

氏 名 たけ うち しげ き
竹 内 繁 樹
学位(専攻分野) 博 士 (理 学)
学 位 記 番 号 論 理 博 第 1385 号
学位授与の日付 平 成 12 年 7 月 24 日
学位授与の要件 学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当
学 位 論 文 題 目 Analysis of errors in linear optics quantum computation
(線形光学素子量子計算におけるエラーの解析)

論文調査委員 (主 査)
教 授 藪 崎 努 教 授 大 見 哲 巨 助 教 授 篠 本 滋

論 文 内 容 の 要 旨

量子力学の基本的性質である重ね合わせの原理、観測による射影、量子もつれあい、不確定性などを直接に用いる新しい情報計算処理方法としての量子計算はドイチュージョサ (DJ) アルゴリズムの提案によりその具体化への途が開かれた。これを現実のものとするために量子アルゴリズムを物理系で実行する研究を進めていかななくてはならない。申請者はこのための有力な方策となりうる線形光学素子を用いた光学系と、単一光子を用いる方式を提案しこれを実験により検証すると共にその間に見出されたエラー (誤り) の原因を解明している。即ち、申請者は光子とその偏光を用いてキュビットを形成し、複数の光路 (モードという) とビームスプリッタを用いて量子レジスタとすることによって、アルゴリズムに必要とされるユニタリー変換ができることに着目した。申請者はこうした量子計算を可能とする光学系の構築に必要とされる干渉性の高い単一光子源を開発し、高精度の干渉計を構成した。キュビットの形成に必要な位相シフトとコントロールドノットは単一光子と光路の特性を組み合わせることで実現し、4 ビットの外部入力を持つ場合について実験により検証している。更に、実験において見出されたエラーの原因を量子計算の機能上の特徴に着目して解明することにより、線形光学素子法の量子計算研究における位置づけまで明らかにしている。

本論文では、線形光子素子を用いた量子計算の実現方法について述べた (2 章) 後、量子計算におけるエラーの原因とその寄与について一般的に考察を行っている (3 章)。量子計算においては、エラーはいくつかの原因により引き起こされる。即ち、量子ゲートの系統的な誤り、量子ビットの位相緩和、量子ビットの振幅の減少、および検出誤り等である。線形光子素子量子計算においては、それらがそれぞれビームスプリッタの分岐比誤差や光路長誤差、光路長の揺らぎ、光路での光の損失、および検出器のダークカウントに対応することが示され、定量的な関係を与えられている。また、実験系に対称的に損失が存在する場合にはエラーに寄与しない事を示している。解析方法として、各経路毎の波動関数における位相と振幅誤りを用いた簡易な評価方法についても提案している。

更に、4 ビットの DJ アルゴリズム実験をすすめて、誤り率に対するエラーの原因それぞれの寄与を定量的に評価している。まず、4 ビット実験について、その理論、実験系の調整手順を含む実験方法、結果を詳述した後 (4 章)、実験結果とは独立に計測したエラー原因に関するパラメータを基にして、それらエラー原因の寄与を考察し (5 章)、実験で得られたエラーをほぼ再現することに成功している。

また DJ アルゴリズムの規模が4 ビットから 2^k ビットへと拡大したときのエラーの増加についても考察している (6 章)。まず、入力が 2^k ビットのサイズの量子計算実験におけるエラーを、エラー原因に関するパラメータを用いて導出し、それらパラメータとして4 ビット実験での数値を用いて、 2^k ビット実験におけるエラー率を推定している。その結果、既存の実験技術を用いて、11キュビットの実験をエラー率20%以下で実行できること、検出器のダークカウントがその原因を決めることを明らかにしている。

線形光子素子量子計算ではモード間にもつれあいをもたらしすることができないためキュビット数と共に表現に必要とされるモード数は指数関数的に増えるという制約がある。しかし、その構成が明解であるためアルゴリズムの検証に必要とされる

10程度のキュビット系について物卸系で量子計算を実行する際に生じる問題を解明する有用なテストベンチを与えるものとなる。コントロールドノットによる回路を実現する実験が2～3キュビットにとどまっている現状では申請の提案したシステムは先駆的なものとしてその有効性が高く評価される。

論文審査の結果の要旨

量子力学的な重ね合わせ状態を利用して超並列的な計算を可能にする量子計算が次世代の情報通信処理法の開発につながるものとして高い関心が寄せられている。これはビット列の分割を高速に行えるアルゴリズム（ドイチュージョサ（DJ）リアルゴリズムと呼ばれる）が提示され、因数分解を桁数のべき乗に比例する程度の時間で実行することの可能性が示されたことによって具体化され、近年にいたり、こうした量子計算を実行可能とするいくつかの方式が提案されつつある。それらの中で有力な方式の一つとして核磁気共鳴量子計算が提案され、3キュビットのアルゴリズム実験が行われている。しかし、これには演算結果の平均値でしか検出信号が得られないという制約がある。

これに対し申請者は線形光学素子系と単一光子を組み合わせることにより任意のユニタリ変換ができることに着目し、光子の偏光や光路を量子ビットとして用いる量子計算方式を提案し、これに関する実験を行い、4ビットの外部入力に対するDJアルゴリズムの動作実験に成功した。実験の結果このような量子計算に8%程度のエラー（誤り）が生じることを見出した。申請者は量子計算の実現のためには、このようなエラーの原因を明らかにし、その定量的な評価をすることが必要と考え、その解明に取り組んだ。類似の解析は核磁気共鳴量子計算についても行われてきたが、その量子計算方式の性格上、エラーの原因を推察するにとどまり、原因の特定とその定量的な評価には至っていない。これに対し、申請者は線形光学素子量子計算では量子計算のエラー原因が干渉計の明暗比などのパラメータとよく対応することに着目し、エラー原因とその定量的評価を線形光学素子系特有のものと、一般的な観点に立って評価されるべきものとを識別しつつ考察している。その結果、4ビットDJアルゴリズム実験を定量的に解析することに成功し、これを基に線形光学素子量子計算の特徴とその可能性についても明らかにしている。

本研究は量子計算アルゴリズムを実行できる新しい方式を提案し、それを実験的に検証すると共に、その間にみられたエラーの原因を解析的に明らかにしたものであるが、量子計算におけるゲートの系統誤差などの一般的なエラー原因と光路調整の不完全性などの線形光学素子量子計算特有エラーを識別しつつ評価し、量子計算におけるエラーの原因を明らかにし、さらには量子暗号通信などにおいても直面すると思われるエラー解析の基礎を与えたものである。DJアルゴリズムのエラーの規模依存性やその原因に対する耐性が、計算結果に応じて異なることについても明らかにしており、量子計算アルゴリズムに改善の余地があることを示している。

本研究では以上の結果をもとに、既存の技術の基において11量子ビットの線形光学素子量子計算が可能であることを明らかにしている。量子計算の仕組みやそのアルゴリズムの可能性を実証するための量子誤り訂正符号や、因数分解アルゴリズム実験は6～10量子ビットあれば検証できると考えられているので、線形光子素子を用いた量子計算方式は現状においてこうした研究の最も有力なテストベッドたりうることを示している。

以上のように本申請論文は、量子計算の実現に向けて推進の具体的な研究法を創出して実験により検証し、その結果をエラーの観点に立って解析したものであり、量子計算の研究に大きく貢献した先駆的かつ独創的な研究をとりまとめたものである。本申請論文は申請者の当該分野の実験ならびに理論の両面でのすぐれた理解力と高い能力ならびに研究実行力、深い洞察力を示すものであって、博士（論文）の申請論文として十分な内容と価値を備えたものと認められる。

また、主論文と参考論文の内容、および関連分野について口頭試問し、加えて専攻学術分野に関する試問も行った結果合格と判定した。