

# 実用的な量子コンピューター 実現への道程

—横たわるボトルネックと、  
光子を用いる方法の現状—

竹 内 繁 樹

実用的、つまり現在のスーパーコンピューターを超える計算能力をもつ量子コンピューターを実現するためには、「比例性」「拡張性」「エラー耐性」が必要な条件である。これらの概念について整理し、量子コンピューターの実現に向けたボトルネックを明らかにすることを試みる。また、量子コンピューターの最近の実験研究状況、ならびに光子を用いた量子情報処理の実現に向けたわれわれの最近の研究成果について報告する。

**Keywords :** quantum computation, quantum computer, photon, scalability, expandability, fault tolerance

## 1. ま え が き

「量子コンピューターは、ビットの代わりに量子ビットを用いる、まったく新しい原理に基づく計算機だ」「量子並列性を用いて、ある種の計算を非常に高速に行える。例えば、10,000 ビットの因数分解は、現在最速のアルゴリズムを用いて多数のコンピューターネットワークを用いても 1000 億年かかると思われるが、もし量子コンピューターができれば数時間で解くことができる可能性がある」といった話は、もうどこかで一度は耳にされたのではないだろうか。

また、その実現に向けた取組として、4 年前に NMR (Nuclear Magnetic Resonance, 核磁気共鳴) 法による因数分解アルゴリズムの 7 量子ビットによる実験<sup>1)</sup>が、最近ではイオントラップによる 3 量子ビットの誤り訂正符号の実験<sup>2)</sup>が報告された。光子についても線形光学素子を用いた量子ゲートの実験<sup>3,4)</sup>が報告され、最近 4 量子ビットを用いた一方量子計算の報告がなされた<sup>5)</sup>。超伝導体を用いた量子ビットをはじめ固体素子による実現の研究も非常に活発である。

このように、量子コンピューターの物理的実装技術は進展が著しい。しかし、その一方で「20 年以内に、現在のスーパーコンピューターの計算能力をしのぐ量子コンピューターが実現するか」という質問には、私の周囲の人で強く肯定する人はいない。このギャップは、何に原因するのだろうか。本稿は、この疑問について答えることが一つの目的である。

実用的な量子コンピューターを実現するには、比例性、拡張性、およびエラー耐性という三つの性質が要求される。

これらの概念を解説するとともに、量子コンピューターの最近の実験研究状況、ならびに光子を用いた量子情報処理の実現に向けたわれわれの最近の研究成果について報告する。量子コンピューターの基本的な仕組みについては、本誌を含めすでにさまざまな解説<sup>6,7)</sup>や入門書<sup>8,9)</sup>が出ているので、そちらを参考にしてほしい。

## 2. 比例性、拡張性と最近の実験

### 2.1 比例性

量子コンピューターの実装の議論では、まず「スケーラブル (scalable) かどうか」が問題になる。この「スケーラブル」とは、「ある入力  $N$  に対して、時間、素子数などについて  $N$  に指数的に増大しないで計算を実行できる」ことを指す<sup>10)</sup>。以下本稿では、この性質のことを「比例性」と呼ぼう。

例えば、よく例に出される因数分解について考えよう。通常のコンピューター (スパコンを含む) は、因数分解したい数のけた数  $N$  が増大すると、その計算時間は  $N$  に指数的に増える。計算時間自体が  $N$  に指数的に増大することを避けようとするれば、 $N$  に指数的な数のコンピューターを用意して並列計算をするしかない。

それに対して、量子コンピューターは、「あらゆる計算資源が  $N$  に指数的に増大しない」という点に価値がある。その意味で、比例性をもつかどうかは量子コンピューターにとって本質的な意味をもつ。

しかし、これまでに行われた実験や提案の中にはこの比例性をもたない物がある。例えば、IBM の行った 7 量子ビットの NMR 量子計算の実験<sup>1)</sup>について見てみよう。こ

の場合、一見、核スピンの数や、実験の中で用いられている量子ゲート操作の数は、入力ビット数  $N$  に対して指数的には増大していない。しかし、よく見ると、量子コンピューターを初期化する手順において、 $N$  に指数的に増大する手法を用いてしまっている。つまり、彼らの方法はそのままでは本質的に比例性をもたないことになる。他の例としては、筆者が以前行った単一光子と線形光学素子を用いた量子計算の実験<sup>11)</sup>があげられる。この実験においても、量子ビットの数に対して指数的に光路の数が必要になってしまっていた。

ただし、これらの実験は比例性をもたないが、量子アルゴリズムの実現可能性を実証した点、その中で他の方式にも応用可能なさまざまなコンセプトを創出した点、また小規模量子回路に対しては十分実用性をもつ点を補足しておく。

## 2.2 拡張性

もう一つ重要な概念に拡張性がある。例えば、現在のコンピューターで用いられているメモリー素子 (DRAM など) の場合、最小単位の基本構造さえ実現することができれば、原理的にはいくらかでも並べて、巨大なメモリーを構築することができる。このように、基本構造のブロックを組み合わせることで規模を増大できる性質のことを、本稿では拡張性と呼ぼう。

実はこれまで、この拡張性を満たした形での実験はほとんど行われていなかった。例えば、NMR 量子コンピューターは、量子ビットの増加に伴い巨大な分子が必要となる。10,000 量子ビットではその分子量は 10 万に達する。そのような巨大分子を、NMR 量子コンピューターとして設計、実現するのは非常に困難に見える。この状況を改善する理論提案はなされているが、まだアイデアの段階だ。

半導体量子ビットや超伝導量子ビットなど、他の量子ビットについても、拡張性を明瞭に示した形での実験、つまり、実験で用いられた構造を単に複数個並べるだけで大規模な量子回路が実現できるという形での実験は、後述するごく最近のイオントラップの実験を除いて、知るかぎり行われていなかった。

これら比例性・拡張性に加えて、実はもう一つ「エラー耐性 (fault tolerant)」という重要な概念がある。これについては、本稿の最後で触れたい。

## 2.3 最近の量子コンピューター研究現状

この比例性および拡張性を満たす方式として最近注目されているのが、イオンや原子を用いた量子コンピューターだ<sup>2)</sup>。もともとイオンは、その緩和時間の長さから、量子コンピューターの本命視されており、最初の制御ノットの実験もイオンを用いて行われた。しかし、以前の提案では一つのイオントラップに多くのイオンを詰め込むことを想定しており<sup>12)</sup>。量子化された振動(フォノン)を媒介として制御ノットを行うため、余分な振動を完全に取り除く必要があった。そのため実験はきわめて難しく、その拡張性にも疑問がもたれていた。

この拡張性の問題を解決すべく、最近では一つ一つのイオンを一つ一つのイオントラップで捕捉する方法が研究されている。一つのトラップは、数百  $\mu\text{m}$  長の四つの電極で構成されており、それらのトラップは直線上に並べられている。量子ゲート操作は、それぞれのトラップ間でイオンを巧妙に輸送しながら行われる。実際この方法を用いて量子テレポーテーションの実験も報告されている<sup>13)</sup>。

また、超伝導量子ビットの進展も著しい。二つの結合した電荷量子ビットの条件付きゲート実験<sup>14)</sup>や、結合ジョセフソン位相量子ビットの同時状態測定<sup>15)</sup>が報告されている。

## 3. 光子を用いた量子計算

光子を量子ビットとして用いるのには、いくつか利点がある。まず、量子ビットの状態を高い精度で効率よく検出できる点だ。実際光子が検出器に飛び込んだ際に、90%程度の高い確率で検出信号を発生する光子検出器がすでに開発されている。利点の二つめは、1量子ビットのユニタリゲートを、既存の光学部品を用いて高精度で実行できることだ。三つめは、その量子状態を乱さずに長距離の伝送が可能であることだ。量子暗号の実験では、光ファイバーを使って、重ね合わせ状態にある光子を百 km 以上の距離にわたって伝送することに成功している。この特長のため、たとえ小規模な量子回路であっても、量子情報通信の分野で使える可能性がある。

光子を用いた量子情報処理を実現するには、大きく三つ課題がある。光子発生器、光子検出器、ならびに二つの光子間の量子ゲート素子だ。紙数の都合で、ここでは光子発生器と複数光子間量子ゲート素子について、われわれの研究室で行っている研究と併せて見てみよう。

### 3.1 単一光子源

光子を量子ビットの担体として用いる場合、まずその光子を一粒ずつ発生させることが求められる。このとき、単にレーザー光を微弱にただけでは、単一光子発生させることはできないことに注意が必要だ。その場合実現できるのは、「平均の光子数が1の状態」であり、光子がない状態、二つの光子が存在する状態などのさまざまな状態が存在してしまうからだ (図1)。

量子コンピューティング用の単一光子源としてまず重要なのが、光子一つを発生させる確率  $P(1)$  が高いことだ。 $N$  個の光子を用いて量子計算を行いたい場合、その  $N$  個の光子を準備できる確率は、 $P(1)^N$  で与えられ、 $P(1)$  が小さいとすぐに0になってしまう<sup>16)</sup>。つまり多くの光子を用いて計算を行うためには、高い光子発生確率が必要だ。

光子の発生方法には、現在主に二つの方法がある。一つは、同時に二つの光子を発生させ、一方の光子の検出信号をトリガーとして用いる方法であり、もう一つは、単一の発光体から発生する光子を用いる方法である。

前者の方法では、主にパラメトリック下方変換が用いられている。非線形光学結晶にポンプ光を入射すると、それ

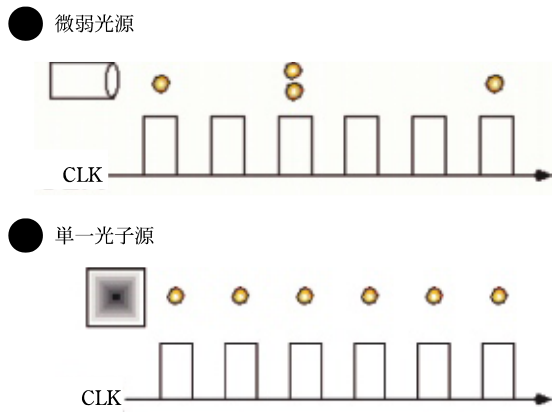


図1 微弱光源と単一光子源。レーザー光などを微弱にすると、平均光子数が1の状態を得ることができる。しかし、その場合パルス内に含まれる光子数  $N$  は、ポアソン分布に従いさまざまな値をとる。一方、単一光子源は、かならず一つの光子だけを含む状態を発生する。

らの一部が、半分のエネルギーをもった光子2個に分裂する。この発生した二つの光子をパラメトリック蛍光対と呼ぶ。この光子対はフェムト秒程度の時間内に同時に発生することが知られている。その光子対の一方を検出し、その検出信号で他方の光子の出射をシャッターで制御することで、光子が二つ含まれるパルスの発生を排除するという考え方だ<sup>17)</sup>。単一発光体と比較して、励起光源やトリガー光子を検出する光子検出器が余分に必要になることが欠点だが、すべて室温で安定して動作する、赤外から可視までの波長が得られ、かつ波長可変が容易であるなどの特徴もっている。

われわれは、この方法を用いて最近、出力部で  $P(1) = 0.40$  という高い単一光子発生確率を得ることに成功した。さらに、ポンプ光強度を増大することで、繰り返し 50 kHz で同様の光子数分布 ( $P(1) = 0.39$ ) を得ることに成功した<sup>18)</sup>。

図2に示すのは、後述する制御ノットゲート実験用に開発した、パラメトリック蛍光対を用いた光子対源である。2光子干渉を利用するという実験の目的上、時空間的にシングルモードの光子対が必要なこと、また、同時係数結果のみを利用するため、シャッターは設置していないことが、さきほどの単一光子源と異なる。蛍光対の双方をシングルモードファイバーにカップルする方法を工夫した結果、シングルモードファイバーの出力部で光子を得られる確率  $P(1) = 0.53 \pm 0.04$  を達成した。100 mW のポンプ光強度で、毎秒 100 万光子対の発生が確認された。

後者の単一発光体を用いる方法では、半導体リソグラフィ技術で作成された微小キャビティ中に閉じ込められた量子ドットを用い、高い効率で可視光子を取り出す実験<sup>19)</sup>などが行われている。

### 3.2 線形光学素子を用いた量子ゲート

光子を用いた量子ビットに対して、1ビットの回転ゲートは既存の光学素子を用いて容易に実現できる。しかし、

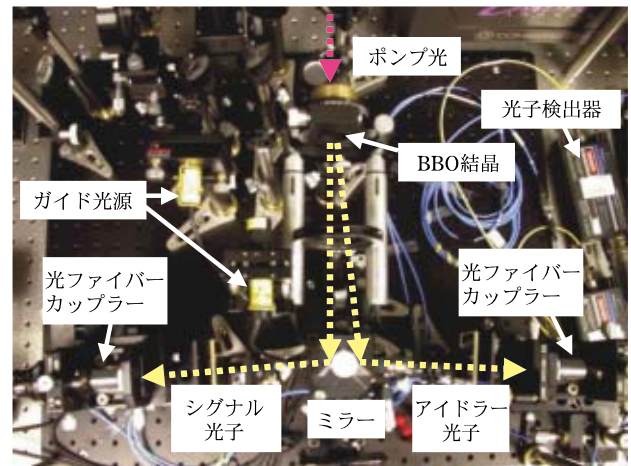


図2 パラメトリック下方変換を利用した光子対源。CW アルゴンイオンレーザー(波長 351 nm)をレンズで集光した後、BBO 結晶に入射しパラメトリック蛍光対をビーム状に発生させた。発生したパラメトリック蛍光対の双方を対物レンズでシングルモードファイバーにカップルした。シングルモードファイバーの出力部での  $P(1)$  は  $0.53 \pm 0.04$ 。

制御ノットゲートなど複数の光子間の量子ゲートの実現は困難と考えられてきた。光子一つの状態でもう一つの光子の状態を制御するためには、巨大な非線形性を必要とするからである。この問題に対して、われわれは二つの方法でアプローチしている。一つは、ビームスプリッターなどの線形光学素子を用いる方法、もう一つは、単一原子などの非線形性を用いる方法である。まず、線形光学素子を用いる方法を見てみよう。

線形光学素子は、文字どおり「線形」に働くため、二つの光子間に相関をもたせることなど不可能なように思える。しかし、光子のボーズ粒子としての性質と、結果の中からある特定の事象だけを選び出すことによって、光子間に相関をもたせることが可能になる。この原理を用いて、われわれは、反射率が 1/3 のビームスプリッターによる量子制御ノットゲートを提案した(図3)<sup>20)</sup>。この仕組みについては以前本誌で詳しく紹介したので、そちらを参照してほしい<sup>21)</sup>。

この位相ゲートは、その後同時に同じアイデアを提案していたクィーンズランド大学のグループによって実験的に検証されている<sup>3)</sup>。最近、われわれのグループでも、特殊なビームスプリッターを用いることで、光路干渉を不要にしたデバイスを発案、その検証に成功した<sup>22)</sup>。

その光子対源から射出された光子対を、構築した光学回路に入射して得られた結果を図4に示す。左側が、理想的な制御ノット動作、右側が実験結果である。この結果から、制御ノット動作が確認され、その一致度は 85%であった。また、制御ビットとして  $|0\rangle$  と  $|1\rangle$  の重ね合わせ状態、信号ビットとして  $|0\rangle$  を入力した際、出力がもつれ合い状態になっていることも確認された。

しかし、このような方法では、一般に成功事象を選択することによってゲート操作を実現するため、その確率は高

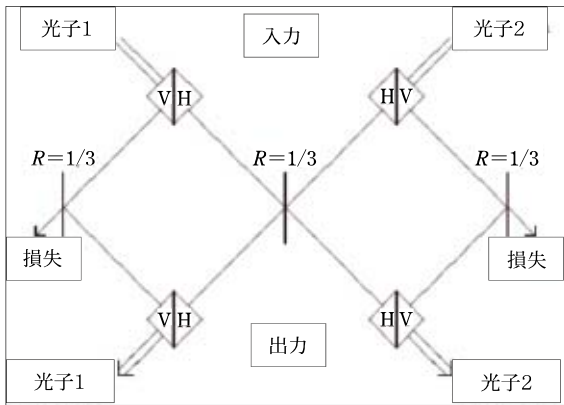


図3 線形光学素子のみによる制御ノットゲート<sup>20)</sup>。反射率1/3のビームスプリッターの「非線形性」を利用して構成した、制御ノットゲートである。入力される量子ビットは、光子1, 2の偏光状態で表される。この制御ノットゲートは単一光子源や光子数検出器をまったく必要とせず、KLMの提案したものに比べて非常にシンプルな構成になっている。ただし、出力部でそれぞれ光子が一つずつ出力される場合にのみ動作するため、汎用的に用いる場合、光子数の量子非破壊測定器や、2状態を検知・除去するフィルターが必要となる。

くなく最大でも1/9でしかない。このままでは、先に述べた「比例性」を満たすことが本質的にできない。そこで、確率をできるだけ1に近づけることが必要になる。そのための方法として提案されているのが、量子テレポーテーションを用いる方法だ<sup>23)</sup>。ゲート動作の成功、不成功を知ることができれば、ゲート動作が成功した場合だけを量子テレポーテーションを用いて後段へと受け渡す。これによって、確率を1に任意に近づけることができる<sup>21)</sup>。このように、線形光学素子と検出器、単一光子源だけを用いて、確率がほぼ1の量子ゲートを構築することが原理的には可能である。

ただし、一つ大きなボトルネックが存在する。現在の提

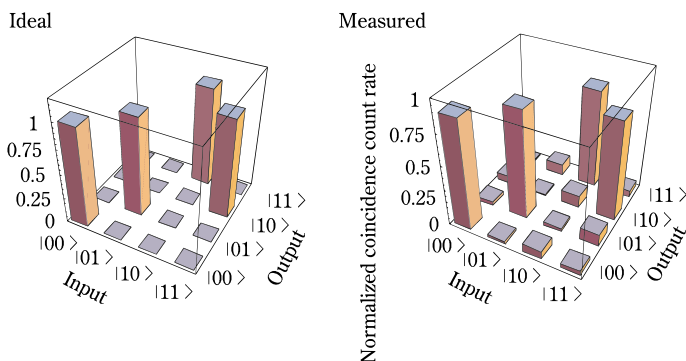


図4 線形光学素子による制御ノットゲートの実験結果<sup>22)</sup>。制御量子ビットを $|a\rangle$ 、標的量子ビットを $|b\rangle$ とし、それらを省略して $|ab\rangle$ と記載する。図4では、ある入力状態が与えられた場合に、特定の状態が出力される確率を棒グラフの高さで示している。理想的な制御ノットゲートは、入力が $|00\rangle$ および $|01\rangle$ の場合にはそのまま出力し、入力が $|10\rangle$ および $|11\rangle$ の際には、標的ビットを反転、すなわちそれぞれに対し $|11\rangle$ および $|10\rangle$ を出力する。左側は、この理想的な場合を表し、右側のグラフが、実験結果である。

案では、量子テレポーテーションにおいて、二つの光子間の量子相関を判定する「ベル測定」を高い確率で行うために、多くの光子源や検出器、光学素子を必要とする<sup>24)</sup>。その数は後に述べる誤り耐性をもつ量子計算を行うためには、数万個にも達すると考えられる。これを回避するには、確率1でベル測定を行える素子や、2光子状態だけを検出し取り除く素子が非常に有効だ。それらがあれば、必要な素子の数は数万から数個に減り、実現に大きく近づく。今後の研究が期待される。

まとめると、線形光学素子を用いた方法は、すでに2光子間制御ノットがある程度の忠実度で実現されるなど著しい進展を見せている。また、その成功確率を増大し、比例性と拡張性をもった量子コンピューターを構築できることも理論的には示されている。しかし、その成功確率を増大させる部分を実際に実現するには、さらなるブレイクスルーが必要である。

### 3.3 単一原子の非線形性を用いた量子ゲート

もう一つのアプローチは、単一原子による巨大な非線形性を用いて、はじめから確率1でゲート操作を行おうとする考え方だ。そのさきがけとなったのは、カルフォルニア工科大学による、両側キャビティ中に閉じ込められた単一の二準位原子を用いた実験である<sup>25)</sup>。二準位原子は、光子を一つ吸収すると、同時にはそれ以上光子を吸収することができない。このため、光子が一つだけ存在する場合には、原子によって光子が吸収放出されることにより遅れが生じるが、光子が二つ存在する場合には遅れは生じない。

このカリフォルニア工科大学の実験では、得られた位相差の量は15度程度であった<sup>25)</sup>。しかし、量子計算のためには、できれば180度の位相シフトが望まれる。われわれは検討の結果、両側キャビティの一方を完全反射ミラーにした、片側キャビティを用いることによって、180度の位相シフトを達成できることを、半古典的な解析により見いだした<sup>26)</sup>。この位相緩和と位相シフト量の関係についても解析した結果、位相緩和時間が縦緩和時間よりも長いことが条件であることもわかった<sup>27)</sup>。

また、実際に光子に対して用いるには、1光子や2光子の波動関数が、その素子を通過した際にどのように変化するかを調べる必要がある。われわれは、その変化を一次元原子モデルを用いて全量子力学的に解析した<sup>28,29)</sup>。

図5に解析の一例を示す。左側は、入力に用いるガウス型2光子波動関数である。この素子に1光子波動関数を入射した場合、振幅がマイナスになる(反転する)<sup>28)</sup>ことから、線形動作をすれば出力振幅はマイナス×マイナスでプラスとして得られるはずである。しかし、出力部での2光子波動関数(右側)は、全域で振幅がマイナスになっており、線形時に予想される出力(プラス)に対して、180度の位相シフト(位相反転)が起きている。

さらなる解析の結果、ガウス型の光子波束を用いた場合、原子の縦緩和時間と同程度の時間幅の光子波束に対して最大78%の効率で、非線形位相シフト動作が行えることがわ

かった<sup>30)</sup>。ここで、効率が78%にとどまっているのは、図5の右側に見られるように、デバイスを通る際に光子波動関数に変形してしまうことが原因である。今後は、この変形を押さえる方法の探索が求められる。

#### 4. 量子誤り訂正符号とエラー耐性

以上、光子を用いた量子コンピューターを中心に、最近の量子コンピューターの現状を見てきた。その前提として、2節で「比例性」および「拡張性」が不可欠な要素であることに触れた。しかし、1000けたの数の因数分解といった大規模な量子計算を実行するには、もう一つ不可欠な要素がある。それが、エラー耐性 (fault tolerance) である。

その前に、現在のコンピューターがどのようにエラーに対処しているか少し考えよう。現在のコンピューターは、例えばビットの [0], [1] を電圧が0 V か5 V かで表している。ところが実際には、0 V から1 V までは[0], 2 V 以上は[1]とすることで、冗長度をもたせている。このため、処理の最中にわずかなノイズが混入したとしても、ゲート操作のたびに、そのエラーは修正され、蓄積されることがない。つまり、エラーに対する耐性が自動的に組み込まれていることになる。これが、現在デジタル技術がわが世の春を謳歌している理由だ。

しかし、量子ビットの場合、事情は完全に異なる。量子アルゴリズム中では、状態 $|0\rangle$ , 状態 $|1\rangle$ の位相や振幅をアナログ的に足し引きしている。つまり、処理の最中にわずかなノイズが混入した場合、それはゲート操作ごとに除去されることなく、蓄積されてゆくことになる。

この問題は、量子コンピューターの最大の問題点としていち早く指摘され、その実現に対して懐疑的な指摘もあった。しかし、今では「量子誤り訂正符号」という考え方によりこの問題は解決できると考えられている。

エラーを訂正するには、冗長度をもたせなければならない。そのために、量子誤り訂正符号では複数個の量子ビットを用いて、一つの論理的な量子ビットを表現する。例えば、量子ビットを3個用い、それらがすべて $|0\rangle$ の状態を論理量子ビットの $|0\rangle$ 、それらがすべて $|1\rangle$ の状態を論理量子ビットの $|1\rangle$ とするのだ。こうすることで、その一つ一つの論理ビットにわずかな誤りが混入したとしても、誤り訂正量子回路という回路によってその誤りの有無や性質を検出し、適切な補正を施すことができる。つまり、デジタルコンピューターでは電圧のしきい値によって実現されていた誤り耐性を、複数の量子ビットという別な冗長性によって実現できる。

では、このような誤り訂正符号を実装した場合、いったいどの程度の誤り率まで許容されるのだろうか。現在、その限界値はおおよそ $10^{-3}\sim 10^{-5}$ と考えられている<sup>31)</sup>。この誤りには、ゲート操作の誤差によるエラーや、ゲート操作とその前後に生じるデコヒーレンスに由来するエラーが含まれる。つまり、それらを併せた値が、 $10^{-3}\sim 10^{-5}$ になればよいということである。ただ、何重にも入れ子状に誤り訂

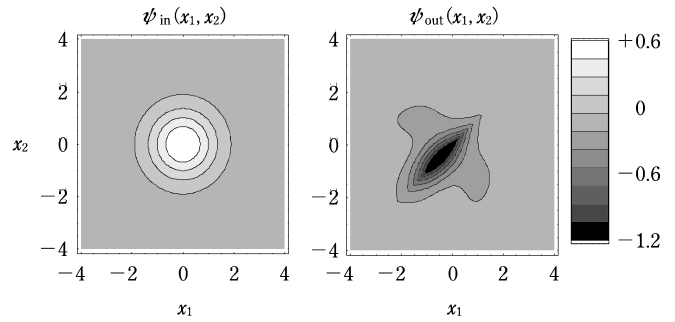


図5 単一原子非線形性を利用した量子位相ゲートの解析結果<sup>30)</sup>。左側：入力に用いるガウス型2光子波動関数。 $x_1, x_2$ は二つの光子の位置で、単位は $1/\Gamma$  ( $\Gamma$ は原子の緩和時間)。この素子に1光子波動関数を入射した場合、振幅が反転する<sup>28)</sup>ことから、線形動作をすれば出力振幅はプラスとして得られるはずである。右側：出力部での2光子波動関数。解析結果は全域で振幅がマイナスになっており、180度の位相シフト(位相反転)が起こっている。

正符号を用いた場合の極限值であり、実際の実装では $10^{-6}$ またはより小さな値が必要になるという指摘もある<sup>32)</sup>。

この $10^{-6}$ という値は大きな困難さを突きつけてくる。まず、1量子ビットに関するゲートについて見てみよう。光子の偏光は、その制御性の良さが量子ビットとしての特徴であるが、最も優秀な偏光子であるグラントムソンプリズムの消光比(エラー率に相当)でも $10^{-6}$ 程度である。次に、2量子ビット間の量子ゲートについてみると、現在の実験技術でのゲートにおけるエラーの値は、イオントラップ、光量子ゲート、超伝導量子ビットで $10^{-1}\sim 10^{-2}$ と、 $10^{-6}$ には遠く及ばない。

この誤り確率について原理的な制限はないのだろうか。この問題について東北大学の小澤は、不確定性原理から得られる最小の誤り確率について導出した<sup>33)</sup>。その論文をもとに、イオントラップ中のイオンの電子状態を光パルスによって制御する場合を検討してみよう。小澤によると、光パルス内の平均光子数を $\langle N \rangle$ とした場合、誤り率の下限は $1/16\langle N \rangle$ で与えられる<sup>33)</sup>。 $10^{-6}$ のエラー率を得るには、光子数にして $10^5$ 個程度、つまり約0.1 pJ程度のパルスレーザーを用いる必要があることになり、実際の実験条件においても無視できない値になってくる。

#### 5. おすび

実用的な量子コンピューターは、比例性、拡張性、およびエラー耐性の三つを兼ね備えなければならないと考えられている。一方、現在までに行われた実験の中で、比例性と拡張性を満たした形で実験が行われたのは、最近のイオントラップによる実験のみと思われる。さらに、エラー耐性に必要な、 $10^{-4}\sim 10^{-6}$ という誤差(デコヒーレンスを含む)での1量子ビット、および2量子ビット間ゲート操作を実現するのは、現状の誤差からはまだまだ先のことだろう。これが、冒頭に触れた「ギャップ」の正体である。

だからといって、量子コンピューターの実現が将来にわ

たつて不可能とは筆者は考えない。イオントラップ以外の方式も、比例性と拡張性、そしてエラー耐性を満たすべく努力が続けられるだろう。現在のビットが、電子、磁気、光など実にさまざまな担体によって担われている<sup>8)</sup>ことをかんがみても、量子ビットの担体としてイオン、原子、量子ドット、超伝導素子、光子などが並行して研究されていることは重要である。また、これら三つの条件を満たす、まったく新たな方式の提案も期待される。

最後に、本稿を執筆するにあたり議論いただいた研究室の笹木敬司教授、堀田純一助手、ならびに資料準備を手伝ってくれた岡本亮君に感謝します。また、CREST「結晶ネットワーク量子コンピューター」(北川勝浩代表)内のチームミーティングでの議論、ならびに Chuang 博士との議論に示唆を受けました<sup>34)</sup>。また、紹介したわれわれの研究の共同研究者各位、ならびに JST-さきがけ、JST-CREST、総務省 SCOPE、ならびに文部科学省 21 世紀 COE の支援に感謝します。

## 文 献

- 1) L. M. K. Vandersypen, M. Steffen, G. Breyta, C. S. Yannoni, M. H. Sherwood and I. L. Chuang : *Nature* **414**, 883 (2001).
- 2) J. Chiaverini, D. Leibfried, T. Schaetz, M. D. Barrett, R. B. Blakestad, J. Britton, W. M. Itano, J. D. Jost, E. Knill, C. Langer, R. Ozeri and D. J. Wineland : *Nature* **432**, 602 (2004).
- 3) J. L. O'Brien, G. J. Pryde, A. G. White, T. C. Ralph and D. Branning : *Nature* **426**, 264 (2003).
- 4) K. Sanaka, T. Jennewein, J. W. Pan, K. Resch and A. Zeilinger : *Phys. Rev. Lett.* **92**, 017902 (2004).
- 5) P. Walther, K. J. Resch, T. Rudolph, E. Schenck, H. Weinfurter, V. Vedral, M. Aspelmeyer and A. Zeilinger : *Nature* **434**, 169 (2005).
- 6) 竹内繁樹, 井須俊郎 : *応用物理* **68**, 1038 (1999).
- 7) 竹内繁樹 : *日本物理学会誌* **54**, 264 (1999).
- 8) 竹内繁樹 : 量子コンピュータ (講談社ブルーバックス, 2005).
- 9) 細谷暁夫 : 量子コンピュータの基礎 (サイエンス社 臨時別冊数理科学 SGC ライブラリ).
- 10) Scalable という用語が、本稿での拡張性や、エラー耐性を有している意味で使われる場合もある。
- 11) S. Takeuchi : *Phys. Rev. A* **61**, 052302 (2000) ; S. Takeuchi : *Phys. Rev. A* **62**, 032301 (2000).
- 12) J. I. Cirac and P. Zoller : *Phys. Rev. Lett.*, **74**, 4091 (1995).
- 13) M. D. Barrett, J. Chiaverini, T. Schaetz, J. Britton, W. M. Itano, J. D. Jost, E. Knill, C. Langer, D. Leibfried, R. B. Blakestad, R. Ozeri and D. J. Wineland : *Nature* **429**, 737 (2004).
- 14) T. Yamamoto, Yu. A. Pashkin, O. Astafiev, Y. Nakamura and J. S. Tsai : *Nature* **425**, 941 (2003).
- 15) R. McDermott, R. W. Simmonds, Matthias Steffen, K. B. Cooper, K. Cicak, K. D. Osborn, S. Oh, D. P. Pappas and J. M. Martinis : *Science* **307**, 1299 (2005).
- 16) この記述に従えば、いくら高い  $P$  を準備したとしても、 $N$  に対して成功確率は指数的に小さくなり、比例性が成り立たない。しかし 4 節で述べる量子誤り訂正の手法を応用すると、 $P$  があるしきい値以上であれば比例性を成り立たせることができる。
- 17) S. Takeuchi, R. Okamoto and K. Sasaki : *Appl. Opt.* **43**, 5708 (2004).
- 18) R. Okamoto, S. Takeuchi and K. Sasaki : *J. Opt. Soc. B*, 投稿中.
- 19) M. Pelton, C. Santori, J. Vuckovic, B. Zhang, G. S. Solomon, J. Plant and Y. Yamamoto : *Phys. Rev. Lett.* **89**, 233602 (2002).
- 20) H. F. Hofmann and S. Takeuchi : *Phys. Rev. A* **66**, 024308 (2002).
- 21) 竹内繁樹 : *応用物理* **71**, 1367 (2002).
- 22) R. Okamoto, S. Takeuchi and K. Sasaki : submitted to CLEO-PR/IQEC 2005 ; R. Okamoto, H. F. Hofmann, S. Takeuchi and K. Sasaki : q-ph/0506263.
- 23) E. Knill, R. Laflamme and G. Milburn : *Nature* **409**, 46 (2001).
- 24) 単独のビームスプリッターを用いた場合、ベル測定は確率 0.5 でしか行えない。しかし、余分に  $N$  個のアンシラ光子を用いることで、ベル測定の失敗確率を  $1/(N+2)$  に押さえることができる。文献 23, 解説 21 参照。
- 25) Q. A. Turchette, C. J. Hood, W. Lange, H. Mabuchi and H. J. Kimble : *Phys. Rev. Lett.* **75**, 4710 (1995).
- 26) H. F. Hofmann, K. Kojima, S. Takeuchi and K. Sasaki : *J. Opt. B : Quantum and semiclassical optics* **5**, 218 (2003).
- 27) H. Oka, H. F. Hofmann, S. Takeuchi and K. Sasaki : *Jpn. J. Appl. Phys.* **43**, 6138 (2004).
- 28) K. Kojima, H. F. Hofmann, S. Takeuchi and K. Sasaki : *Phys. Rev. A* **68**, 013803 (2003).
- 29) H. F. Hofmann, K. Kojima, S. Takeuchi and K. Sasaki : *Phys. Rev. A* **68**, 043813 (2003).
- 30) K. Kojima, H. F. Hofmann, S. Takeuchi and K. Sasaki : *Phys. Rev. A* **70**, 013810 (2004).
- 31) A. M. Steane : *Phys. Rev. A* **68**, 042322 (2003). 他の同種研究のリファレンスも豊富に含まれている。
- 32) M. Oskin, F. T. Chong and I. L. Chuang : *IEEE Computer* **35**, 79 (2002).
- 33) M. Ozawa : *Phys. Rev. Lett.* **89**, 057902 (2002).
- 34) CREST 量子情報処理シンポジウム, 東京, 2004 年 12 月.  
(2005 年 4 月 12 日 受理)



たけうち しげき  
竹内 繁樹

1993 年京都大学大学院理学研究科物理学第一専攻修士課程修了。同年、三菱電機中央研究所入社。99 年北海道大学電子科学研究所講師, 00 年同助教授, 現在に至る。95 年から 01 年まで, 科学技術振興事業団さきがけ研究「場と反応」, 01 年から 05 年「光と制御」に所属。光子を用いた量子情報通信・処理の研究に従事。博士 (理学)。