

国立大学法人東京大学
日本電信電話株式会社
国立研究開発法人情報通信研究機構
国立研究開発法人理化学研究所
国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）

光量子状態の高速生成

——光通信技術による光量子コンピュータの加速——

発表のポイント

- ◆ 非古典性の高い光量子状態の生成は確率的であり、この生成レートは論理量子ビットの生成も含め、光量子コンピュータの現実的な計算速度を制限する。
- ◆ 今回の成果では、光通信技術の増幅器・測定器の技術を用いて、従来の量子光源・測定器による速度の制限を打破し、光量子状態の生成レートを1000倍程度向上させた。
- ◆ 今回の研究では光子検出器の性能が生成レートを制限していたが、この制約を解決できれば、本研究からさらに1000倍の生成レートの実現が見込まれる。これにより準決定論的な状態生成が可能になり、超高速光量子コンピュータの実現が期待される。

概要

国立大学法人東京大学大学院工学系研究科の川崎彬斗大学院生及びアサバナントワリット助教、古澤明教授らの研究チーム、マサチューセッツ大学のラジュヴィーネハラ助教、日本電信電話株式会社（以下、NTT）、国立研究開発法人情報通信研究機構（以下、NICT）、国立研究開発法人理化学研究所は、シュレディンガーの猫状態（注1）と呼ばれる強い量子性（非古典性）を有する光量子状態の生成レートを、従来手法より1000倍程度高速化することに成功しました。

誤り耐性型光量子コンピュータを実現するためには、誤りを検知し訂正するための論理量子ビット（注2）が必要不可欠です。直近では、光パルスを用いた論理量子ビット生成の実証実験に成功し（関連情報1参照）、誤り耐性型光量子コンピュータの実現への道筋が示されました。しかしながら、実証実験レベルから実用レベルへ移行するためには、その論理量子ビットの生成確率を上げる必要があります。例えば、現在広く用いられている古典コンピュータのクロックレートはギガヘルツ（GHz、1秒に10億回）の水準に達する一方で、高い非古典性を有する光量子状態の生成手法は基本的に確率的であり、その生成レートはキロヘルツ（kHz、1秒に1000回）程度に留まっていた（図1A）。

本研究は従来の状態生成・測定のための量子光源・ホモダイン測定器（HD）（注3）の代わりに、NTTが主体となり開発した光パラメトリック増幅器（OPA）（注4）及び東京大学とNICTが共同開発した超伝導光子検出器（図2）を用いることで、光源及び測定の前周波数帯域（注5）を大幅に向上させました。これによりシュレディンガーの猫状態をメガヘルツ（MHz、1秒に100万回）の生成レートで実現しました（図1B）。この方法をさらに発展させればギガヘルツの生成レートの実現も見込まれ、実用レベルの生成レートを有した論理量子ビット生成の実現が期待されます。

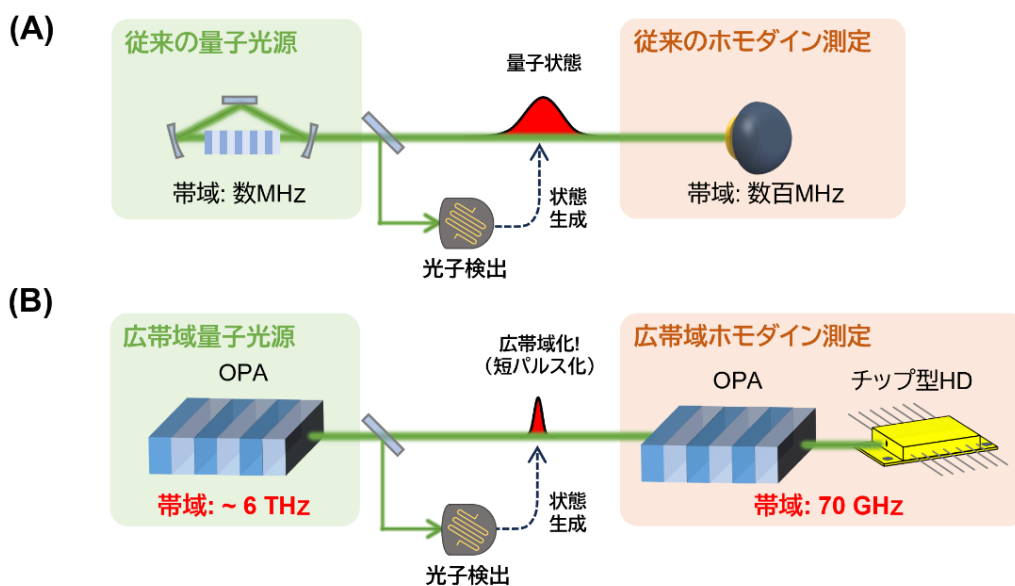


図 1 : 従来の量子状態生成 (A) と本研究の状態生成 (B) の比較



図 2 : 光パラメトリック増幅器(左、OPA)と超伝導光子検出器 (右)

発表内容

〈研究の背景〉

量子コンピュータの実用化に向けては、乗り越えるべきさまざまな課題が存在します。どのような物理系でも大きな課題となっているのは、計算スケールの大規模化(スケーラビリティ)と誤り耐性の実現です。スケーラビリティの実現は、研究開発段階の小規模なシステム (~数百量子ビット) をいかにして現実問題に必要な大規模システム (数百万量子ビット~) に拡張できるかという課題に言い換えることができます。特に外乱に弱く複雑な量子システムでは、小規模から大規模な量子計算のシステムへの発展の手法は明らかではなく、多くの物理系において実用量子コンピュータ実現のボトルネックとなっていました。これに関して東京大学古澤研究室の研究グループは、2019年にスケーラブルな光量子計算プラットフォームを実現し (関連情報 2 参照)、他の物理系と一線を画す強みを有しています。

誤り耐性の実現については、現実のシステムでは必ずノイズやエラーが存在するため、エラーが生じる環境下でも量子情報処理を正しく実行する仕組みが必要となります。その1つの方法は、誤りを検知し訂正できる「論理量子ビット」による量子情報のエンコードです。これについても本研究グループでは、GKP 量子ビットと呼ばれる最有力な論理量子ビットの生成に世界で初めて成功し、2024年にプレスリリースを行っています (関連情報 1 参照)。しかしなが

ら、この GKP 量子ビットの生成手法ではシュレディンガーの猫状態と呼ばれる非古典性が強い量子状態を、複数用いる必要があります。従来の光学系ではシュレディンガーの猫状態の生成レートが kHz オーダーに留まっているため、この状態を複数用いる GKP 量子ビットの生成レートはさらに低くなってしまいます。現状では、この生成レートが量子計算速度を制限しており、この解決なくして GKP 量子ビットによる誤り耐性型光量子コンピュータの実用化は困難です。

この生成レートの制限は 2 つの原因に由来します。1 つは量子光源であるスクイーズド光源の周波数帯域です。確率的な量子状態の生成レートは「試行回数」と「成功確率」の積によって決定されます。例えば、試行回数が 100MHz で成功確率が 0.1% の場合、おおよそ 100kHz の生成レートとなります。「成功確率」は量子状態の種類や生成手法によってほとんど決定されるため、実験的な工夫によってはあまり変動しません。したがって、「試行回数」を向上させることが重要となりますが、単位時間当たりの「試行回数」を制限するのが、光源となるスクイーズド光源の帯域となっています。また 2 つ目に、光源に加えて量子測定も制約を与えます。スクイーズド光源の帯域は生成レートだけでなく、生成される量子状態の波束の形状も決定します。この波束に定義された量子状態を正しく観測するためには、それよりも十分広い周波数帯域を観測可能なホモダイン測定器が必要となります。従来の量子光学の実験での各要素の典型値としては、スクイーズド光源の帯域は高々 MHz オーダーで制限されており、またホモダイン測定器の帯域は高い量子効率の確保のため 100MHz 程度に制限されてきました。

〈研究の内容〉

本研究では、OPA をスクイーズド光源として、数 MHz のスクイーズド光源の帯域を 6 テラヘルツ (THz、約 100 万倍) に拡張しました。さらに、ホモダイン測定器の前に OPA を量子的な位相敏感増幅器として用いたことで、測定系を 100MHz から 70GHz に高速化 (700 倍) し、高速な光量子状態の生成を実現しました。この OPA を補助的に用いた高速ホモダイン測定技術は、東京大学と NTT の研究グループが実験的に確立した新技術であり、本研究ではこれを初めて非古典的な量子状態生成へと応用しました。

図 3 に、生成したシュレディンガーの猫状態の Wigner 関数及び波束形状を示します。この状態の生成レートは約 1MHz に達しており、従来のシュレディンガーの猫状態生成と比べて 3 桁程度生成レートが改善されています。

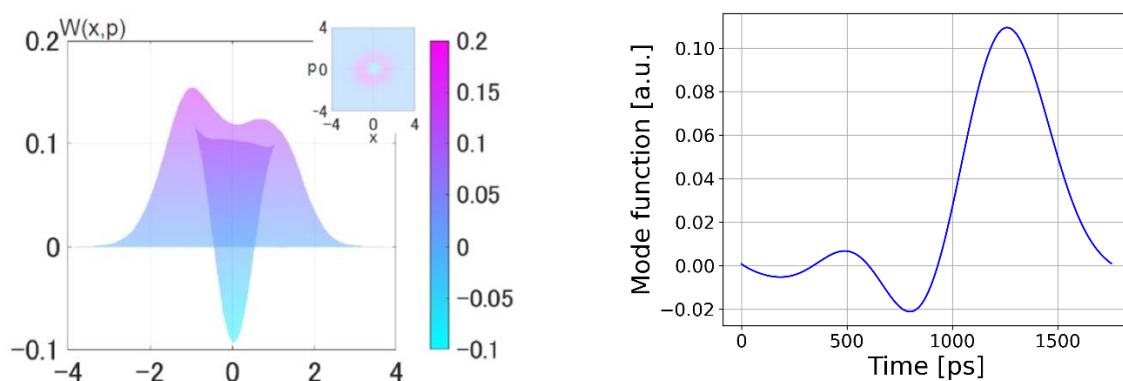


図 3 : 実験結果 生成された量子状態の Wigner 関数 (左) 及び波束形状 (右)

Wigner 関数の負値は量子状態の量子性を表すものである。波束形状については、サブナノ秒スケール (従来は数十～数百ナノ秒程度) の波束の測定に成功しており、本研究で実現した高速測定の有用性を示している。

現状の系ではホモダイン測定系の帯域が 70GHz になっていますが、光子検出器の性能が量子状態の帯域を 1GHz へとさらに制限しています。もしもホモダイン測定器の帯域全体を使うことができれば、さらに 70 倍の高速化が見込まれます。従来の非古典的な量子状態生成の実験では、光子検出器が最も高速かつ広帯域な素子として動作していました。一方で、今回の光源及び新規の高速な測定手法の確立によって、光子検出器の性能による帯域の制限についても、実験的な観測が可能となりました。これにより得られた新たな知見は、光子検出器のさらなる改良につながることを期待されます。

〈今後の展望〉

今回の高速な光量子状態の生成手法と 2024 年の GKP 量子ビット生成のプレスリリース（関連情報 1）の手法を組み合わせることによって、現実的な生成レートを持つ論理量子ビットの生成が可能となります。また、従来は実証実験レベルでも生成が困難であった複雑かつ有用な量子状態の生成も現実的となり、光量子コンピュータの開発が飛躍的に加速することが期待されます。

○関連情報：

(1)「プレスリリース：伝搬する光の論理量子ビットの生成 一大規模誤り耐性型量子計算への第一歩」(2024/1/19)

<https://www.t.u-tokyo.ac.jp/press/pr2024-01-19-001>

(2)「プレスリリース：大規模・汎用量子計算を実行できる量子もつれの生成に成功 ー新しいアプローチで量子コンピューター実現に突破口」(2019/10/18)

https://www.t.u-tokyo.ac.jp/press/foe/press/setnws_201910181412015784932370.html

発表者・研究者等情報

東京大学 大学院工学系研究科

川崎 彬斗 博士課程／日本学術振興会特別研究員

井出 竜鳳 博士課程

エクター ブルネル 研究当時：大学院特別研究学生／パリ高等師範学校 修士課程

鈴木 拓海 修士課程

中島 将貴 修士課程

山嶋 大地 研究当時：博士課程

高瀬 寛 研究当時：助教／理化学研究所 量子コンピュータ研究センター 客員研究員

遠藤 護 講師

兼：理化学研究所 量子コンピュータ研究センター 客員研究員

アサバナント ワリット 助教

兼：理化学研究所 量子コンピュータ研究センター 客員研究員

古澤 明 教授

兼：理化学研究所 量子コンピュータ研究センター 副センター長

マサチューセッツ大学アマースト校

ラジュヴィー ネハラ 助教授

日本電信電話株式会社 先端集積デバイス研究所

柏崎 貴大 准特別研究員

井上 飛鳥 研究主任

梅木 毅伺 特別研究員

情報通信研究機構 未来 ICT 研究所神戸フロンティア研究センター 超伝導 ICT 研究室

知名 史博 研究当時：研究員

現：産業技術総合研究所 研究員

藪野 正裕 主任研究員

三木 茂人 室長

寺井 弘高 上席研究員

理化学研究所 量子コンピュータ研究センター

阪口 淳史 特別研究員

各機関の役割

- 東京大学：実験系の設計・構築、データ取得・解析など実験・理論全般
- パリ高等師範学校、マサチューセッツ大学、理化学研究所：実験・理論に関する議論
- NTT：光パラメトリック増幅器の作製
- 情報通信研究機構：超伝導光子検出器の作製・提供

論文情報

雑誌名：Nature Communications

題名：Broadband generation and tomography of non-Gaussian states for ultra-fast optical quantum processors

著者名：Akito Kawasaki, Ryuhoh Ide, Hector Brunel, Takumi Suzuki, Rajveer Nehra, Katsuki Nakashima, Takahiro Kashiwazaki, Asuka Inoue, Takeshi Umeki, Fumihiro China, Masahiro Yabuno, Shigehito Miki, Hirotaka Terai, Taichi Yamashima, Atsushi Sakaguchi, Kan Takase, Mamoru Endo, Warit Asavanant*, Akira Furusawa* (*責任著者)

DOI：10.1038/s41467-024-53408-w

URL：<https://www.nature.com/articles/s41467-024-53408-w>

研究助成

本研究は、科学技術振興機構ムーンショット型研究開発事業 ムーンショット目標6「2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現」

(プログラムディレクター：北川 勝浩 大阪大学 量子情報・量子生命研究センター センター長)研究開発プロジェクト「誤り耐性型大規模汎用光量子コンピュータの研究開発(JPMJMS2064)」

(プロジェクトマネージャー (PM)：古澤 明 東京大学 大学院工学系研究科 教授)、「ネットワーク型量子コンピュータによる量子サイバースペース (JPMJMS2066)」(PM：山本 俊 大阪大学 大学院基礎工学研究科 教授/量子情報・量子生命研究センター 教授)による支援を受けて行われました。

用語解説

(注1) シュレディンガーの猫状態

シュレディンガーの猫は 1935 年にオーストリアの物理学者シュレディンガーによって提唱された有名な思考実験です。シュレディンガーは量子的な重ね合わせ現象として、古典物理学ではあり得ない、生きている猫と死んでいる猫が同時に存在する状態を例示しました。光学系におけるシュレディンガーの猫状態とは、位相が反転した 2 つのレーザー光（生きている猫と死んでいる猫に相当する）の重ね合わせ状態のことを指します。シュレディンガーの猫状態は 2 つのレーザー光の量子的な干渉に由来する高い非古典性を示し、この非古典性を利用した論理量子ビット生成のリソース状態としても用いられます。

(注2) 論理量子ビット

量子情報処理においては、「量子ビット」が量子情報を伝達します。古典情報処理におけるビットは 0 か 1 の離散的な値を取りますが、量子ビットの場合はこの 0 と 1 の重ね合わせを取りうるという特徴を持ちます。物理レベルの量子ビットでは外乱やエラーが発生すると、量子情報を保持できなくなってしまうため、量子状態を保持したまま、エラーの情報を取り出し訂正を可能にする「論理量子ビット」を構成することができます。「論理量子ビット」の構成方法では、複数の物理量子ビットを組み合わせて冗長性を持たせる場合が多いですが、東京大学古澤研究室では、1 つの量子ビット内に冗長性を持たせ論理量子を構成する実証実験に成功しています（関連情報 1 参照）。

(注3) ホモダイン測定器

光を用いた量子情報処理では、量子情報は光の振幅と位相に対してエンコードされることとなります。ホモダイン測定は、特定の位相方向の光の振幅を測定することのできる量子測定手法となっています。一般的な光の測定としては、フォトディテクタによる光のパワー測定がよく用いられますが、パワー測定では、光の位相情報を読み取ることができないため、量子情報処理における測定としては適しません。測定誘起型量子計算と呼ばれる種類の量子計算手法では、ホモダイン測定とその測定結果に応じたフィードフォワード操作を繰り返し行うことによって、具体的な量子計算を実行することができます。

(注4) 光パラメトリック増幅器

光パラメトリック増幅は、非線形光学効果を用いて光を増幅する技術となっています。この増幅手法では、ポンプ光という強い光を補助的に用いることにより、信号光の増幅を行います。量子光学的観点から見るとこの操作は、光の持つ特定の位相方向の振幅を増幅させ、逆にその位相に直交する方向の振幅を減衰させる操作（スキューミング操作）となります。スキューミング操作は、量子計算においてはリソース光源の供給や、高速な量子測定に用いられており、非常に重要な役割を果たしています。本研究においては導波路型の光パラメトリック増幅器モジュールを用いて、各所のスキューミング操作を実現しています。

(注5) 周波数帯域

周波数とは光の波が1秒間に何回振動するかを示しており、その単位にはヘルツ(Hz)が用いられます。周波数帯域とは、どれだけの範囲の周波数成分を用いることができるかという指標となっています。任意の形状の光の時間波形は、さまざまな周波数成分の重ね合わせによって表現することができます。この周波数と時間波形の関係はフーリエ変換と呼ばれる操作によって1対1に対応しています。一般的には周波数帯域が広いほど、短い時間波形を用いることが可能となります。情報処理の文脈では、短い時間波形の光を用いることができれば、同じ時間で多くの情報を処理することができるため、光学システムの広帯域化は量子コンピュータ開発の重要な目標の1つとなっています。

問合せ先

(研究内容については発表者にお問合せください)

東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻
助教 アサバナント ワリット

〈報道に関すること〉

東京大学大学院工学系研究科 広報室

日本電信電話株式会社先端技術総合研究所 広報担当

[問合せフォームへ](#)

情報通信研究機構 広報部 報道室

理化学研究所 広報室 報道担当

科学技術振興機構 広報課

〈JST 事業に関すること〉

科学技術振興機構 ムーンショット型研究開発事業部
櫻間 宣行 (さくらま のりゆき)