



Title	二準位系とスクイーズドコヒーレント状態を用いた量子情報処理に関する研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	松岡, 史晃
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第11298号
Issue Date	2014-03-25
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/55487">https://hdl.handle.net/2115/55487</a>
Rights(URL)	<a href="https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/">https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/</a>
Type	doctoral thesis
File Information	Fumiaki_Matsuoka_review.pdf, 審査の要旨



## 学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (情報科学) 氏名 松岡 史晃

審査担当者 主査教授 富田 章久

副査教授 村山 明宏

副査准教授 岡本 淳

## 学位論文題名

二準位系とスクイズドコヒーレント状態を用いた量子情報処理に関する研究

( Study on quantum information processing using two-level systems and squeezed coherent states )

計算機は現代社会の発展に重要な役割を担っている。気象予測や創薬、物理現象のシミュレーションといった基礎科学分野から、医療診断・ロボット・音声や映像の認識・パーソナルコンピュータや携帯電話といった産業分野や個人レベルに跨る領域で広く使われている。特に、ここ最近では2011年にスーパーコンピュータ「京」が世界一の演算性能を獲得したことが話題となった。高速処理を行うためには、デバイスの小型化、集積化が重要であり、近年ではそれに伴う量子効果が無視できないレベルにまで達しつつある。このまま原子スケールまで小型化されると、量子力学的な性質が顕著に現れるようになるため、これまでの原理に基づく計算機では対応できなくなる。この問題を解決するためには、新しい原理に基づく計算機が必要である。

そこで最近注目されているのが、量子力学的な性質を積極的に情報処理に取り入れた量子情報処理に基づく量子コンピュータである。量子情報処理では、通常の0と1のビットとは異なった、2準位量子系の状態の重ね合わせである量子ビット (qubits) と、量子もつれと呼ばれる2つ以上の量子状態間の相関 (片方の量子状態が決まればもう片方も決まる) を用いる。量子コンピュータは、現在のスーパーコンピュータで数億年かかるような、時間的に計算困難な問題を瞬時に解くことができる可能性があるとして非常に重要視されている。しかしながら、現段階では現在の計算機よりも優位となる規模の量子計算機は実現できていない。その理由は、量子状態が環境に対してロバストであれば、外界との相互作用が弱いことを意味し、量子状態を外部から制御することが困難であり、逆に量子状態を制御し易ければ、外界との相互作用も強くなり、量子状態を破壊されてしまうためである。この問題に対して近年、量子ビット間でもつれ状態を作るために、量子通信 (コヒーレント光のような連続量) を用いる方法が提案されている。個々の量子ビット間の相関が弱くとも、量子通信との相関を強くできれば、量子通信を介して間接的に量子ビット間にもつれ状態を形成できる。しかし量子通信の媒体としてコヒーレント光を用いた場合、エラー確率が非常に大きくなってしまいう問題がある。誤り訂正を行いながら効率的にもつれ状態を形成する方法が提案されているが、そのためには量子通信を用いた手法のように成功確率が50%の場合は $4 \times 10^{-4}$ 以下のエラー確率が求められ、従来の手法では実現が困難である。

また、全光による量子コンピュータの実現のためには大きな光子間非線形相互作用が求められる。一般に、量子ゲートでは、位相シフトが必要である。上に述べた量子通信を用いる方法では、コヒーレント光の振幅と相互位相変調 (XPM) によって生じるプローブ光の位相シフトの積が1より十分大きい必要がある。しかし現段階では、完全な単一光子光源によるXPMは観測さえ達成されていない

い状況にある。従来、単一光子の非線形性弱値増幅を用いたプローブ光の位相シフト測定手法が提案され、この方法によって、技術（熱や電気）的な雑音に対しての SNR が改善されることが理論的に示されているが、実験的観測は未だ報告されていない。

これらのような状況に際し、本論文では大規模量子コンピュータの実現を目指して、量子通信による 型 3 準位原子間のもつれ形成のエラー確率の低減方法を新規に提案している。また、全光量子コンピュータの実現に向けて、単一光子の非線形性観測の性能向上のための手法を提案している。

第 1 章では研究背景・目的を述べている。

第 2 章では、量子光学の基礎と本研究に関係する先行研究に関する説明を行っている。

第 3 章では、弱測定と弱値の基本的な概念及びこの弱測定の分野における本研究に関係する先行研究について説明している。

第 4 章では、量子通信による 型 3 準位原子間のもつれ形成のエラー確率低減を検討している。エラーは位相平面上の重ね合わせ状態にある光の状態間の重なりによって生じるため、この面積を減らす事でエラー確率を改善できる。しかし、コヒーレント光の自由度は振幅と、原子との相互作用による位相シフトのみであり、弱結合かつ弱い吸収レートが求められるためこれらは実際上制限され、エラー確率 0.14 がほぼ実効的な限界となる。そのため、本論文の著者はスクイーズドコヒーレント光を用いた量子通信による原子間もつれ形成のエラー確率低減を提案している。もつれ形成のエラー確率は、測定の方法によって異なってくるため、理論的な識別限界である最適測定の場合と光の位相測定実験でよく用いられるホモダイン測定を用いた場合の両方についてエラー確率を導出し、それぞれ  $10^{-8}$  台、 $10^{-5}$  台と大きな改善が期待できることを示している。また、本手法に用いるもつれ形成の成功確率は 50% であり、100% に近づけるには繰り返し操作が要求されるが、エラー確率の改善により、繰り返し操作時の量子メモリの初期化が不要になることも示している。スクイーズドコヒーレント光の性質は損失に影響を受けるため、損失がある場合のエラー確率をも導出し、量子誤り訂正の適用可能性についても考察している。

第 5 章では、単一光子非線形性の弱値増幅に関する事後選択成功確率改善の方法を提案し、さらに物理的な意味を明確にするために厳密な解析を行っている。弱値増幅を得るためには、被測定系側で事前・事後選択を行う必要がある。プローブ光の測定は事後選択が成功した時のみ実行され、従って成功確率は低くなってしまふ。成功確率は、プローブの XPM が生じる前の非位相シフト状態と生じた後の位相シフト状態間のオーバーラップによって決まり、これを小さくすることで成功確率を改善できる。著者はプローブ光としてスクイーズドコヒーレント状態の使用を提案し、1 桁以上成功確率が改善できることを示している。これによって単一光子の非線形性の実験的観測の可能性が高まったといえる。また、近似の影響を調べるために、厳密に求めた波動関数を用いた解析を行い、XPM によってプローブと単一光子がもつれ合い、単一光子を事後選択することが、Photon Subtraction と呼ばれる現象と類似した働きをすることを明らかにしている。

第 6 章では、本研究で得られた成果を総括し、今後の課題を示している。

これを要するに、著者は量子もつれ形成を低いエラー確率で実現する手法、および単一光子の非線形観測手法を提案し、光を利用する量子コンピュータの実現に向けた多くの有益な知見を得ており、量子情報科学の分野に貢献するところ大なるものがある。よって著者は北海道大学博士（情報科学）の学位を授与される資格あるものと認める。