

博士論文（要約）

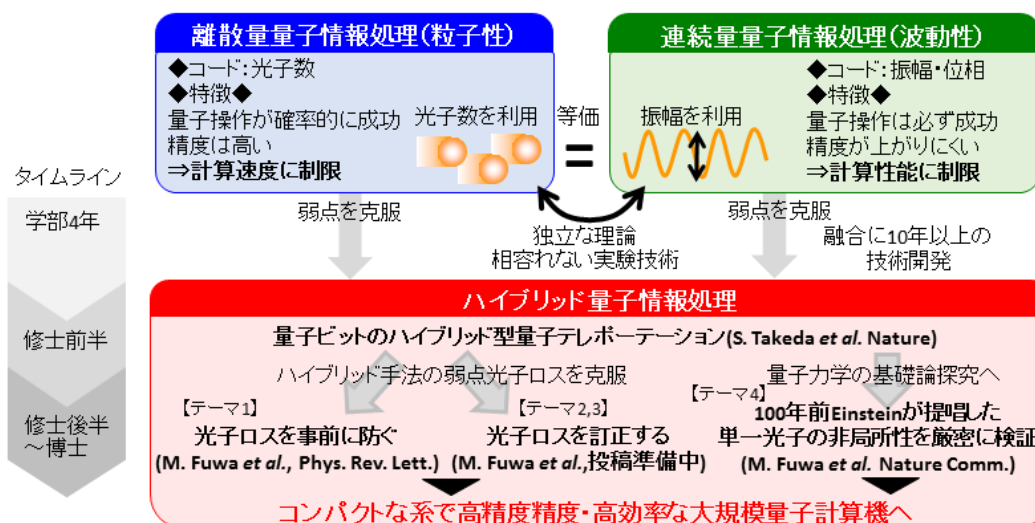
連続量離散量融合型量子情報処理の研究

不破 麻里亜

概要:量子計算を高効率・高精度に実現するコンパクトで拡張可能な基盤技術を開発

量子情報処理は、光や原子などの量子力学的な性質を生かして、古典技術を超える情報処理を実現する。このような飛躍的な情報処理能力の向上を担うハードウェアとして、光、原子、超伝導回路などが検討される中、当研究室では光を用いた量子コンピュータの研究を行っている。光には、唯一、常温でも量子力学的な性質を発揮するという利点がある。

このような背景のもと、当研究室の先行研究では、それぞれ個別に発展を遂げてきた光を用いた量子情報処理の2つの方針を融合した、ハイブリッド技術の先駆的な実証実験および実用化へ向けた基盤技術開発を行い、量子操作の成功確率を向上させることに成功した。本研究ではさらに、先行研究で浮き彫りになった光子ロスという弱点を克服する基盤技術を2通り開発することで（テーマ1~3）、量子操作を高精度化・高効率化することに成功した。ハイブリッド技術の実用化を目指して、大規模量子計算へ拡張可能な形で技術を開発したことで、コンパクトな系を用いた高効率な大規模量子計算の実現に大きく近づいたと言える。さらに、開発した技術を用いて、100年前にアインシュタインが提唱し、多くの物理学者たちがその検証にしのぎを削ってきた現象「単一光子の非局所性」を厳密に検証することに成功した、量子力学の基礎論の探究にも貢献した（テーマ4）。



《先行研究と本研究の位置づけ》 光量子コンピュータの実用化に向けた基盤技術開発

背景・先行研究:光を用いた量子情報処理の2つの方法の技術融合により限界を突破

光を用いた量子情報処理では、粒子性と波動二面性のどちらか一方の性質を利用した手法が独立に発展を遂げてきた。粒子性を利用した手法は「離散量量子情報処理」と呼ばれ、光子数という離散変数に情報をコードした量子ビットを用いて量子計算を行う。一方で、波動性を利用した方法は「連続量量子情報処理」と呼ばれ、光の直交位相振幅という連続変数に情報をコードする。前者では、量子操作が実行される確率が低い一方で、実行され

た時は高精度である。後者では、量子操作を決定論的に実行できるが、量子エンタングルメントの有限性から精度には限界があり、100%の精度を実現することは不可能である。

ここで、次元が低いため精度が上がりやすい離散量の量子状態に対して、すべての量子状態に対して決定論的に実行できる連続量の手法を適応することで、双方の弱点を克服できることが期待される。そこで、まず、1光子量子ビットに連続量の量子操作を世界で初めて適応し、ハイブリッド型技術により、離散量の手法の高い精度を維持しつつ、成功確率を従来技術から向上できることを示した (S. Takeda *et al.* Nature 2013)。行った操作は「量子テレポーテーション」と呼ばれ、量子状態を破壊して遠隔地で再現することで、遠隔地へ転送するプロトコルである。これを改変するだけで、すべての量子計算を実現できる点から、量子情報処理における重要な基盤技術である。このハイブリッド技術を確立は、当研究室で10年以上かけて開発してきた技術の集大成によって実現した。

内容:ハイブリッド技術の弱点光子ロスを克服し、大規模量子計算の基盤技術を拓く

ハイブリッド技術では、連続量量子情報処理の手法を用いるため、連続量量子エンタングルメントの有限性によって、量子操作の精度には限界が残ってしまう。その結果、一般的なテレポーテーションの過程は、熱平衡化過程となる。例えば1光子をテレポーテーションした場合、出力状態は、真空場（光子ロスエラー）、元の1光子、および2~3光子程度の高次の光子（多光子エラー）の混合状態となる。ここで離散量の手法により、光子検出器を用いて出力光子の有無を検出した場合、高次の光子はエラーとなる点で問題が生じる。そこで、先行研究では、「ゲインチューニング」と呼ばれる方法を用いて、テレポーテーション過程が減衰過程になるように調節し、生じうるエラーを光子ロスエラーに限定することで、多光子エラーの問題を回避した。

しかし、この光子ロスエラーは依然として量子状態の転送精度を下げる要因といえる。このため、連続した量子計算を必要とする量子コンピュータに当時のハイブリッド技術を応用することは困難とされていた。そこで本研究では、ハイブリッド技術の実用化を近づけるべく、大規模量子計算機へ拡張可能な形で、光子ロスを克服する手法を2通り見出し、その手法を用いて量子テレポーテーションを行った。これより、見出した手法を量子情報処理の基盤技術として確立した。1つ目の手法は、量子操作の事前に光子ロスを防ぐ方法である（テーマ1）。2つ目の手法は、光子ロスを訂正する方法である。このためには、光子が失われても情報が残っている必要があり、情報をコードする光子数を増やす必要がある。そこで本研究では、高次の光子数状態に対して、連続量の手法を適応した量子操作を行うための基盤技術開発を行った（テーマ2）。将来的には、テーマ1、2で開発した2つの技術を併用して、大規模量子計算を実現することが期待される。

量子テレポーテーションは以下の 5 ステップで行われる：(i)入力量子状態の準備、(ii)量子状態の送信者と受信者との量子エンタングルメントの共有、(iii)送信者が入力状態と量子エンタングルメント状態の片方を相互干渉させて最大エンタングルメント状態へ射影測定（ベル測定）、(iv)送信者が受信者へ(iii)の結果を送信、(v)受信者が(iv)の結果を元に量子エンタングルメント状態の片方に補正を加え、入力状態を再現。



テーマ 1 では、1 光子の量子テレポーテーションにおいて、ステップ(iii)のベル測定の結果から、**光子ロスが最も起きにくい試行を事前に選別**することで、**光子ロス頻度を下げた** (M. Fuwa et al. Phys. Rev. Lett. 2015)。この方法では、操作前に選別を行うため、出力状態に光子ロスエラーがないことが保障され、連続的に計算を実行できる点で優れている。さらに入出力関係は、ノイズレスな減衰過程 $|\psi\rangle \rightarrow (\tanh r)^{\hat{n}} |\psi\rangle$ (r : エンタングルメントの強さを表す squeezing parameter) になっているため、連続量量子情報処理の手法を併用した量子操作でも、原理的には 100%の計算精度を得ることができる。

2 つ目の手法は、光子が消去されても、無くなった光子の情報を復元するという「量子エラー訂正」であった。このためには、光子の数を増やす必要があったが、この実現に向けた第一歩として、テーマ 2 では**光子の数を 1 個から 2 個へ増やした時間 2 モード量子トリット** $|\psi\rangle = \alpha|20\rangle + \beta|11\rangle + \gamma|02\rangle$ (α, β, γ : 複素数)を生成した上で、**量子テレポーテーションを行った** (M. Fuwa et al. 投稿予定)。これより、量子ビットに含まれる光子の数を 1 から 2 に増やし、2 光子部分空間とロスを受けた後の 1 光子部分空間の情報を用いることで、**量子操作の精度を向上**できることを示した。このことは、離散量量子情報処理の手法のみでは、原理的に不可能なことが理論的に示されている。この成果により、**複数の光子に連続量量子情報処理の技術を適応する量子情報処理が可能となり、量子誤り訂正可能な量子情報処理への第一歩を踏み出した**。さらに、離散量の手法を用いた場合の量子テレポーテーションの成功確率は、量子状態の次元 d に対し、べき乗 $1/d^2$ 以下で減衰すると予想される。一方で、連続量の手法を用いると入力状態によらず効率 $\tanh^2 r \cong 73\%$ を得られるため、高次元の量子状態ほどハイブリッド手法が**効率の観点から優位**になる。

これら技術を発展させ、多光子、多モードの複雑な量子状態を用いて大規模量子計算機を行うためには、対象となる量子状態を推定し、大規模な量子計算が正しく行えたか否かを検証する必要がある。そこで本研究では、連続量の手法であるホモダイン測定を用いた

直交位相振幅(x,p)の同時測定より、 Q 関数を推定することで、多光子・多モードの量子状態を従来手法より**早く正確に推定する量子トモグラフィー方法を開発**した(テーマ3)。

さらに、テーマ4では**ハイブリッド技術を量子力学の基礎論探求へ応用し、アインシュタインが約100年間に初めて提唱した「単一光子の非局所性」という奇妙な現象を厳密に検証**した(M. Fuwa *et al.* Nature Communications 2015)。この検証方法をめぐっては「物理学の100年論争」といえる議論が繰り広げられ、多くの物理学者たちがこの現象の厳密な検証にしのぎを削ってきた。2011年に厳密な検証にはハイブリッド技術が不可欠なことが示され、本研究室の技術の集大成により検証された。

まとめ:量子操作を高効率化・高精度化し、コンパクトな大規模量子計算機へ

以上、離散量の量子状態に対して連続量の手法を適応したハイブリッド手法において、その最大の弱点である光子ロスを克服する基盤技術を開発した。この技術は、大規模量子計算へそのまま拡張可能である。ゆえに、本研究によって、コンパクトな系で高効率な大規模量子計算機の実現に大きく近づいたといえるだろう。

主な発表論文

1. S. Takeda, T. Mizuta, M. Fuwa, P. van Loock, and A. Furusawa, *Deterministic quantum teleportation of photonic quantum bits by a hybrid technique*, Nature **500**, 315-318 (2013).
2. M. Fuwa, S. Toba, S. Takeda, P. Marek, L. Mista Jr., R. Filip, P. van Loock, J. Yoshikawa, and A. Furusawa, *Noiseless conditional teleportation of a single photon*, Phys. Rev. Lett. **113**, 223602 (2014).
3. M. Fuwa, S. Takeda, M. Zwiernik, H. M. Wiseman, and A. Furusawa, *Experimental proof of nonlocal wavefunction collapse for a single particle using homodyne measurements*, Nature Communications **6**, 6665 (2015).
4. M. Fuwa, M. Okada, S. De Leseleuc, K. Makino, J. Yoshikawa, P. van Loock, and A. Furusawa, *Photon Loss Robust Quantum Teleportation of Qutrits* (投稿予定)

このうち、(1)と(3)の成果は国内外のメディアで幅広く取り上げられた。