

2025 年 7 月 8 日

報道機関 各位

国立大学法人東北大学

光子 1 個の微弱光で 最適化問題を解ける計算機の新原理を提案

— 量子デジタルハイブリッドコンピューティングにおける大きな進展に期待 —

【発表のポイント】

- 光の量子力学的な効果を活用して効率的に組み合わせ最適化問題を解く新しい「コヒーレントイジングマシン(CIM)」を提案しました。
- 通常の CIM に比べ、極めて微弱な光で高い性能を示す「単一光子 CIM」の可能性を理論・数値シミュレーションにより実証しました。
- 今回提案された単一光子 CIM はパルスあたり平均 1 光子という極限の量子状態で動作し、通常であれば光損失やバックグラウンドノイズによって失われるはずの量子もつれが、量子計測とフィードバック制御によって有効活用されることを示した量子デジタルハイブリッドコンピューティングにおける大きな進展となる成果です。

【概要】

東北大学大学院情報科学研究科の熊谷政仁特任助教と小林広明教授らは、NTT Research, Inc.Physics & Informatics (PHI) 研究所(米国カリフォルニア州サンバール、所長 山本喜久)と共同で、量子光学的原理に基づいた新しいタイプの計算機「単一光子コヒーレントイジングマシン(CIM)」を提案し、その性能評価を行いました。本成果は、制約付き最適化問題^(注1)に定式化される教師なし機械学習の代表的課題に対して、極めて微弱な光(平均 1 光子/パルス)で高い最適解探索能力を持つことを世界で初めて示したものです。

研究成果は、英国物理学会(IOP)が発行する量子科学技術分野の学術誌 Quantum Science and Technology に掲載されました。

【詳細な説明】

研究の背景

コヒーレントイジングマシン(CIM)は、イジングモデルと呼ばれる磁性体モデルの最小エネルギー状態を見つけるために開発された、従来型のデジタル回路による計算と光アナログ計算を組み合わせたハイブリッド計算機です。従来の CIM は、数百万以上の光子を含むパルスを用いて、イジングモデルにマッピングされた組合せ最適化問題を解いてきました。

今回の取り組み

今回提案された「単一光子 CIM(図 1 参照)」は、パルスあたり平均 1 光子という極限の量子状態を用いて動作する点で、これまでの常識を覆す性能を持つことが確認されました。

数値シミュレーションの結果、従来報告されていた多光子 CIM ([Science 354, 603 \(2016\)](#), [Science 354, 614 \(2016\)](#)) に比べて、単一光子 CIM はより高い問題解決の成功確率を示しました(図 2 参照)。その背後には、取り出しビームスプリッタ(図 1、BS1)により単一光子^(注2)レベルで生成された量子もつれが、その直後、量子測定とフィードバック制御によって測定されたパルスと他のパルス全体との古典的相関に変換され、計算性能の向上をもたらすという量子強化メカニズムが存在します。

この現象は、通常であれば光損失やバックグラウンドノイズによって失われるはずの量子もつれ^(注3)を、量子計測とフィードバック制御によって有効活用できることを示すものであり、量子コンピューティング^(注4)と光情報処理^(注5)の融合における大きな進展です。

今後の展開

東北大学では、単一光子 CIM の理論的検証を基に、実機実装に向けた研究を NTT Research と共に推進しています。今後、ベクトル計算や並列処理によるシミュレーションの高速化を行い、スパースな接続をもつ 1 億スピン規模の大規模シミュレーション環境(Cyber CIM)の構築を目指します。これにより、現実の産業問題に対する迅速かつ低消費電力の解決法が提供されることが期待されます。

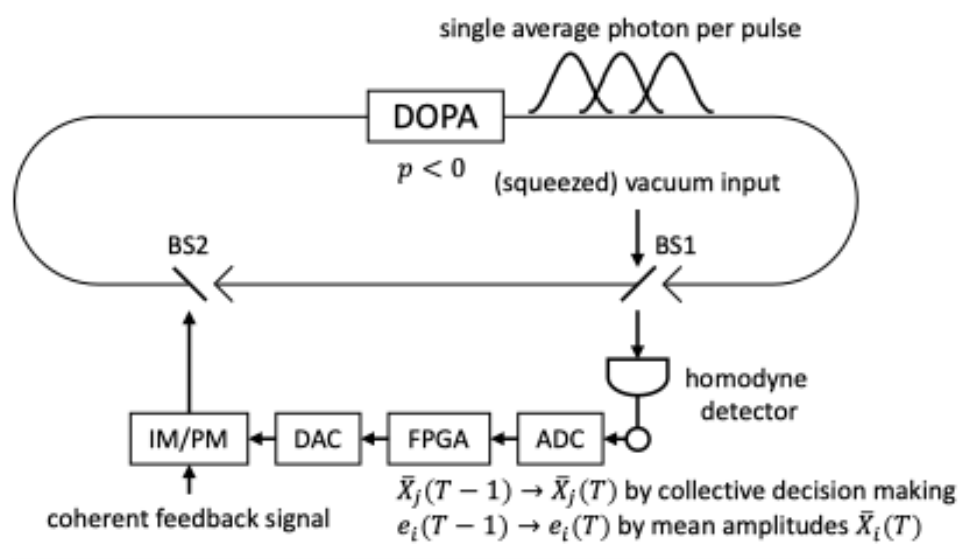


図 1. 単一光子 CIM システムの構成

各パルスは FPGA 回路を用いた制御により、平均光子数が 1 程度となるように維持されている。

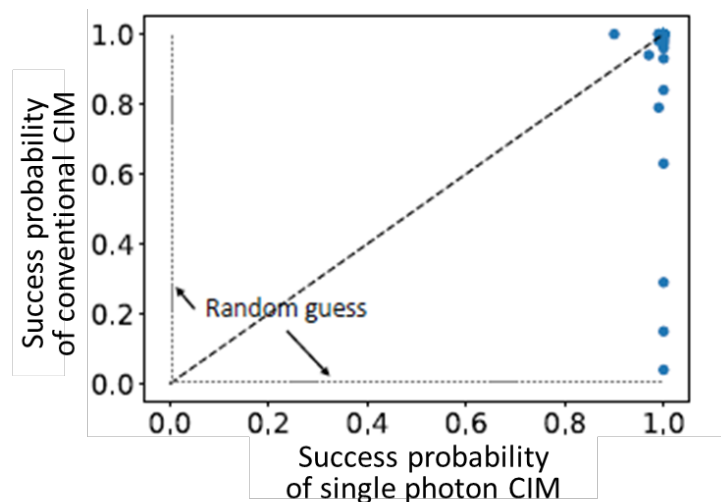


図 2. 単一光子 CIM と従来型 CIM における成功確率の比較

(100 インスタンスでの結果。破線は両者の成功率が等しい点を示す。)

【謝辞】

本研究は、2023 年 12 月から実施している東北大学・NTT Research 間の国際共同研究「サイバーCIM の大規模高性能計算プラットフォーム構築」に基づくものです。また、本論文は『東北大学 2025 年度オープンアクセス推進のための APC 支援事業』の支援を受け、Open Access となっています。

【用語説明】

- 注1. 制約付き組み合わせ最適化問題: 複数の選択肢の中から最適な組み合わせを選ぶ「組み合わせ最適化問題」において、特定の制約(条件)が与えられた問題。本研究においては、類似するデータからなるグループを作成する組合せ最適化問題であるクラスタリングにおいて、全てのデータがただ一つのクラスタ(グループのこと)に所属するという制約が課せられている。
- 注2. 単一光子、多光子: 「単一光子」とは、1 個の光子(光の最小単位)で構成される非常に弱い光の状態を指す。「多光子」はこれに対し、数百万から数十億個の光子を含む通常の光の状態を指す。量子情報処理や量子通信において、単一光子は量子効果を強く反映する特徴を持つ。
- 注3. 量子もつれ: 2 つ以上の量子系が互いに強く相関し、1 つの量子系の状態を測定すると、もう一方の状態も即座に決まる現象。アインシュタインが「不気味な遠隔作用」と表現したことで知られ、量子通信や量子計算の基盤技術である。
- 注4. 量子コンピューティング: 量子力学の原理を応用した計算方式で、量子ビットを用いて情報を処理する。従来のコンピュータでは困難な問題に対して高速な解法を提供できる可能性があり、暗号解読、材料開発、最適化問題の解決などへの応用が期待されている。量子ビットとして磁性体スピンや光子パルスなどを用いる様々な研究が展開されている。
- 注5. 光情報処理: 光(レーザーなど)を用いて情報の伝送・演算・記録を行う技術。電子を用いる従来の情報処理よりも高速かつ低消費電力で処理が可能となるため、次世代の高速計算機や光通信技術として注目されている。

【論文情報】

タイトル: Single Photon Coherent Ising Machines for Constrained Optimization Problems

著者: Masahito Kumagai, Yoshitaka Inui, Edwin Ng, Satoshi Kako, Kazuhiko Komatsu, Hiroaki Kobayashi and Yoshihisa Yamamoto

*責任著者: 東北大学大学院情報科学研究科 特任助教(研究) 熊谷政仁

掲載誌: Quantum Science and Technology

DOI: [10.1088/2058-9565/addde5](https://doi.org/10.1088/2058-9565/addde5)

URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-9565/addde5>

【問い合わせ先】

(研究に関すること)

東北大学大学院情報科学研究科

教授 小林広明

TEL: (022)795-7010

Email: koba@tohoku.ac.jp

(報道に関すること)

東北大学大学院情報科学研究科

広報室 鹿野絵里

TEL: (022)795-4529

Email: koho_is@grp.tohoku.ac.jp