

量子計算の実現に向けて

「場と反応」領域 竹内 繁樹

1. 研究の背景

電子を一つだけ入れた箱があるときに、その箱の中央に仕切りを入れて左右の小部屋にわける場合を考えよう。古典力学的に考えると、その電子は右の部屋にあるか、左の部屋にあるかのどちらかであり、両方の部屋に同時に存在する状態は考えられない。しかし量子力学では、電子は左側の部屋に存在する状態と、右側の部屋に存在する状態の「重ね合わせ」で表され、両方の状態を一度に取る事が許される。現在用いられているデジタル計算機では、その基本となるビットは「0」または「1」のどちらかの値を必ず取る。その意味では、現在の計算機は古典力学に基づく「古典的な計算機」と言える。では、「0」と「1」の重ね合わせ状態を取ることができる計算機があれば、どのような計算が可能になるのだろうか？ Deutsch はこのような原理に基づく「量子計算機」の概念を、1985年に提案した。

当初は、「量子計算機は今の計算機にできることはできる」という提案で今一つの感があったが、1992年に Deutsch と Jozsa による「現在の計算機より本質的に早い計算が可能になる量子計算アルゴリズム」の提案、そして1994年の Shor による因数分解の量子計算アルゴリズムの発見によって一躍脚光を浴びることになる。そのアルゴリズムを用いれば、これまで桁数の増大とともに指数関数的に増大する計算時間がかかっていたものが、桁数にせいぜい比例する程度の時間で行うことができる。これは、「現在のコンピュータより100倍早い」といった改善ではなく、もっと本質的（計算量的）に「効率がよい」ことを意味する。実は、現在インターネットのセキュリティシステムは、「桁数の多い数の因数分解が難しい」ことを利用しているので、これが簡単にとけてしまうことは大事件なのである。

1985年の Deutsch による提案の当時、すでに超伝導トンネル接合素子など、量子力学的効果を用いた素子が現れていた。それらの素子は、古典的な計算機をより高速にすることを目指して、量子力学の効果を利用したものであった。量子計算の提案がなされた背景には、将来その延長として量子状態を自由に制御できるかもしれない、という期待感があった事があげられる。その後の現在に至る10数年の量子工学、量子光学の分野の進展により、今では原子や光子の量子状態そのものを制御する技術が得られつつある。このような技術的環境が、量子計算が現在注目されているもう一つの理由である。

では、「量子計算機」を作ることはできるのだろうか？ Shor の因数分解アルゴリズムの発見以降、実際に量子計算機を実現する手段の探索が始まった。そして、現在のコンピュータの情報単位である「ビット」と、基本ゲートである「ノットゲート」や「アンドゲート」に対応した概念として、「キュビット」とそれに対する「位相シフト」および「コントロールドノット」が発見された。キュビットは、 $|0\rangle$ 状態と $|1\rangle$ 状態の任意の重ねあわせをとる事ができ、一般には $|a\rangle = \sin(\theta/2)|0\rangle + \exp(i\alpha)\cos(\theta/2)|1\rangle$ と表される。計算に用いるレジスタは、キュビットの直積の和で書くことができる。また、位相シフトは、キュビットを任意の角度回転する操作であり、コントロールドノットは、2つのキュビット間で、一方のキュビットが $|1\rangle$ の時のみ他方のキュビットを反転させる操作である。複数のキュビットにこれら基本ゲートを組み合わせることで、任意の量子計算を行うことができる。つまり、これらのゲートを実現することができれば、量子計算機は実現可能である。

コントロールドノットの実現を目指した研究は、Shor の発見の直後から活発に行われており、単一量子を用いて、2-キュビット間のゲート操作なども実証されている。しかし、量子状態制御が大変困難で、単一量子を用いる方法では、アルゴリズムの実行とまではいっていない。量子計算に関しては、現在は理論的研究が先行している状態であるが、さらなる発展のためには実験とその結果に基づくフィードバックが求められているのが現状である。

2. 研究のねらい

この研究のねらいは、量子計算機を実現すること、つまり量子計算アルゴリズムの実行可能な物理系の構築とその動作検証である。コントロールドノット実現の困難さを回避しながら、実験的に量子計算のアルゴリズムを研究する方法はないだろうか？ その一つの方法として、筆者は線形光学素子を用いる方法を初めて提案した。

1つのキュビットとしては光子の偏光を用い、他のキュビットとしては、光子のモード(光路)を用いる(図1)。偏光に対する位相シフトは、偏光回転板を用いて、またモードに対する位相シフトは、ビームスプリッターを用いて行うことができる。次はコントロールドノットであるが、偏光とモードのコントロールドノットは、偏光ビームスプリッターによって実現可能である。問題になるのは、モードで表現されるキュビット間のコントロールドノットである。筆者は、2つのキュビットで張られる空間の基底に対応した数のモードを用意することにした。その場合、コントロールドノットは、単にモードを互いに交換するだけで実現可能になる。この方法では、N 個のキュビットに対して 2^N 個のモードが必要になるが、少数のキュビットで記述されたアルゴリズムを実験的に調べることは可能である。

さきがけ研究では、Deutsch と Jozsa によって提案されたアルゴリズムを実行可能なプロトタイプの構築をめざした。また、その過程で単一光子状態の量子状態制御、計測技術の開発を行った。

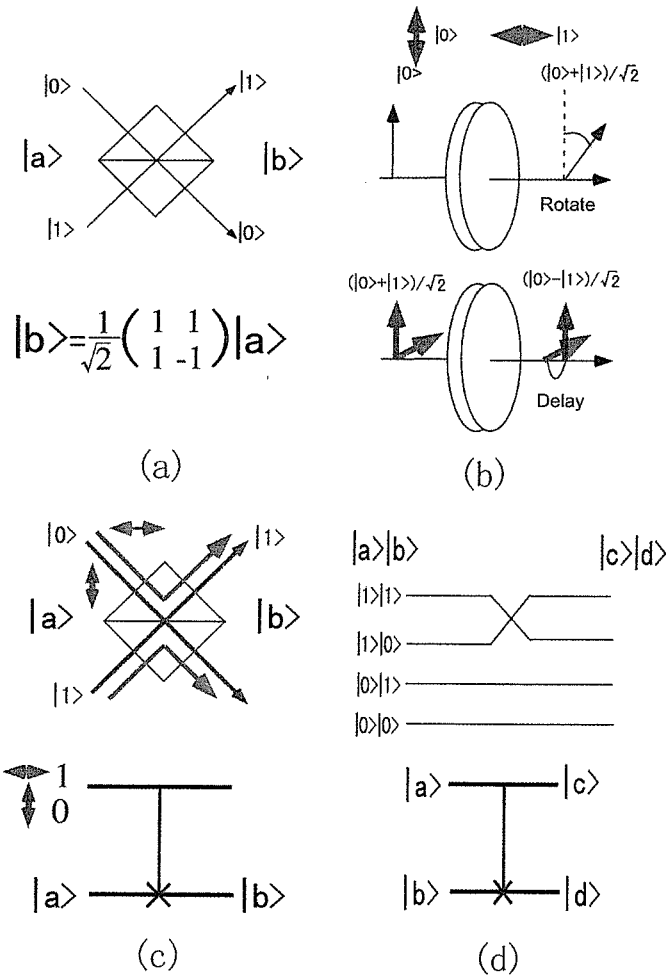


図1 (a) モードに対する位相シフト (b) 偏光に対する位相シフト (c) 偏光一モード間のコントロールドノット (d) モードモード間の疑似コントロールドノット

3. 研究方法と成果

3年間のさきがけでの研究の結果、Deutsch と Jozsa によって提案された量子計算アルゴリズムを、3qubit を用いるものについてプロトタイプを構築し、2qubit での動作検証に成功した。量子計算アルゴリズムの実験的な検証は、単一量子を用いるものとしては世界でも初めてのものになる。また、この構築の過程で、「Deutsch-Jozsa のアルゴリズムに対応した光学系」を提案しその動作の理論的な裏付けを行うとともに、構築に当たって重要な鍵となる「これまでに比べて非常に明るい、単一光子源」「世界最高の量子効率をもつ光子検出器」を開発した。以下、これらについて個別に紹介する。

3.1 Deutsch-Jozsa のアルゴリズムに対応した光学系

DeutschとJozsaは、「0」または「1」の列からなる外部からの入力、「すべて同じ数ではない」か、「同数個の 0,1 からなっていない」のどちらであるかを効率よく判定する量子計算アルゴリズムを考案した。図 2 に、今回の研究で考案した Deutsch-Jozsa のアルゴリズムに対応する光学系を示す。

パラメトリック蛍光によって発生時刻を特定した単一光子を、ポート A0 へと入射する。 Φ_0 から Φ_3 の位相制御部では、外部からの入力に応じて、そのモードに対する入力が「0」か「1」かによって、偏光を90度回転する操作が、また位相板によって、光子の偏向状態によって位相の制御が行われる。計算結果は、ポート B0 での光子の有無を観測することによって知ることができる。つまり、ポート B0 で光子を検出した場合は「同数個の 0,1 からなっていない」ことを、検出しなかった場合には「すべて同じ数ではない」ことが分かる。

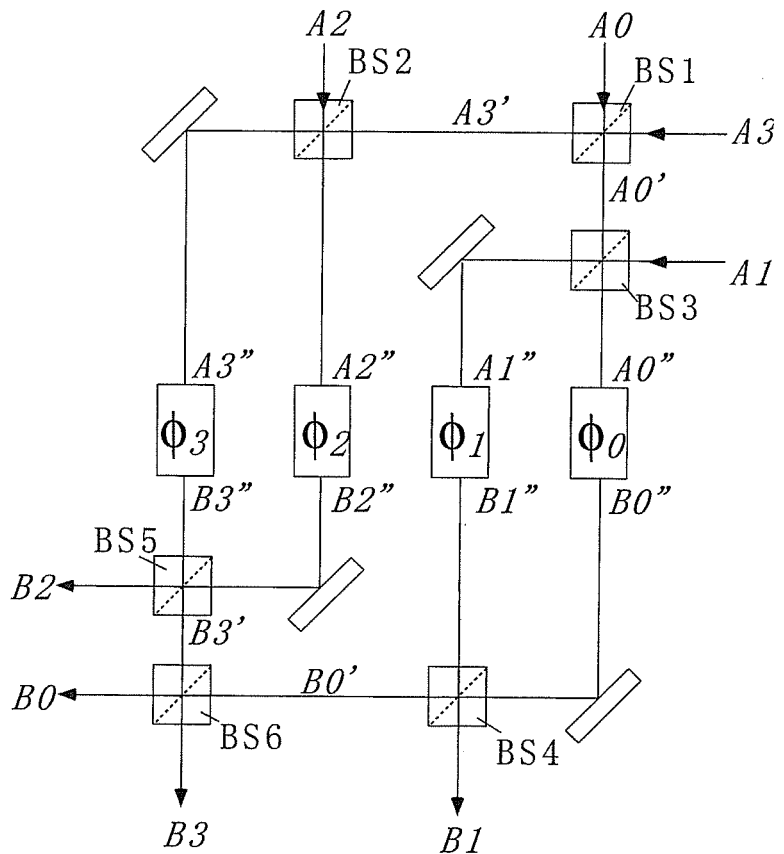


図 2. 4-bit 入力の Deutsch-Jozsa 量子計算アルゴリズムに対応した光学系

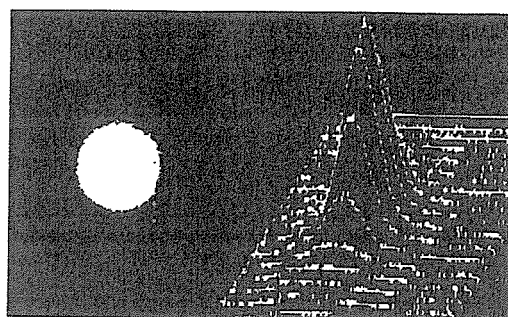
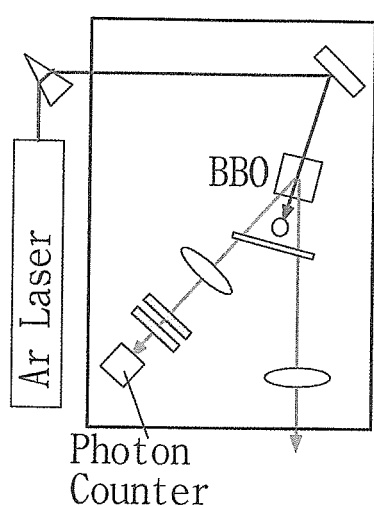
3.2 明るい単一光子源

実際の光子検出器は、光子が検出器に入射していない場合にも検出信号を出す場合があり、それは計算を誤らせる原因になる。しかし、計算に用いる光子がいつ入射したのかを特定できれば、その計算の結果である信号をノイズから分離することができる。

ある種の結晶に、エネルギーの大きい光子を入射すれば、その半分づつのエネルギーを持つ双子光子対へと分裂する（パラメトリック蛍光光子対）。双子光子対と表現したのは、それらの光子の発生時刻がほぼ等しく、その射出方向や偏光などにも量子力学的な強い相関を持つ

からである。このような光子対のうち一方の検出により、発生時刻を特定することができる。

今回、結晶の角度に工夫をすることで、これまでの方法に比べて明るく収束性の良い光子ビーム対を形成することに成功した（図3）。単位時間当たりの光子数が大きい（毎秒180万个@0.1W）ため、量子計算機の時間当たりの計算回数を大きく取る事ができる。



- Emission angle dispersion $< 0.8^\circ$
- High Efficiency
 1.8×10^6 CPS (@pump 0.1W)

図3 明るい単一光子源、写真はビーム形状

3.3 高量子効率検出器開発

高い量子効率をもち、時間分解能の高い（パルス幅の短い）光子検出器は、量子光学、量子情報通信の分野に大変有用である。例えば、提案している量子計算の時間当たりの計算回数を増大させることができる。同様に、量子情報通信では、時間当たりに送信できる情報量を増大させることができる。そのような応用面だけでなく、量子力学の基礎の分野においても、例えば量子力学の非局所性の完全な検証実験をするためには、最低 83% の量子効率が必要なことが知られている。

筆者は今回のさきがけ研究において、ERATO 山本量子揺らぎプロジェクトと共同研究を行い、 $88 \pm 5\%$ と、世界最高の量子効率をもつ光子検出器の開発に成功した。また、先に述べた明るい単一光子源を応用し、この検出器が、一度に複数個の光子が入射した場合に、その光子数を区別できることを定量的に検証した（図4）。この開発は、量子力学の非局所性の完全な検証実験への道を開いただけでなく、量子情報通信などの分野での技術革新をもたらすものである。

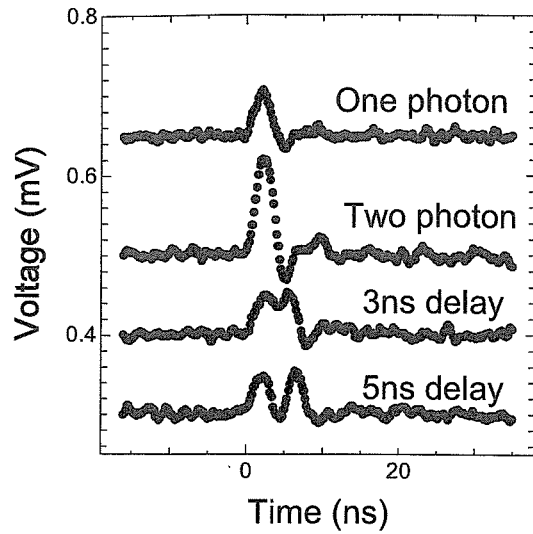
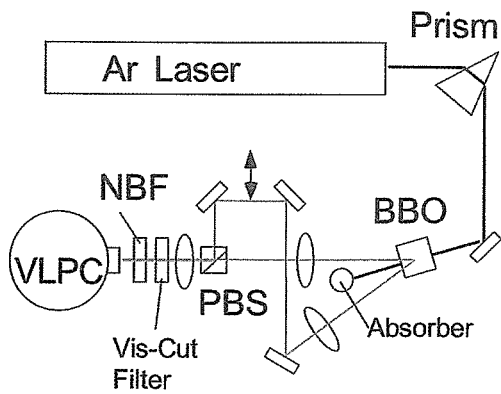


図4 (a) 高量子効率光子検出器 (VLPC) への2光子入射実験系
(b) 検出パルス列の、2光子の入射タイミング依存性

3.4 量子計算アルゴリズムの実現

以上のような開発を経て、我々は Deutsch と Jozsa によって提案されたアルゴリズムを実行可能なプロトタイプを、3-qubitに相当するものの構築を行い、その2-qubitでの動作検証に成功した。現在、3-qubitでの動作検証中である。実際の実験では光路の平行ずれの影響をなくすため、マイケルソン-モーリー型干渉計を採用している。干渉計は十数秒おきに、参照光の干渉結果を測定し、一定の干渉状態を保つよう安定化されている。図5は、微弱光を入力として用いていた場合の実験結果である。光子の検出結果によって、「両方の入力と同じではない場合 (10 または 01)」と「1と0の個数が異なる場合 (00 または 11)」を少ない誤り率 (2% 程度) で判定できていることが分かる。

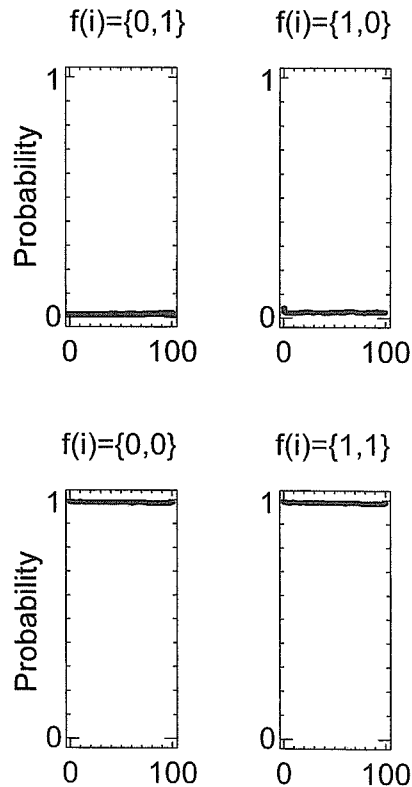


図5 2bit 入力の Deutsch-Jozsa アルゴリズムの実験結果。それぞれの外部入力を与えられた場合の、出力ポートでの光子の検出確率を示す。実験は、実験系の初期化後約15秒間隔で行った。横軸はその実験回数。

4. 今後の展望

今回の実験によって示されたように、線形光学素子を用いた実験によって、少数規模の量子計算を実現していく事は可能である。コントロールドノットを実現する他の方法が十分に開発されるまでの間、各種アルゴリズムの実験台の一つとして、線形光学素子を用いた量子計算機は用いられるだろう。量子計算機とアナログ計算機との類似点に注目すれば、画像情報処理やパターン認識といった分野での高速な処理などに、線形光学素子をもちいた量子計算機を応用可能かもしれない。

単一の光子の有無によって別の単一光子の位相を変化させることのできるような素子の開発も、今後の展開として興味深い。この線形光学素子を用いた量子計算の実験系に、そのような素子を組み込めれば、少数のモードを用いて大きなヒルベルト空間での量子計算が可能になる。このような素子の実現は、量子計算の実現という観点だけでなく、量子情報通信の観点からも大変興味深い。

また、量子力学を本質的に用いる新しい技術概念として、量子計算と並んで、量子暗号という考え方がある。これは、「未知の量子状態は、観測によってなんらかの破壊をうける」ということを用いて、通信路での盗聴を完全に防ぐ技術である。今回開発した明るい単一光子光源や、高量子効率光子検出器は、量子暗号通信にとってもキーデバイスであり、今後この分野への貢献も可能と考えている。

5. 謝辞

さきがけ研究に採用して頂いたおかげで、この一連の研究を実行することが叶いました。吉森先生はじめ、委員の先生方には心より感謝申し上げます。また、さきがけ研究期間中の、領域事務所の山内様、虫明様、新宮様はじめ、科学技術振興事業団の皆様のご協力に、この場をお借りして感謝申し上げます。また、ERATO 山本量子揺らぎプロジェクトの山本喜久教授に、スタンフォード滞在研究中的ご厚意に対し感謝申し上げます。最後に井須様はじめ、三菱電機の関係各位のご協力に感謝申し上げます。

さきがけは、アイデアを持つ個人研究者にとって理想的な制度です。今後も、志ある個人研究者によってこの制度がますます活用されますよう切に希望します。

6. 発表リスト

1. Shigeki Takeuchi, Proceedings of FOURTH WORKSHOP ON PHYSICS AND COMPUTATION: PhysComp96, 1996 (to be appeared in Physica D)
2. Shigeki Takeuchi, Jungsang Kim, Yoshihisa Yamamoto, and Henry H. Hogue, 'Development of a High-Quantum-Efficiency Single-Photon Counting System', submitted to Applied Physics Letters
3. Jungsang Kim, Shigeki Takeuchi, Yoshihisa Yamamoto, and Henry H. Hogue, 'Multi-photon Counting using Visible Light Photon Counter', submitted to Applied Physics Letters
4. 竹内 繁樹, 「量子計算の実験」数理科学 10月号 p36 (1998)
5. 竹内 繁樹, 「線形光学素子を用いた、量子計算アルゴリズムの実現」電子情報通信学会論文誌A 12月号(1998)