時間領域多重一方向量子計算モデルを用いた光量子コンピューター

1.　はじめに

　次世代のコンピューターとして、量子コンピューターが研究されています。しかし、量子コンピューターと一口に言っても、用いる物理系によって実現の仕方が大きく異なります。イオン（原子）やスピンあるいは人工原子と呼ばれる量子ドットや超伝導の系では、量子ビットが空間に静止しており「静止量子ビット」と呼ばれています。そして、後で述べる量子回路モデルで量子コンピューターをつくるのが一般的です。一方、光子は光速で飛行しているため「飛行量子ビット」と呼ばれ、その扱いは静止量子ビットとは大きく異なります。そして、これも後で述べる一方向量子計算モデルを用いて量子コンピューターをつくることが一般的です。また、処理の仕方も大きく分けて 2 種類あり、主に量子の粒子性に着目したデジタル的な処理（離散量処理）と、主に量子の波動性に着目したアナログ的な処理（連続量処理）が存在します。つまり、量子コンピューターと一口に言っても、量子回路モデル vs 一方向量子計算モデル、離散量処理 vs 連続量処理の$2\times2=4$通りの実現の仕方、さらにはその複合があることになります。しかし、一般の非専門家は、離散量処理の量子回路モデルのみが量子コンピューターだと思っているのが実情だと思います。本稿の狙いは、それよりもずっと良い方法があるのを示すことです。

2.　量子回路モデル

2.1　静止量子ビットと量子回路モデル

　静止量子ビットの処理には主に量子回路モデルが用いられます。これは図 1 のように量子ゲートと呼ばれる、ある種の論理ゲートにより構成されます。ただし、静止量子ビットの場合、通常の電気回路とは異なり量子回路に沿って量子が流れていくわけではなく、量子ビットやそれらの間の相互作用を量子回路に示した順番で外からコントロールします。つまり、静止量子ビットを用いた場合、量子回路は実在の回路ではなく、コントロールの順番を書いた「楽

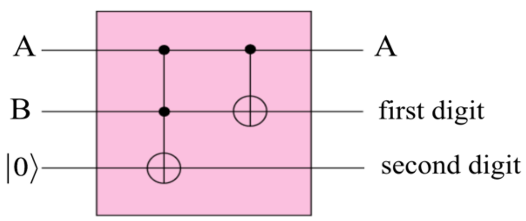

図 1　量子回路モデル（半加算器）
A、B、$|0\rangle$はそれぞれ入力された量子ビット。

譜」のようなものとなります。このコントロールにより、静止量子ビット群の状態が計算のステップに応じて変化し、それが量子計算になっています。この方法の利点は、複雑な計算をしても量子コンピューター自身の物理的サイズに変化はないこと、および、行う計算によって物理的に量子ゲートの配置を変える必要がないことです。物理的な量子ゲートは存在しないので「楽譜」を書き換えるだけになります。つまり、静止量子ビットと量子回路モデルの組み合わせでは、量子計算のプログラムが可能となります。静止量子ビットを扱う上で、とても理にかなった方法と言えます。

2.2　飛行量子ビットと量子回路モデルおよび光子に拘る理由

一方、飛行量子ビットである光子を用いた場合、量子回路モデルはあまり良い方法とは言えません。なぜなら、飛行量子ビットは実際に量子回路に沿って移動していくので、物理的な量子回路が必要になります。そのため、複雑な計算をしようとすると量子回路が複雑で大規模にならざるを得ません。また、量子回路は物理的に存在するわけで、この量子回路は別の計算には使えません。つまり、プログラムが不可能なのです。ここまで書くと、「飛行量子ビットは使えないじゃん」と思うことでしょう。しかし案外そうでもないのです。逆に、これらの問題を解決できれば、形勢は一気に逆転するのです。その「逆転満塁ホームラン」のための方策が、現在我々が開発している、時間領域多重一方向量子計算なのです。これについては後で説明しようと思いますが、その前に何でこんなに手の掛かる飛行量子ビット、つまり光子を量子情報のキャリアとして用いたいのか説明します。それは、

i. 室温でも量子ビットが存在でき、室温で量子計算が可能
ii. 飛行量子ビットを量子通信にそのまま使える
iii. 光子は完全に均一で、量子ビット間のクロストークが全くないため、大量の量子ビットを扱うことができる
iv. 時間領域多重によりスペースを取らず大規模化が可能
v. 時間領域多重により無制限に量子計算を続けられる（量子ビットの寿命の問題なし）
vi. 一方向量子計算なのでプログラム可能
vii. 量子コンピューターのクロック周波数を 100GHz 以上にできる

からです。もしこのような量子コンピューターが実現できれば、世界は変わる

と思っています。それでは、我々が開発している、時間領域多重一方向量子計算モデルによる光量子コンピューターについて説明しようと思います。

3. 一方向量子計算モデル

3.1 一方向量子計算（離散量処理の場合）

まず、一方向量子計算モデルについて説明します。話を簡単にするため、離散量処理の場合を説明します。一方向量子計算では、最初に大規模量子もつれ状態であるクラスター状態をつくります。クラスター状態とは、$|+\rangle = (|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2}$（0 と 1 の重ね合わせ）の状態にある量子ビットの 2 次元量子もつれ状態のことです（図 2）。これはあらゆる量子状態の重ね合わせ、あるいはあらゆる量子計算パターンの重ね合わせと考えることができます。そもそも量子計算とは、予め答えとなり得るあらゆる状態の重ね合わせを量子コンピューター内で生成し、量子力学的な干渉や測定による波束の収縮を用いて答えを浮かび上がらせるものですから、クラスター状態とは量子コンピューターそのものと言っても良いのかもしれません。

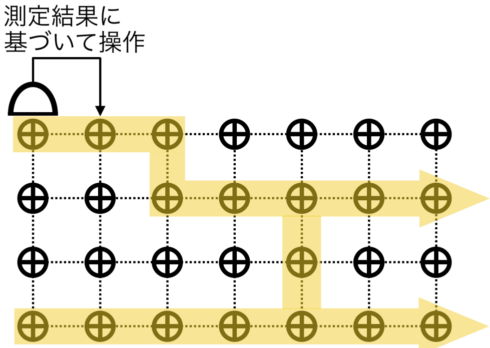

図 2　一方向量子計算モデル

$\oplus$は$|+\rangle = (|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2}$の状態にある量子ビット、破線は量子もつれを表す。

次に何らかの方法により、クラスター状態の左端にある量子ビットのいくつかを量子計算の入力状態にします（これには量子テレポーテーションが使えます）。図 2 では左端の黄色になっている 2 量子ビットが入力です。そして左から右へ（あるいは上下へ）行いたい量子計算にしたがった経路・測定方法で量子ビットを測定していきます。隣接量子ビット間はもつれているので、片方の測定の影響が測定されていない隣の量子ビットに及びます。それにより隣の量子ビットをコントロールすることになります。ただし、測定結果は 0 か 1 かがランダムに出てくるので、0 の場合は何もしない、1 の場合は隣の量子ビットをビットフリップさせます（$|0\rangle$は$|1\rangle$にし、$|1\rangle$は$|0\rangle$にする）。これを繰り返していくことにより任意の 1 量子ビット計算が可能となります。また、元々上下方向にももつれているため、任意の 2 量子ビット計算も可能です。もちろん、大規模なクラスター状態であれば大規模な量子計算ができます。

もう少し具体的に説明します（非専門家はこの段落を読み飛ばしていただい

て構いません)。量子計算に必要のない量子ビットには 0 か 1 かを明らかにする測定をします。これにより重ね合わせの状態ではなくなるので、量子もつれ状態から切り離されます。そして測定結果が 0 の場合は何もしない、1 の場合は隣接する量子ビットをすべてビットフリップさせます。一方、量子計算を行う量子ビットには、行いたい量子計算 D（$D = e^{-i\alpha Z/2}$：ブロッホ球の z 軸回りのα回転、Z：位相フリップ、つまり$|0\rangle$は$|0\rangle$のまま、$|1\rangle$は$-|1\rangle$にする）に応じて$D^{\dagger}|+\rangle$か$D^{\dagger}|-\rangle$（$|-\rangle = (|0\rangle - |1\rangle)/\sqrt{2}$）を明らかにする測定を行います。測定結果が$D^{\dagger}|+\rangle$であれば何もしない、$D^{\dagger}|-\rangle$であれば隣の量子ビットをビットフリップさせます。これを続けていくことによりどんな量子計算も可能となります。このユニバーサリティーに関する簡単な説明ですが、$D^{\dagger}|+\rangle$か$D^{\dagger}|-\rangle$を明らかにする測定およびその測定結果に基づいたビットフリップは、もつれている隣の量子ビットにHD（Hはアダマール変換）を施したことと等価です。$X = HZH$（X：ビットフリップ）の関係を用いると、1 番目の$D^{\dagger}|+\rangle$か$D^{\dagger}|-\rangle$を明らかにする測定およびその測定結果に基づいたビットフリップはブロッホ球の z 軸回りのα回転、2 番目のそれはブロッホ球の x 軸回りのα′回転を施していることになります。したがって、2 軸で任意の角度でブロッホ球内の回転ができることになり、任意の 1 量子ビット量子計算ができることになります。もちろん、上下方向は元々もつれているので、複数量子ビットがもつれたかたちで任意の量子計算ができることになります。

3.2　一方向量子計算と量子テレポーテーション

以上が一方向量子計算に関する簡単な説明です。一方向量子計算と呼ばれる理由は、量子計算するのに測定が必要であり、それが不可逆だからです。また、一方向量子計算は連続的に隣の量子ビットに量子テレポーテーションを繰り返すことと等価です。量子テレポーテーションとは、量子もつれ状態にある 2 つの量子を送信者と受信者でそれぞれ 1 つずつ持ち、送信者側の測定結果に基づいて受信者側の量子に操作を施すことですが、一方向量子計算は正にこのかたちになっています。唯一違うのは、量子テレポーテーションが入力と同じ状態を再現するのに対し、一方向量子計算では当然のことながら入力とは異なった状態（量子計算結果）が出力されます。これは量子テレポーテーションを恒等操作 I と考えれば理解できます。つまり、量子テレポーテーションは一方向量子計算において、$|+\rangle$か$|-\rangle$を明らかにする測定およびその測定結果に基づいたビッ

トフリップと考えることができます。逆に、一方向量子計算を一般化された量子テレポーテーションネットワークと考えることもできます。したがって、一方向量子計算を実現するためには、大規模クラスター状態を生成すること、および、それを用いた一般化量子テレポーテーションの実現（量子計算を行うのに必要十分な測定法の実現）が求められます。

3.3　一方向量子計算（連続量処理の場合）と時間領域多重

大規模クラスター状態を離散量処理、つまり量子の粒子性に着目した処理で生成することは極めて難しいと考えられています。そうするとこれで話が終わってしまうように思いますが、我々は連続量処理、つまり量子の波動性に着目した処理を用いて、それを可能にする方法を開発しました。さらに、時間領域多重という手法も開発し、空間的に量子ビットを並べる代わりに量子パルス（波束、もちろん光速で移動）として時間的に並べることに成功しました。この方法を用いると空間的な大きさは一定で、無限の大きさのクラスター状態を生成できます。とても画期的な方法です。以下、これについて説明します。

まず連続量処理ですが、これは波動関数の時間発展の振幅と位相、光の場合は光電場の振幅と位相に情報をコードし処理することです。振幅と位相はいずれも連続的に値が変化する物理量なので、連続量処理と呼ばれます。ただし、現在のコンピューターでも連続的に変化する電圧に閾値を設けて離散化（デジタル化）しているわけですから、物理的に考えるとあまり変わらないかもしれません。量子計算における連続量処理においても、情報を光子にコードすれば、情報を離散化できます。この場合は、神様が離散化の閾値を与えてくれていると言えるのかもしれません（光子1個の大きさに相当する振幅値で離散化していると言えなくもありません）。ちなみに、離散的に（デジタル的に）コードされた量子情報に連続量処理を行うことを、我々はハイブリッド量子情報処理と呼んでいます。図 3 はその例で、量子ビットを光の振幅と位相にコードしています。ここでは、0 光子$|0\rangle$と 1 光子$|1\rangle$により量子ビットを構成しています。また、連続量処理では振幅はいくらでも

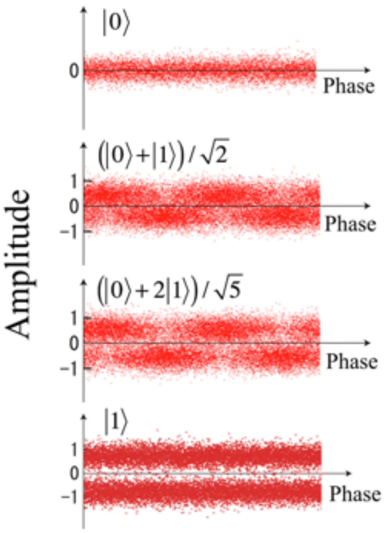

図 3　連続量処理の例

大きくできるので、多数光子を一括で処理できる利点もあります。

次に、我々が開発した時間領域多重による大規模連続量クラスター状態について説明します。連続量処理のためのクラスター状態は、図 2 のものとは少し異なります。図 2 のクラスター状態が$|+\rangle = (|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2}$の状態にある量子ビットの 2 次元量子もつれ状態だったのに対し、連続量クラスター状態の場合、$|\tilde{+}\rangle \propto \int_{-\infty}^{+\infty} dx\, |x\rangle$（$x$：連続量＝振幅）の状態にある量子パルス（波束）の 2 次元量子もつれ状態となります。つまり、図 2 の$|+\rangle$が$|\tilde{+}\rangle$に置き換わったものが連続量クラスター状態となります。$|+\rangle = (|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2}$が 1 ビットのすべての場合の重ね合わせだったのに対し、$|\tilde{+}\rangle \propto \int_{-\infty}^{+\infty} dx\, |x\rangle$は 1 つの量子パルス（波束）の取り得る振幅値のすべての重ね合わせということになります。いずれにしても、クラスター状態は、あらゆる量子状態の重ね合わせ、あるいはあらゆる量子計算パターンの重ね合わせと考えることができます。

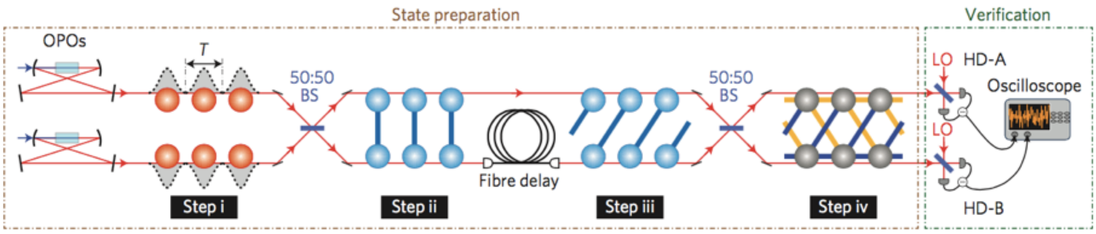

図 4　2 本の連続波スクイーズド光を用いて時間無制限大規模 1 次元連続量クラスター状態を生成。2 つの光パラメトリック発振器(OPO)から連続波スクイーズド光を発生している。

我々は時間領域多重により、$|\tilde{+}\rangle \propto \int_{-\infty}^{+\infty} dx\, |x\rangle$が 1 次元鎖状にエンタングルした大規模 1 次元連続量クラスター状態の生成に成功しました（S. Yokoyama et al., Nature Photonics 7, 982 (2013), J. Yoshikawa et al., arXiv:1606.06688, APL Photonics accepted)。この実験では、図 4 に示すように、2 本のスクイーズド光（$|\tilde{+}\rangle \propto \int_{-\infty}^{+\infty} dx\, |x\rangle$の近似状態）と 2 枚のビームスプリッターおよび光ファイバーによる光学遅延により、100 万パルス（量子波束）からなる大規模 1 次元連続量クラスター状態の生成に成功しました。ここで、スクイーズド光そのものは連続波として生成していますが、時間的に局在した光パルス（量子波束）の連続と捉え直しています。こうすることの利点は、$|\tilde{+}\rangle \propto \int_{-\infty}^{+\infty} dx\, |x\rangle$の状態にある光パルスが連続的に次々と生成されることになり、「抜け」なくクラスター状態の「頂点」を埋めることができるからです。また、光パルスそのものはレーザーのコヒーレンス時間内に測定されてしまうので、量子計算そのものは時間

無制限で続けることができます。実際、我々の実験が 100 万パルスで「打ち止め」だったのは、単に 100 万パルスで測定結果を保存しておくメモリーが一杯になったためです。100 万パルスでレーザーのコヒーレンス時間の 100 倍近くになっていますので、時間無制限で量子計算を続けられることがこれで示せたと思っています。そして、このクラスター状態を用いれば、図 5 のように一方向量子計算を用いて 1 量子ビット量子計算を無制限に続けることが可能です（図 6 はその解釈です）。言葉を換えると、量子計算の長さに拘わらず装置の大きさは一定となります。また、測定の仕方を変えることによりどんな 1 量子ビット量子計算でも行うことができます。つまり、プログラム可能です。したがって、時間領域多重一方向量子計算を用いることにより、飛行量子ビットと量子回路モデルの組み合わせの場合にあった、計算規模と共に装置が大規模になっていく問題と、プログラム不可能という大問題を解決したことになります。また、図 5 は以下のようにも解釈できます。検出器の直前にある光パルス（量子波束）から 2 つ目のビームスプリッターの直前にある隣の光パルスまで、量子テレポーテーションを繰り返していると考えられます。もちろん、測定の仕方を行いたい量子計算に応じて適宜変えているので、その量子テレポーテーションの出力は適宜変化することになります。この方法論は 2 次元に拡張することができるので、2 次元大規模連続量クラスター状態生成およびそれを用いた一方向量子計算の研究が進められています。

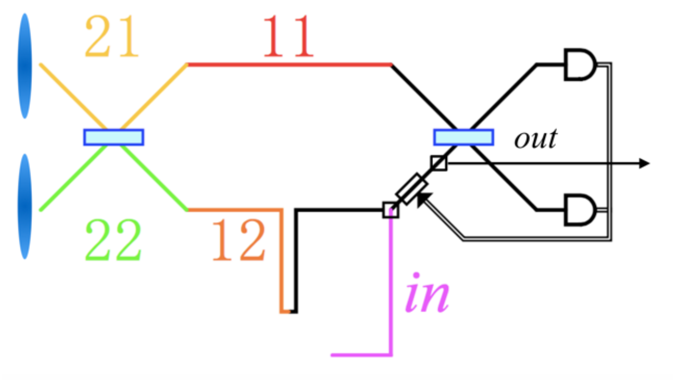

図 5　時間無制限超大規模 1 次元クラスター状態を用いた量子計算。□は光スイッチであり、入出力のときだけオンになる。

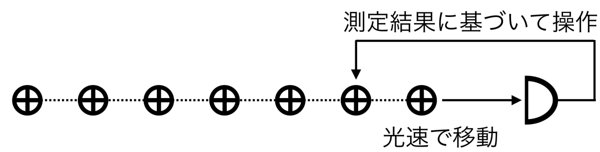

図 6　時間無制限超大規模 1 次元クラスター状態とそれを用いた量子計算の解釈。右端の光パルスからその左隣の光パルスに量子テレポーテーションをしているのと等価。

3.4　時間領域多重一方向量子計算モデルを用いた光量子コンピューターの誤り耐性とスクイーズ

ここで、量子コンピューターの誤り耐性について考えてみたいと思います。計算した結果に間違いがあってはいけません。これは当たり前のことです。しかし、「計算結果に誤りの無い＝計算機に誤り耐性がある」を実現するのは非常に難しいことです。なぜならば、論理ゲートは何らかの物理過程で動作していますが、100%の確度で動作するものは存在しないからです。どんなに小さい確率でも誤りがあれば、大規模な計算をしていくと無視できない確率で間違った答えを出すことになります。これでは計算機ではありません。現在のコンピューターでもチェックサムなどを用いて誤り訂正を行い、誤り耐性を実現しています。同じことは量子コンピューターでも必要です。つまり、量子コンピューターでも誤り訂正が必要となります。逆に、誤り訂正ができれば、量子計算の途中で誤りがあっても訂正すれば良いのです。連続量クラスター状態を生成するとき、$|\tilde{+}\rangle \propto \int_{-\infty}^{+\infty} dx\,|x\rangle$の近似状態としてスクイーズド光を用いているため、ある確率で誤りが生じますが、その誤りを訂正する必要があります。現在知られている量子誤り訂正コードでは 20.5dB のスクイーズ（振幅値として-10 から+10 までの範囲が利用可能、ただし光子の振幅を 1 とする）で誤り耐性が実現できます。しかし、量子誤り訂正の進歩はとても速く、近いうちに 10dB のスクイーズ（振幅値として-3 から+3 までの範囲が利用可能）でも誤り耐性が実現されることが期待されています。

ちなみに、我々は世界のスクイーズド光の発展を引っ張ってきました。2006 年、14 年ぶりに世界記録を塗り替え 7dB のスクイーズを達成し（2006 年 2 月 14 日 NHK「プロフェッショナル」で放映)、さらに 2007 年には 9dB の新世界記録を樹立、これにより世界中でスクイーズの追求が始まりました。2016 年には我々と同じ非線形光学結晶を用いてドイツのグループが 15dB のスクイーズを達成しています。20.5dB も近いうちに達成できるかもしれません。

離散量処理でも連続量処理でも、いずれにしても量子誤り訂正を行わなければなりませんが、このためには多数の量子ビットを用いて 1 つの論理量子ビットを構成することになります。このように論理量子ビットに冗長性を持たせておけば、論理量子ビットを構成している 1 つの量子ビットに誤りが生じても、チェックサムに近い方法で誤り訂正をすることができます。このため、量子計算を行うためには、大量の量子ビットが必要となります。たとえば、Shor の誤

り訂正コードでは 9 量子ビットで 1 つの論理量子ビットを構成しています。現在、量子コンピューターに使える超伝導量子ビットの世界記録は 9 量子ビットなので（D-wave も超伝導量子ビットを使っていますが、これらは汎用の量子コンピューターには使えません)、1 論理量子ビットがやっとできるレベルです。そういった点で、連続量処理には大きな利点があります。それは振幅に制限は無いため、多数の光子を一括処理できることです。それにより多数の光子（量子ビット）により構成され冗長性の高い論理量子ビットを利用することができます。このように、連続量処理と量子誤り訂正は極めて相性が良いのです。

3.5　時間領域多重一方向量子計算モデルを用いた光量子コンピューターのユニバーサリティ実現に向けて

　連続量クラスター状態を用いた一方向量子計算において、任意の量子計算を実現するため（ユニバーサリティのため）には、ホモダイン測定（線形測定：出力が入力の振幅に比例する測定）と、何でも良いので非線形な測定（出力が入力の振幅の非線形な関数になる測定）が必要となります。我々はホモダイン測定を用いたものについては動作を確認しており、現在、最後に残った非線形測定実現に向けて日夜努力しています。

4.　おわりに

　いろいろ書いてきましたが、我々は時間領域多重一方向量子計算モデルを用いた光量子コンピューターにより

i. 室温でも量子ビットが存在でき、室温で量子計算が可能
ii. 飛行量子ビットを量子通信にそのまま使える
iii. 光子は完全に均一で、量子ビット間のクロストークが全くないため、大量の量子ビットを扱うことができる
iv. 時間領域多重によりスペースを取らず大規模化が可能
v. 時間領域多重により無制限に量子計算を続けられる（量子ビットの寿命の問題なし）
vi. 一方向量子計算なのでプログラム可能
vii. 量子コンピューターのクロック周波数を 100GHz 以上にできる

という特徴を持つ量子コンピューター実現に向けて日々努力しています。