子計算手法

入力状態：単一光子

光学回路：Mモードの線形光学干渉計

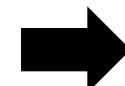
検出：正確な数を検出する検出器

課題⇒入力の障壁、検出の障壁

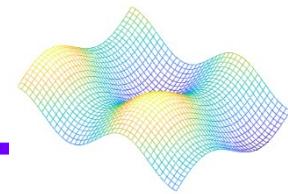
ガウスボソンサンプリング

変更点

- ・入力状態をガウス状態に変更
- ・検出器要件の緩和

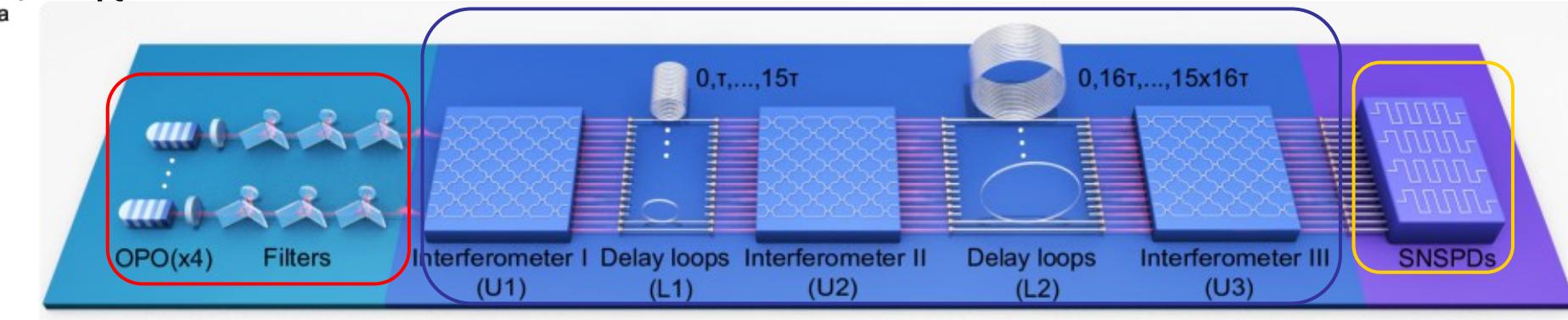


実現可能な設計



Jiuzhang4.

最大1024個の入力スクイーズド状態と8176個の出力モード



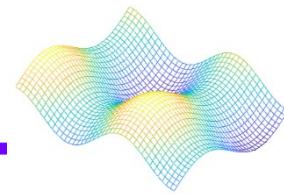
構成の3つの主要部分

①スクイーズド光源

②時間・空間ハイブリット符号化回路

③単一光子検出システム

スクリーズド光



スクリーズド光 → ある特定の物理量を圧縮

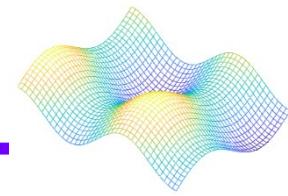
コヒーレント状態

$$\Delta X \cdot \Delta Y = \frac{1}{4} \text{かつ } \Delta X^2 = \Delta Y^2 = \frac{1}{4} \rightarrow \text{circle}$$

スクリーズド状態

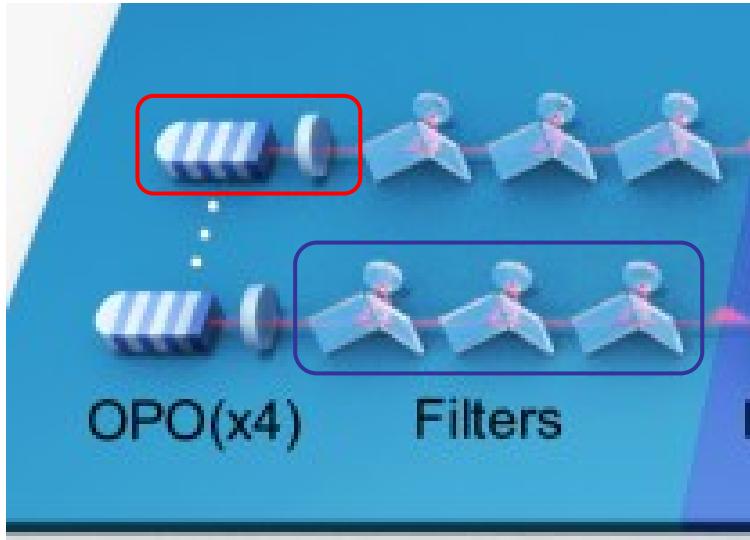
$$\Delta X \cdot \Delta Y = \frac{1}{4}, \Delta X^2 = \frac{e^{-2r}}{4}, \Delta Y^2 = \frac{e^{2r}}{4} \rightarrow \text{elliptical shape}$$

スケイズド光源



光パラメトリック発振機を4つ使用
中心波長775.7nm、パルス幅1.6ns

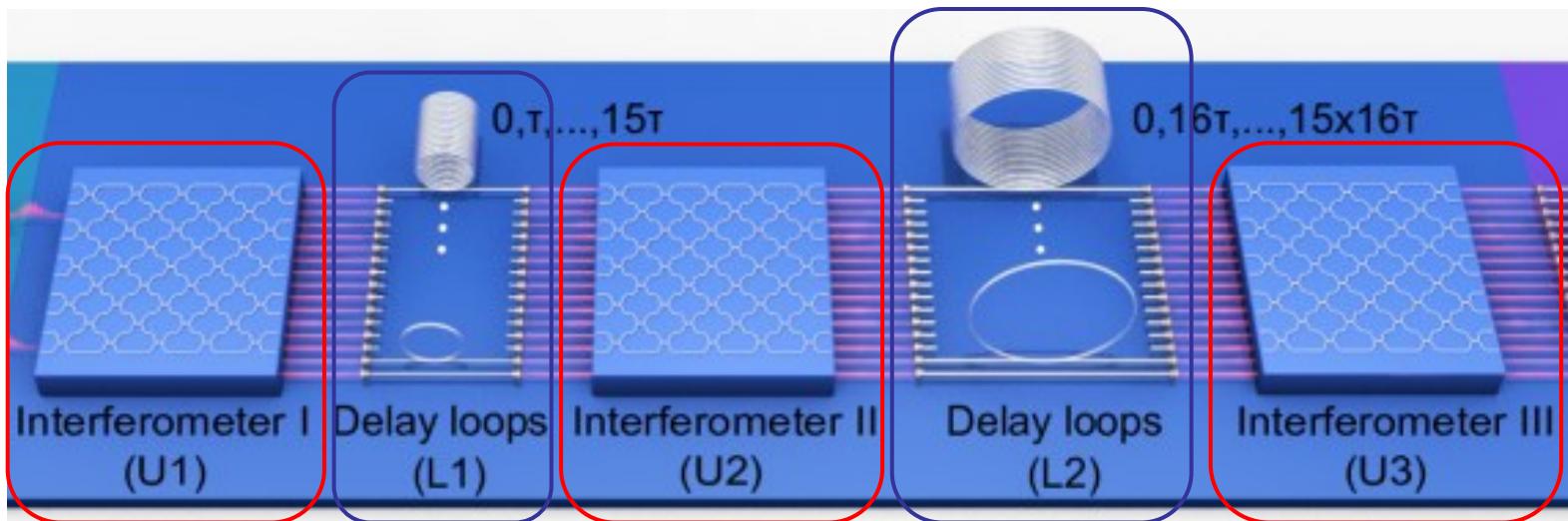
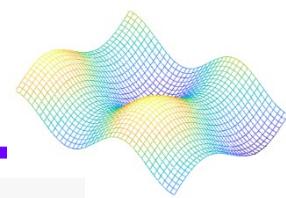
3段の非平衡マッハエンダー干渉系を直列



透過率99.8%、消光比40dB

以上の構成よりスケイズド光源の総合効率は92%

時間・空間ハイブリット符号化回路

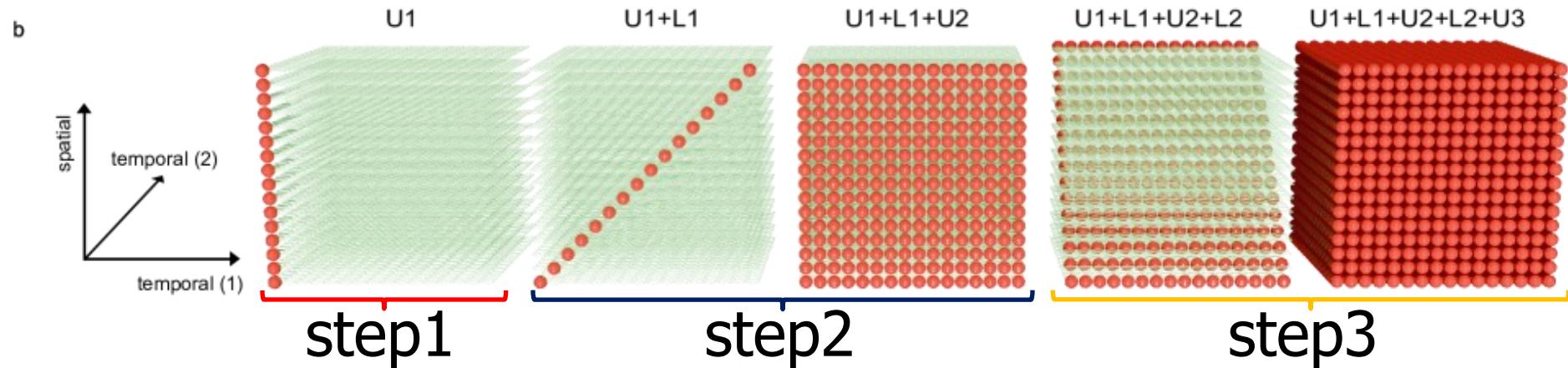
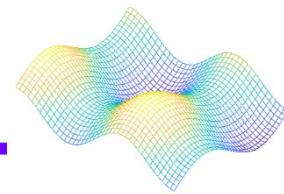


3つの干渉計(U1、U2、U3)… 16モード完全結合型
(16×16 ユニタリ行列)

2つの遅延ループアレイ(L1、L2)

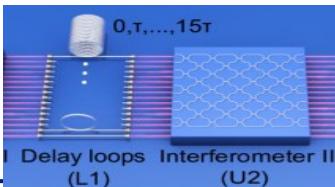
	範囲	内容
L1 (短い遅延)	$t, t+\tau, \dots, t+15\tau$	16個のタイムビンを生成
L2 (長い遅延)	$t, t+16\tau, \dots, t+15 \times 16\tau$	時間方向にもう一段階の拡張
時間間隔 τ	50ns	光子検出器の

回路内の光子の動き

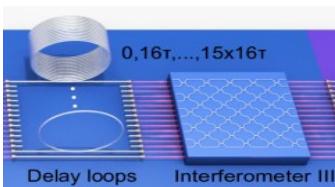


step1 : U1 … 光子が16の空間モード全体に広がる

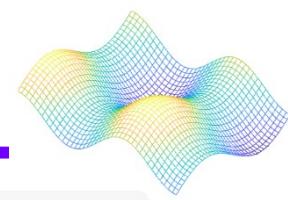
step2 : L1 → U2 … 短い遅延ループ L1により、空間モードが16の時間モードに展開 → U2により 16×16 の時空間干渉が起こる



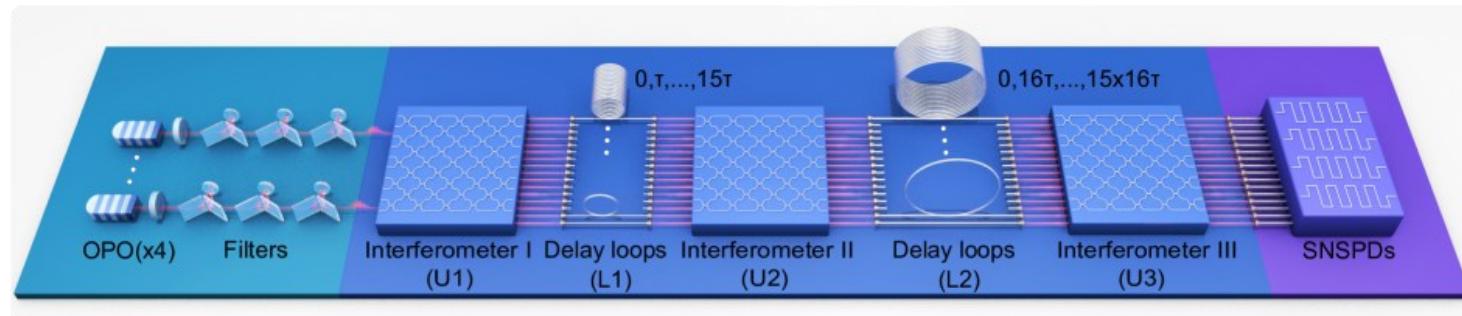
step3 : L2 → U3 … 長い遅延ループ L2によってさらに時間方向に拡張 → U3により $16 \times 16 \times 16$ の超高次元モードを干渉させる



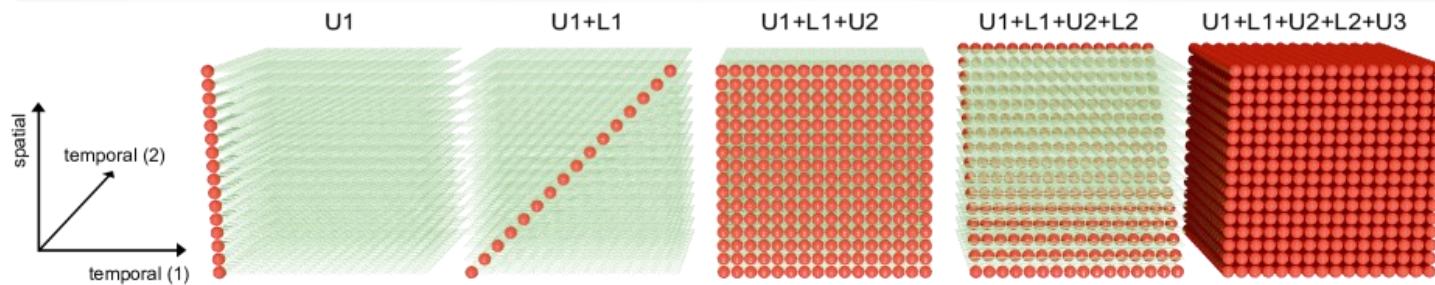
回路のスケーリング特性



a



b

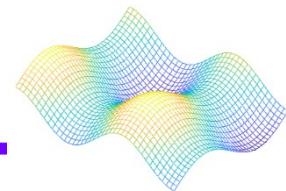


結合性: n^3 で増加



物理リソース(OPO、干渉計、検出器など): n でしか増えない

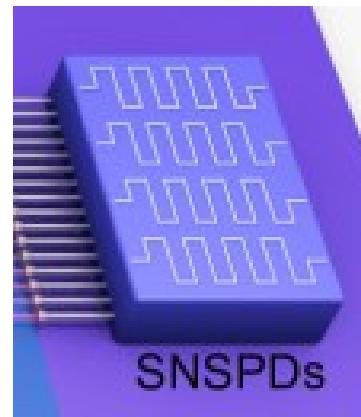
超大規模GBSを実現できた最大の理由



16個の超伝導ナノワイヤ单一光子検出器

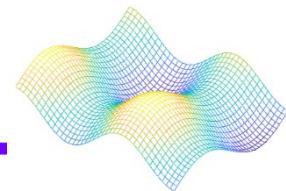
検出効率: 93%

リカバリー時間: 43ns



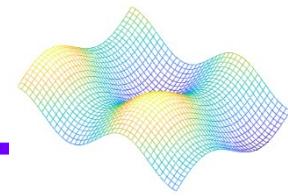
システム全体効率(光源～検出器全てを含む): 51%

実験条件・実験内容

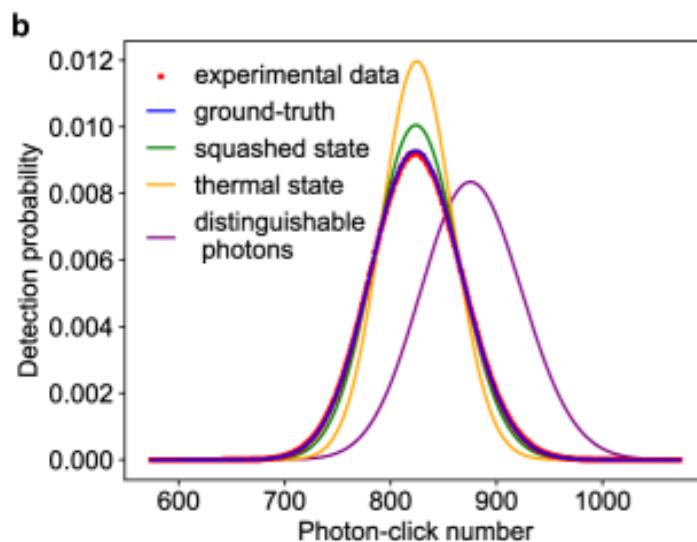
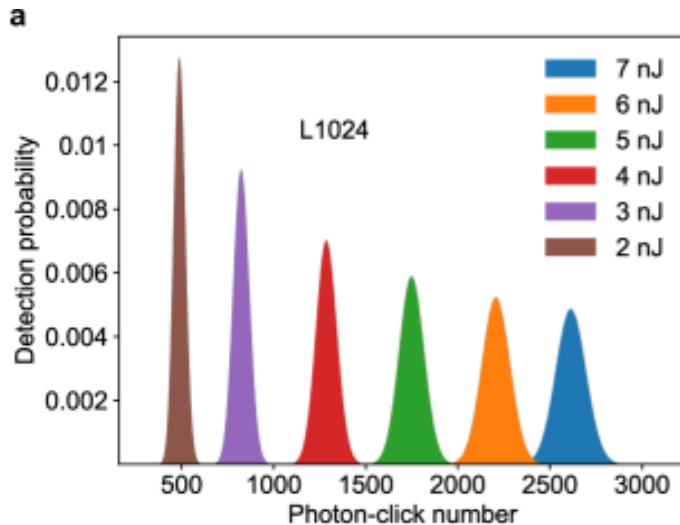


	入力スクイーズド光数	出力モード数
S64	6 4	4 3 3 6
M256	2 5 6	5 1 0 4
L1024	1 0 2 4	8 1 7 6

- ① 光子数分布
- ② ベイズ仮説検定
- ③ 相関関数ベンチマーク
- ④ Matrix Product State (MPS) アルゴリズムとの比較



①光子数分布



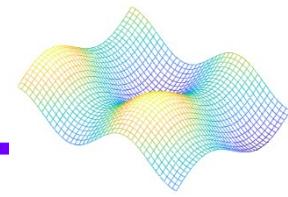
L1024グループでは、3050光子まで観測が確認

L1024グループから得られた光子数分布は、基底真理の理論予測とほぼ一致

しかし、他の3つの理論曲線は、実験データとかけ離れている。



観測された光子統計が単なる古典的ノイズや、損失の産物ではないことの証明となる

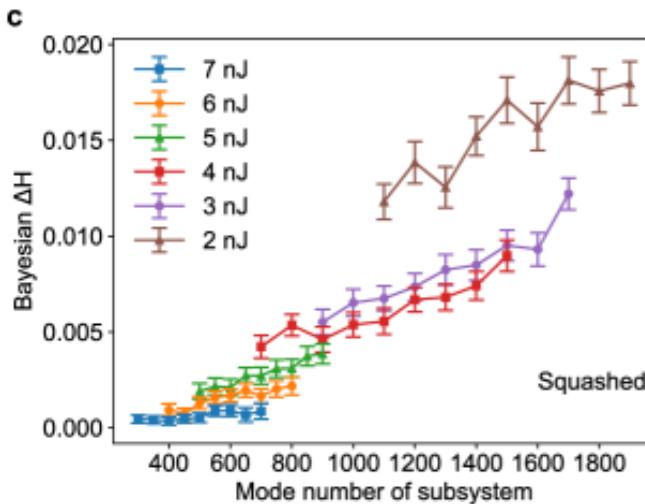


② ベイズ仮説検定

H_0 :量子モデル
 H_1 :古典モデル

$H_0 - H_1 = \Delta H$:対数尤度差

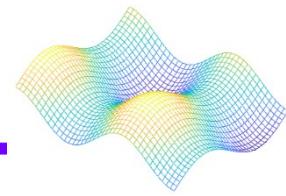
と仮説



結果: 全てのデータで $\Delta H > 0$



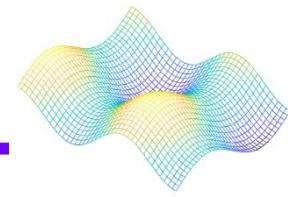
実験結果は量子GBS由来



比較検証される 3 つのアルゴリズム

- Greedy Sampler
- IPS Sampler
- Treewidth Sampler

実験結果



③ 相関関数ベンチマーク

2次関数：光子がペアで現れる確率

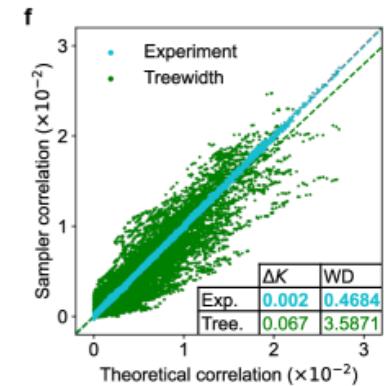
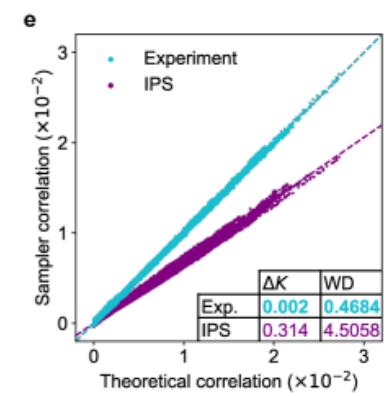
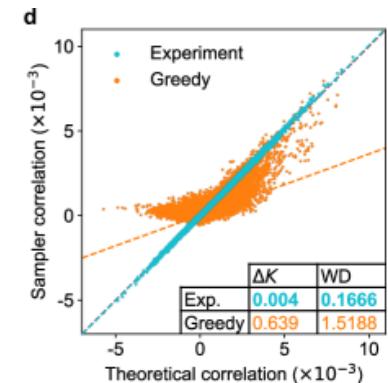
3次関数：3つの光子が同時に現れる確率

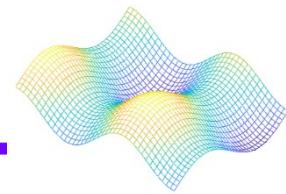
$$\Delta K = |K_{\text{sampler}} - 1|$$

理想GBSでは $\Delta K = 0$

結果：

- Greedy sampler → 3次相関を再現できず。
- IPS（独立ペアモデル）も排除。
- Treewidth sampler → 木幅801でも再現できず。

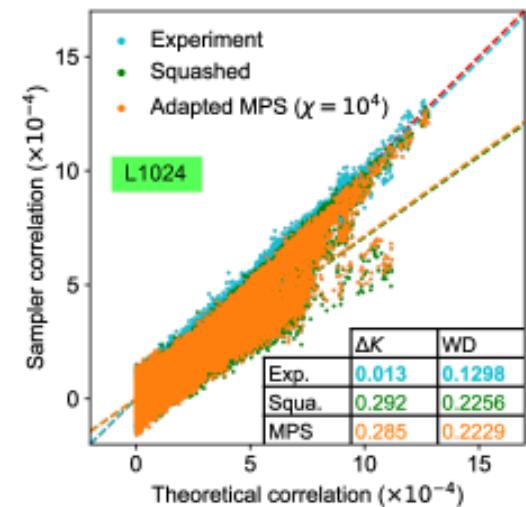
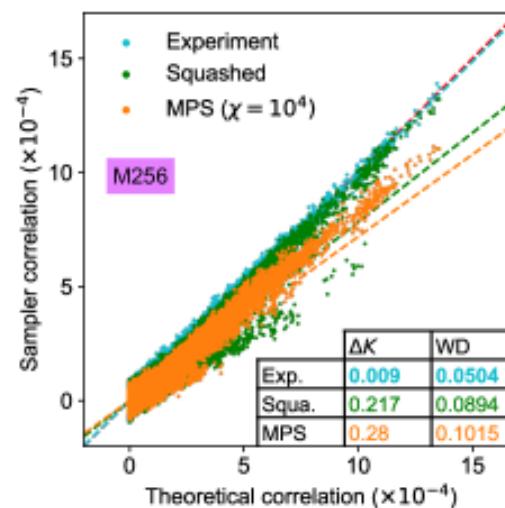
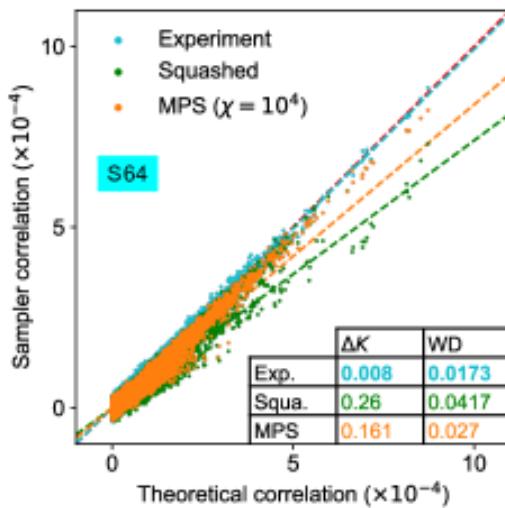


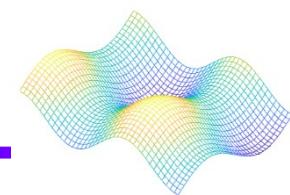


④ Matrix Product State (MPS) アルゴリズムとの比較

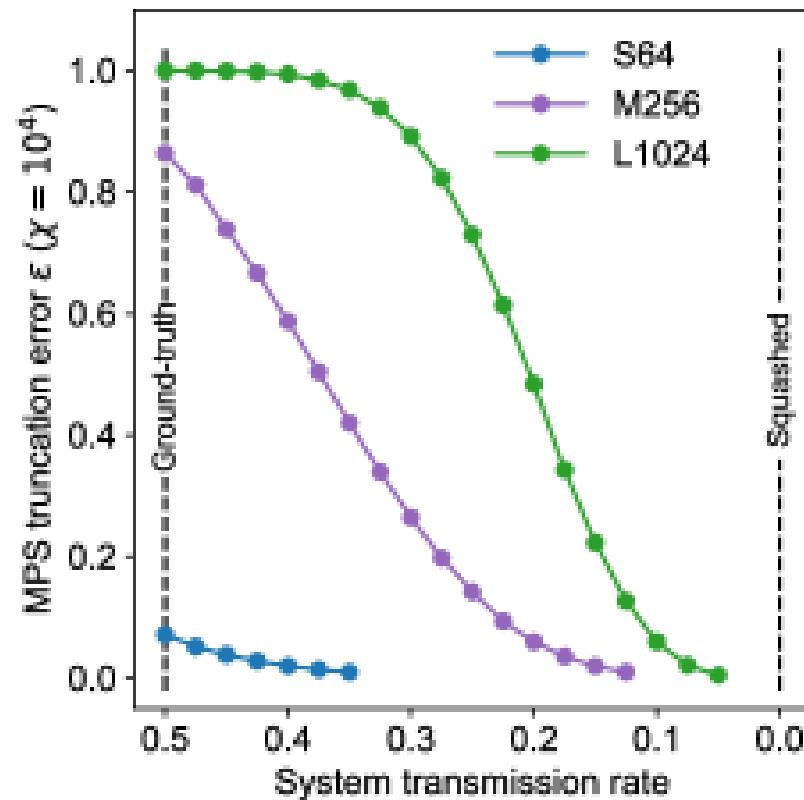
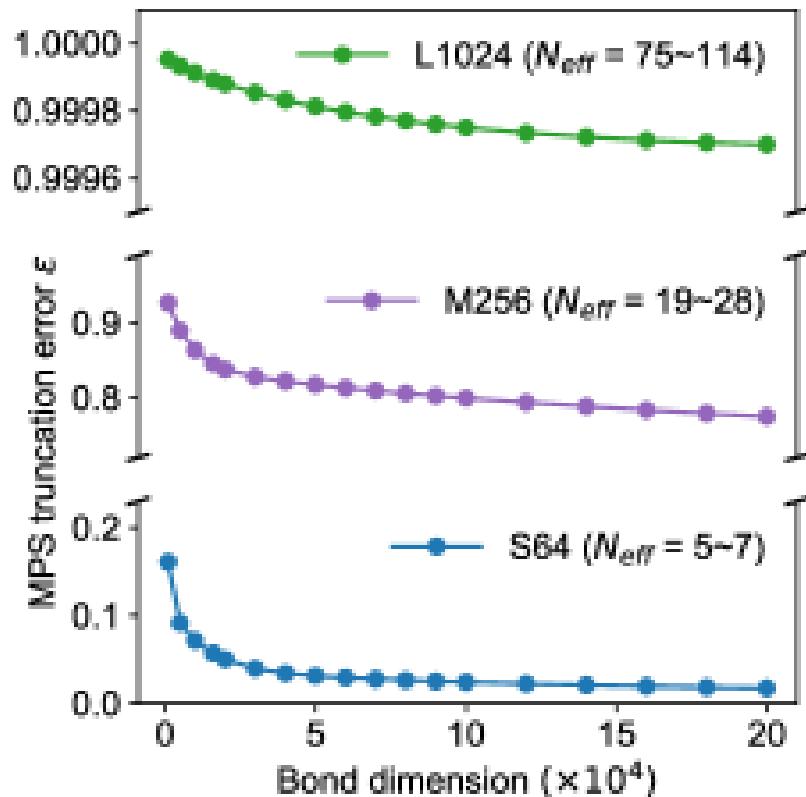
MPS (Matrix Product State) とは

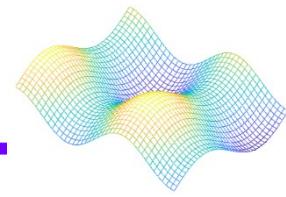
重要な部分だけを残して、残りを圧縮することでスーパーコンピュータでも計算をできるようにするアルゴリズム





④ Matrix Product State (MPS) アルゴリズムとの比較 ボンド次元(x): 圧縮率

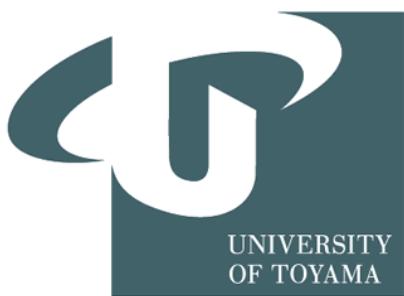




以上の結果から量子計算優位性が示された

最大規模のボソンサンプリング実験を実現

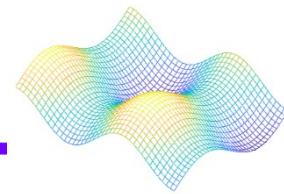
Variational quantum cloning machine on an integrated photonic interferometer (集積フォトニック干渉計上の変分量子ク ローニングマシン)



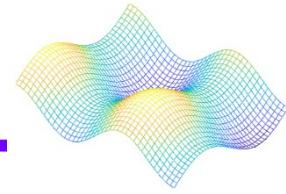
参考文献

<https://opg.optica.org/opticaq/fulltext.cfm?uri=opticaq-3-4-351#articleCitations>

Citation



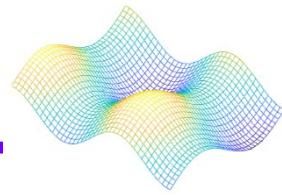
Francesco Hoch, Giovanni Rodari, Eugenio Caruccio, Beatrice Polacchi, Gonzalo Carvacho, Taira Giordani, Mina Doosti, Sebastià Nicolau, Ciro Pentangelo, Simone Piacentini, Andrea Crespi, Francesco Ceccarelli, Roberto Osellame, Ernesto F. Galvão, Nicolò Spagnolo, and Fabio Sciarrino, "Variational quantum cloning machine on an integrated photonic interferometer," Optica Quantum **3**, 351-359 (2025)



この研究は、変分量子クローニングという新しい量子機械学習アルゴリズムを、集積フォトニクスプラットフォーム上で初めて実験的に実証したもの

- * 集積フォトニクスプラットフォームとは光を情報キャリアとして利用するための、小型で高性能な回路を一つの基板上に集積した技術基板
- * 変分とは古典的なプロセッサと量子計算を行うために設計されたハードウェア(QPU)を活用したもの

量子クローニングの背景

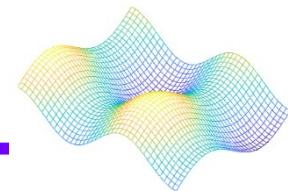


0,1のビットで表せる古典情報は完全にコピー可能
だが、量子状態はノー・クローニング定理により完
全にコピーできない

ノー・クローニング定理は、量子暗号プロトコルの安
全性を担保する

しかし、量子論によって定められた上限までは、不
完全ながら最適なクローニングが可能

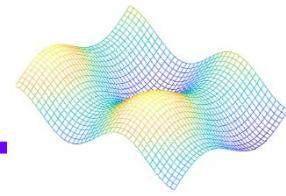
Q.量子ビットとフォト量子ビットの違い



量子ビットは従来のコンピュータのビット（0か1）とは異なり、量子ビットは0と1の重ね合わせの状態をとることができる

フォト量子ビットは、光（フォトン）の特定の性質を利用して量子ビットをエンコード（符号化）したもの

符号化とは



符号化とは、抽象的な情報の単位である量子ビットの状態 $|0\rangle$ と $|1\rangle$ を、具体的な物理システム（この場合は光子）の測定可能な特性に対応させること

符号化の方法

①経路符号化(デュアルレート符号化)

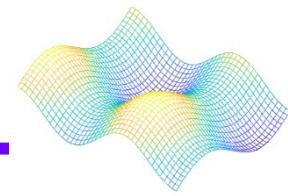
光子がどちらの経路（空間モード）を通るかによって量子ビットを表現する

②変更符号化

光子の偏光状態によって量子ビットを表現する

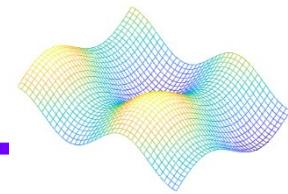
③時間領域符号化

光子の到着時間によって量子ビットを表現する



①完璧なクローニングを実行するには、非常に多くの操作 (*量子ゲート) を連續して行う深い回路 (Deep Circuits) が必要
現在主流のNISQ (ノイズの多い中間規模量子) デバイスは、ノイズが多く、誤り耐性が低い。

*量子ゲート (Quantum Gate) とは、量子コンピュータにおいて、量子ビットの状態を操作するために用いられる基本的な操作の単位

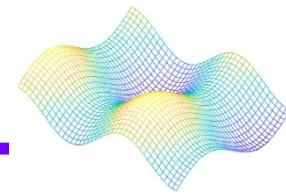


②最適なクローニングマシンの回路構成を、数学的な公式や手順を使って導き出すことが非常に困難な場合がある。

そのため古典コンピュータと量子コンピュータを連携させて自動的に最適な回路設定を探索・学習させる「変分アプローチ」が有効

→量子機械学習アルゴリズムを利用した変分量子クローニング

古典的,量子的なクローニングの違い



(a) 古典的なクローニング

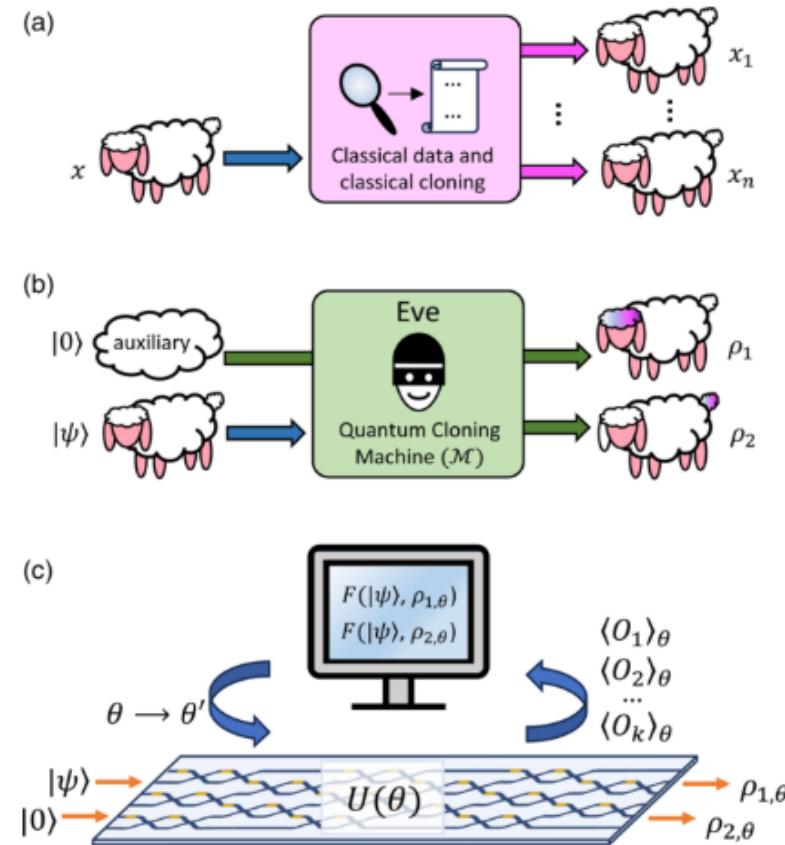
古典的なシナリオでは、変数 x を読み取り、必要なだけ完璧なコピーを自由に作成できます

(b) 量子クローニングの限界

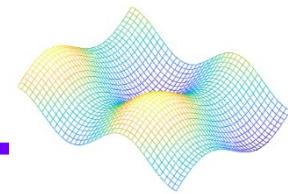
ノー・クローニングの定理より $|\psi\rangle$ のすべての特性と完璧にコピーすることは出来ない

(c) 変分量子クローニングのプロセス

フォトニック集積回路と古典コンピュータが連携したもの



変分量子クローニングの仕組み

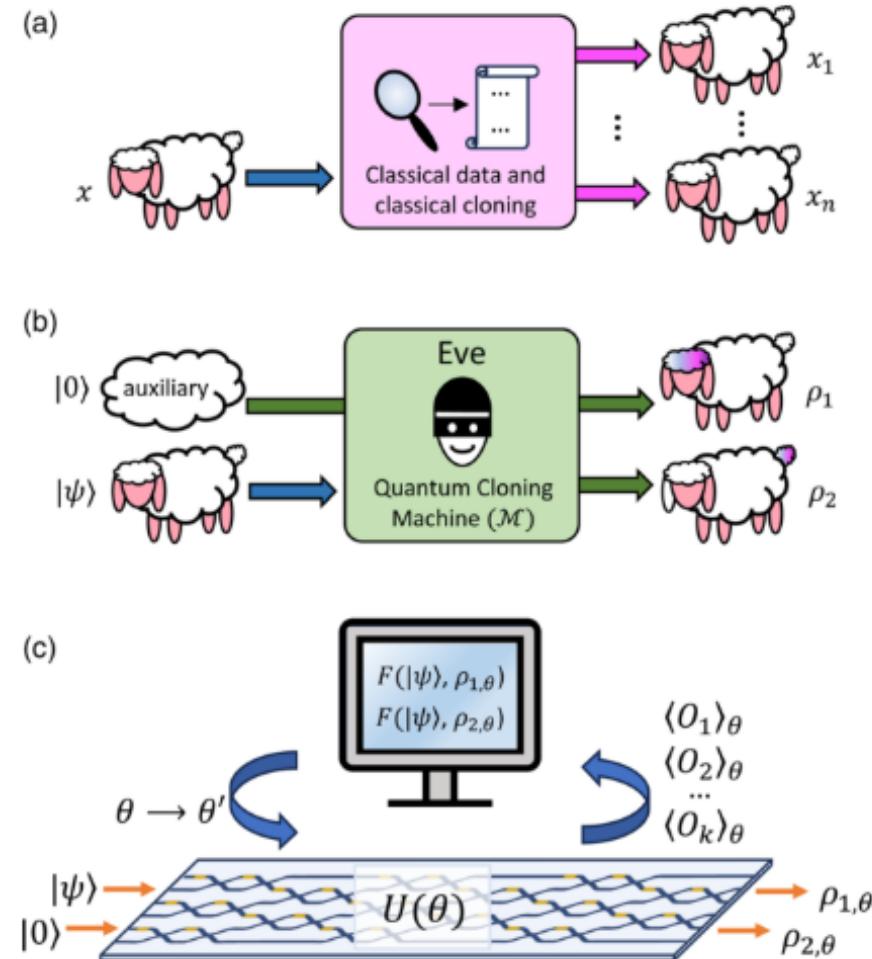


①入力：クローン状態にした
い $|\psi\rangle$ と補助的な初期状態の $|0\rangle$
の2つの状態の量子ビットを
使用

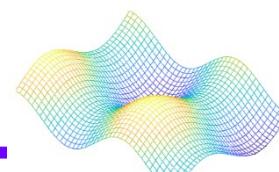
②進化：2つの量子ビットは
パラメータ θ を持つフォトニック
回路 $U(\theta)$ の中で相互作用す
る

③学習：出力状態 $\rho_{1,\theta}$ と $\rho_{2,\theta}$ に
基づいて回路パラメータ θ が更
新される

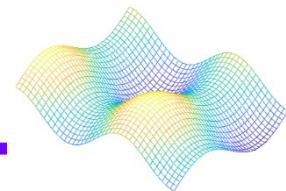
④目的：この回路は適切な損
失関数に従って学習され、2
つの出力量子ビットと元の状
態 $|\psi\rangle$ との間の忠実度が両方の



機械学習のプロセス



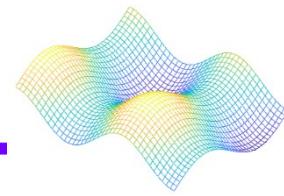
ステップ	担当プロセッサ	役割	具体例
実行	量子プロセッサ (QPU)	パラメーター化された量子回路を実行し、出力量子状態を生成する	フォトニック集積回路が、パラメーター θ で設定されたユニタリー進化 $U(\theta)$ を実行
評価	量子/古典プロセッサ	QPUの出力（測定結果）から目的関数（コスト関数）の値を推定する	出力クローンと目標状態の忠実度を測定し、コスト関数 $C(\theta)$ を計算
更新	古典コンピュータ	コスト関数を最小化（または最大化）するために、古典的な最適化アルゴリズムを用いて量子回路のパラメーター θ を更新する	NMアルゴリズムが12個の位相パラメーターを反復的に調整



1. 入力の処理と変換 (特徴量エンジニアリングと写像)

特徴量の抽出/変換：与えられた入力データ x の「特徴」をつかむために、適切に x を変換した量 $\varphi(x)$ が生成される

量子回路学習では、入力データ x はまず量子回路 $V(x)$ を用いて量子状態 $|\psi(x)\rangle$ にエンコードされ、高次元のベクトルに写される



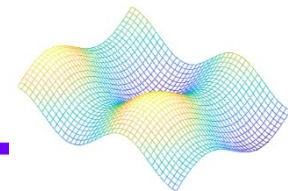
2. 状態の変換とダイナミクス (学習機の実行)

処理された入力は、学習機によって変換され、ダイナミクス（力学的な時間発展）を生み出す

① 変分量子アルゴリズム (VQA) の場合

VQAでは、パラメータを持つ量子回路が入力データに作用し、状態を変換する。パラメータ付き量子回路の作用：入力データが量子状態としてエンコードされると、調整可能なパラメータ θ を持つ量子回路 $U(\theta)$ がこの状態に作用し、状態を変換する。行列の調整（学習）：この操作は、高次元の特徴量ベクトルに大きな行列を作用させることに相当する。学習とは、この行列（量子回路で表現できる範囲のもの）を調整するプロセス。

Q.回路で変分がどのように使われているか



本実験の回路は光を操作する*方向性結合器と*熱光位相シフターで構成されている

熱光位相シフターによって、回路の内部にある12個の位相 θ パラメータが調整できる

変分アルゴリズムは回路パラメータ θ を最適な性能にするように調整する

量子回路の出力を測定し古典的なコンピュータがコスト関数を計算する

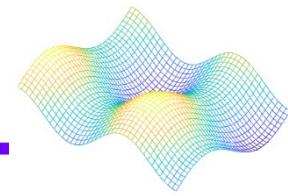
NMアルゴリズムによってコスト関数の値に基づいて回路の12個の位相パラメータを更新する

この更新されたパラメータが回路（フォトニック干渉計）にフィードバックされ、次の反復で使用される

この繰り返しにより、量子回路はタスクに対して最適なパラメータ構成を学習する

*方向性結合器は、光の分割と混合を行うデバイス

*熱光位相シフターは、光の位相を調整するために使用されるデバイス

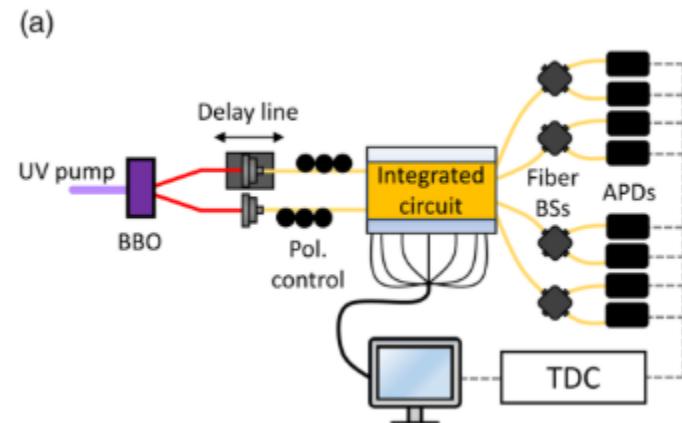


(a) 実験工程

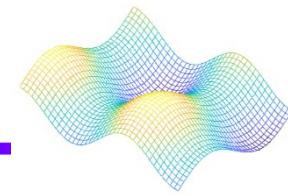
①光子生成: 392.5 nmのUVパルスレーザーがBBO結晶を励起し、タイプII自然パラメトリック下方変換(SPDC)により785 nmの単一光子ペアが生成される

②光子の準備: 光子ペアの同一性を確保するため、自由空間遅延線で時間同期され、インファイバーパドルで偏光が制御される

③回路への注入: 光子は6モード汎用集積フォトニック回路に注入される

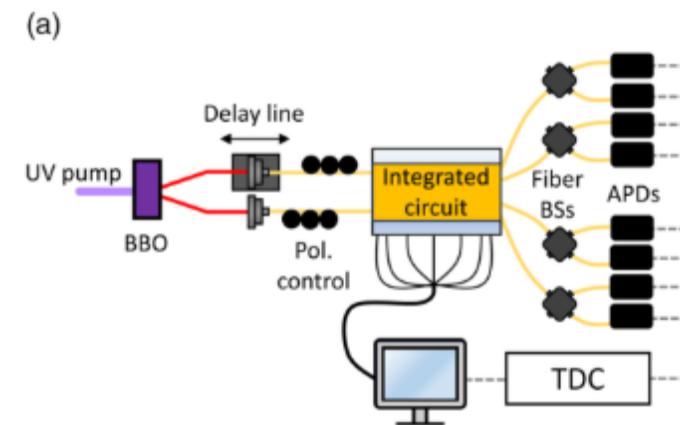


実験工程②

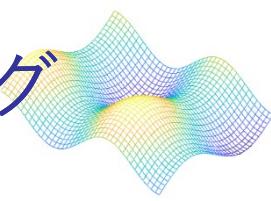


④検出: チップの出力では、4つの中央出力モードの光子が収集され、ファイバービームスプリッター (BSs) と8つのアバランシェフォトダイオード (APDs)、および時間-デジタル変換器 (TDC) を介して、疑似光子数分解検出する

⑤フィードバック: 得られた出力確率分布は古典コンピュータに送られ、出力クローンの忠実度を推定し、コスト関数を計算する。このコスト関数の最小化を通じて、回路パラメータが更新



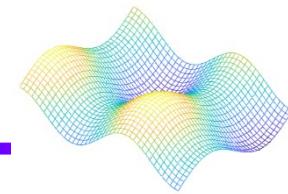
量子機械学習を使用した変分量子クローニング



符号化された2つの経路を持つフォトニック量子ビットを使い、完全にプログラム可能な6モードの汎用集積デバイス上で1→2変分クローニングマシンとした。

モード番号	役割
モード0,5	不使用
モード1,4	補助量子ビットの初期化
モード2,3	入力量子ビットの初期化
出力モード1,2	第1のクローン ρ_1
出力モード3,4	第2のクローン ρ_2

集積回路の詳細



変分クローニングするために3つに分かれる

①準備ステージ(赤) 2つの初期量子ビットを用意する

クローンされる量子ビット $|\psi\rangle$ はモード2,3にデュアルレート符号化される

補助量子ビット $|0\rangle$ はモード1,4にデュアルレート符号化される

チップの外部モード0,5は使用されない

②進化ステージ(橙) 変分クローニングマシンを実装する

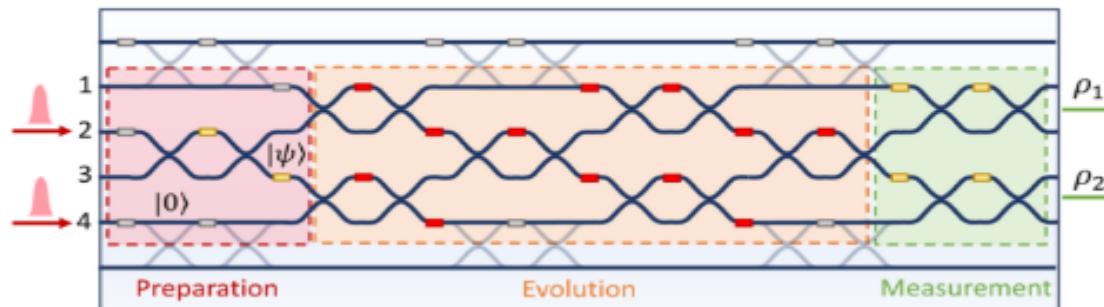
4モード汎用干渉計メッシュを使用

赤色の長方形で示される12個の内部位相が、古典アルゴリズムによって最適化される

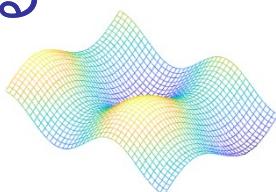
③測定ステージ(緑) 出力状態の忠実度を推定する

この領域は、2つのクローン ρ_1, ρ_2 をターゲット状態 $|\psi\rangle$ に射影するように構成されており、量子状態の忠実度を効率的に推定する

(b)



Q.進化の過程でどのような回路が使われているか



進化はマッハツェンダー干渉計で構成された再構成可能な集積フォトニック回路で行われる

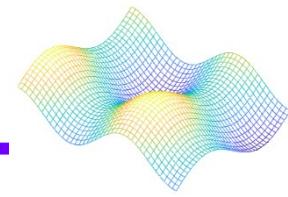
回路図で光路が分岐している部分で方向性結合器（固定された性能を持つビームスプリッター）が使用されている

回路図で赤い長方形の部分で熱光位相シフターが使用され、光が伝搬する経路の位相を調整する

進化は、数学的にはユニタリー変換 $U(\theta)$ という演算子で表現される

熱光位相シフターでユニタリー変換 U にパラメータ θ を与え変化の度合いを制御する

量子クローニングマシンの種類



- ①一般的には量子ビット（2次元状態）。
- ②クローナーに入力されて出力される数
- ③入力状態の違い

I : ユニバーサルクローナー: * ブロッホ球全体から一様に選ばれた状態の集合をクローンする

II: 対称位相共変クローナー: ブロッホ球の大円から一様に選ばれた状態に限定される(赤道上)

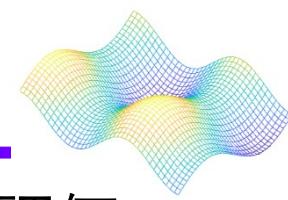
III: 状態依存型クローナー: 状態の集合が、必ずしも直交しないわずか二つの状態にさらに制限される

- ④生成されるクローン間の忠実度

対称クローナー/非対称クローナー

*ブロッホ球とは量子ビットの状態を半径 1 の単位球面上の点として表したモデル

ネルダー-ミード最適化アルゴリズム

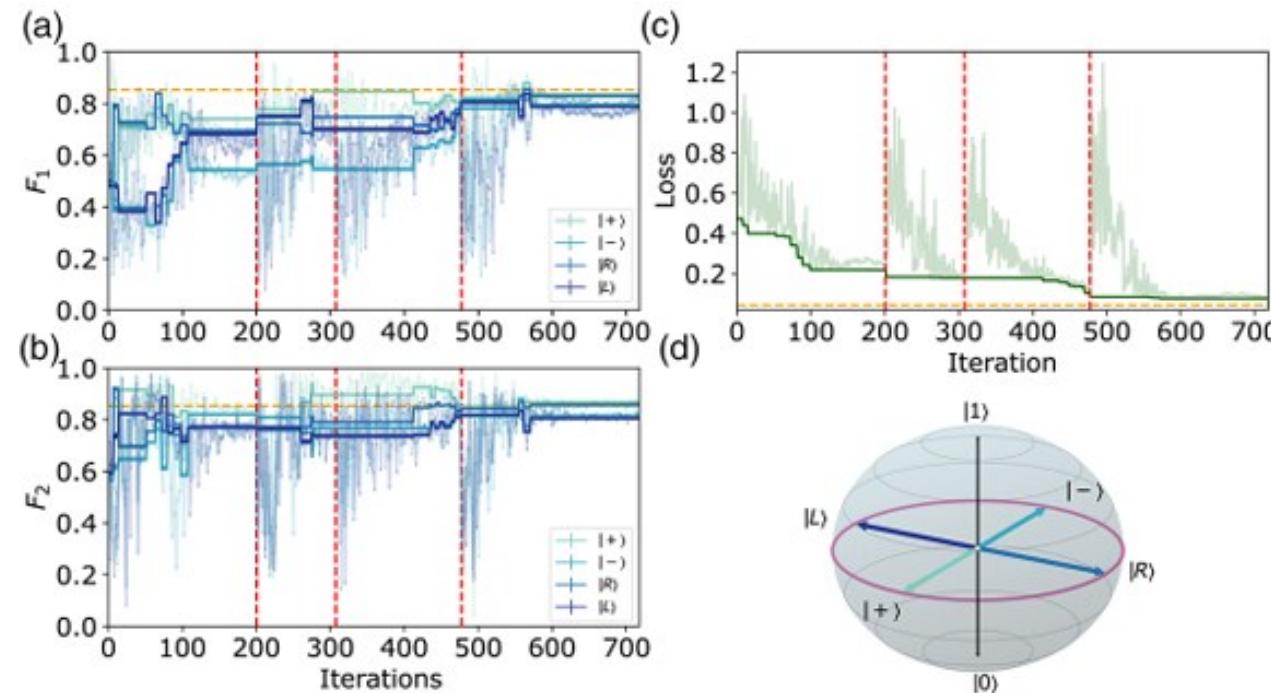


各アルゴリズム実行では、出力状態 1→2 の忠実度が評価され、ネルダー-ミード最適化アルゴリズムによって変分パラメータが更新される

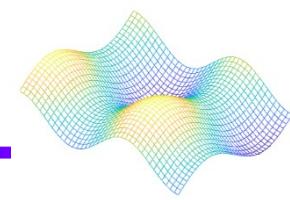
図 (a) から (c) は、NMアルゴリズムの反復回数に対する忠実度 F_1 と F_2 とコスト関数 C_{PC} の変化を示す

赤い点線はノイズを抑制するために手動で再起動された部分

黄色の破線は、変分プロトコルの理論的な平均最適値を示す



ネルダー-ミード最適化アルゴリズム



トレーニングと検証(図d)

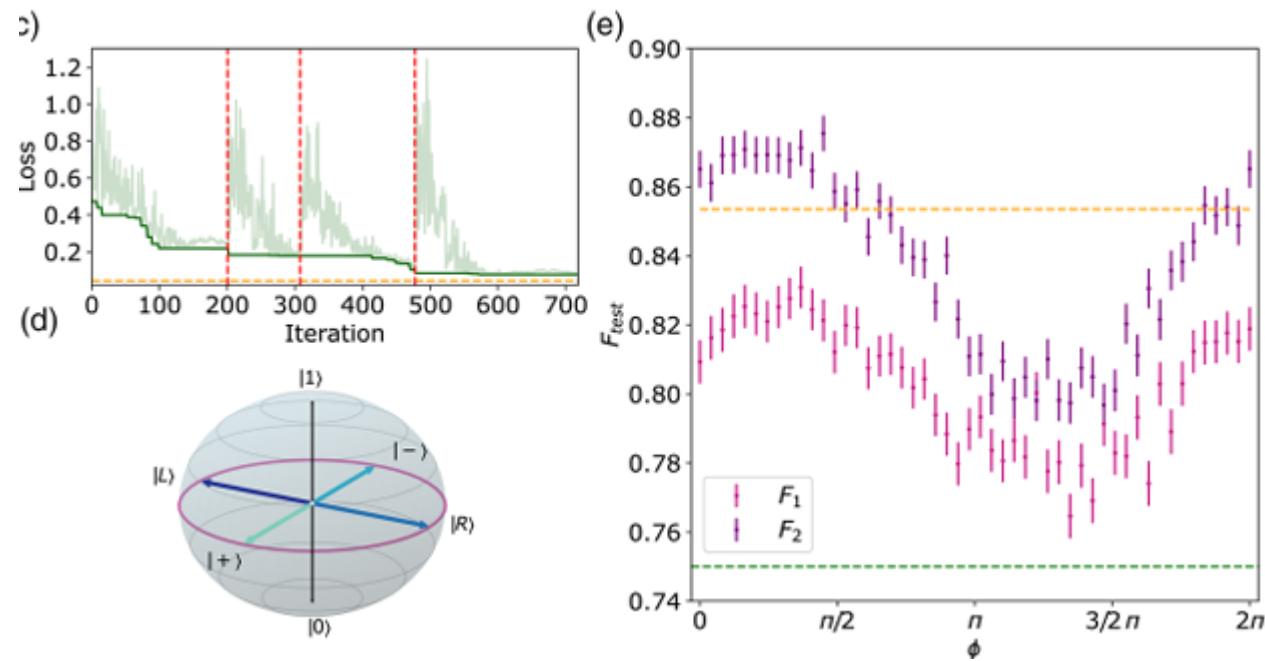
トレーニング状態: アルゴリズムのトレーニング段階では、プロッホ球の赤道上に配置された4つの状態（青色）が使用された

検証状態: 最適な回路を見つけた後、その性能を評価するために、赤道上に均等に分布した50個のテスト入力状態（紫色）が使用された

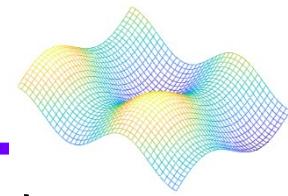
性能検証（図e）

理論的上限（黄色の破線）: 理想的な対称位相共変クローナーの平均忠実度は $F_0=0.853$

半古典的限界（緑色の破線）: 半古典的な「測定と準備」戦略の平均忠実度の上限は $F_{sc}=0.750$



対称位相共変クローニング



本研究で最初に実験的に実装されたのは対称位相共変クローナーである

これは、BB84プロトコルなどの暗号攻撃に有用なブロッホ球の赤道上にある任意の状態 $|\psi\rangle$ を最適にクローンすることを目的としている

損失関数の設計と役割

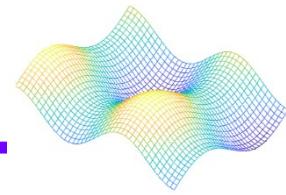
最適な回路構成を見つけるために、以下の損失関数を

$$C_{\text{PC}} = \mathbb{E} \left[(1 - F_{1,\phi})^2 + (1 - F_{2,\phi})^2 + (F_{1,\phi} - F_{2,\phi})^2 \right]$$

用いる。

第1項・第2項: 2つのコピーの出力忠実度を最適値に近づけるよう機能する

第3項: 2つの出力忠実度が等しくなるように強制し、対称性を保証する

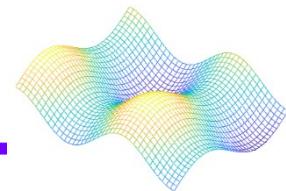


最適化アルゴリズムと結果

アルゴリズム: コスト関数の複雑な形状に対処するため、シンプソンベースの勾配フリーなネルダー-ミード (NM) 最適化アルゴリズムが使用された。実験ノイズによる局所的な最小値への「スタック」を防ぐため、リブート(再起動)手順も適用された。

性能検証: 約700回の反復後、最適な回路が決定された。この回路は50種類のテスト入力状態に対して検証された

対称位相共変クローニング



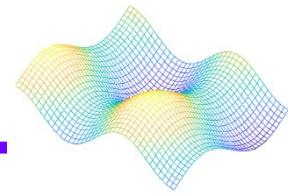
理論的上限: $F_0=0.853$

達成された平均忠実度 $F_1=0.802 \pm 0.001$

$F_2=0.838 \pm 0.001$

結論：達成した忠実度は半古典的な測定法だと0.750が上限だったため3標準偏差上回っている。理想的な最適値に届かず、クローナー間に非対称性が見られたのは実験ノイズによるものと考えられる

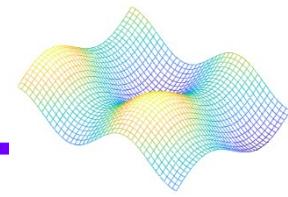
状態依存型クローニング



課題と変分アプローチの必要性
対象: クローンする状態のセットを、任意の2つの状態 $|\Psi_A\rangle$ と $|\Psi_B\rangle$ に制限する

応用: この種のクローナーは、B92などの量子暗号プロトコルへの攻撃を可能にするため、関心が高い

課題: 最適な回路が量子ビット形式では既知であるものの、それに対応するフォトニック回路を解析的に導出するのは困難である。このため、変分アプローチが最適な解を見つける最も有望な手段となる



以下の損失関数を用いる。 P_A と P_B はそれぞれのポストセレクション確率である

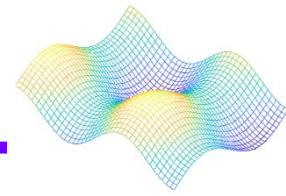
$$C_{SD} = (1 - F_{1A})^2 + (1 - F_{2A})^2 + (F_{1A} - F_{2A})^2 + \\ (1 - F_{1B})^2 + (1 - F_{2B})^2 + (F_{1B} - F_{2B})^2 + \\ \lambda [(1 - P_A)^2 + (1 - P_B)^2 + (P_A - P_B)^2]$$

実験結果

実験で実装された変分クローニングマシンは、異なる状態ペアの選択に関わらず、理論的に予想される値の1標準偏差以内で出力忠実度とポストセレクション確率を達成した

測定された忠実度は、位相共変クローナーの平均忠実度よりも高い値を示した。これは、許容される状態の集合を制限することで、クローニングマシンにより多くの情報が提供され、結果としてより高い忠実度に到達できるという予想される振る舞いと一致している

実験の結論



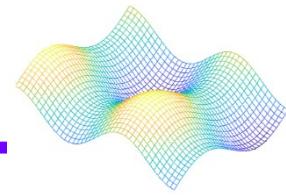
本実験で使用したのはデュアルレール符号化されたフォトニック量子ビットに対する1→2ポストセレクション型エコノミカルクローニングマシン

古典的なフィードバックループとネルダー-ミードアルゴリズムを用いて、4モード汎用干渉計を構成する12個のパラメータを最適化した

対称位相共変クローナー: 1000回未満の反復でほぼ最適な回路を達成し、その性能が最良の半古典的戦略よりも優れていることを示した

状態依存型クローナー: 解析的な回路解が困難なこの条件でも、最適な理論的予測と互換性のある結果を得ることに成功し、変分アプローチの汎用性を示した

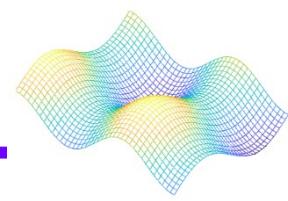
将来の展望と改善点



ハイブリッドプラットフォームの可能性: このフォトニック符号化プラットフォーム上での変分最適化の開発は、光子量子ビットを使用する現在の量子セキュリティネットワークインフラストラクチャとのやり取りを可能にする

自己学習アルゴリズム: 本研究は、量子ハードウェアが自身の内部パラメータを最適化する方法を学習する「自己学習アルゴリズム」のより一般的な枠組みへの道を開ける

回路の深さを考慮した項をコスト関数に追加することで、構造的学习（Structural Learning）ステップを導入し、スケーラビリティを向上させる余地がある



fin

God does not play dice with the universe.