

# Qubus 量子コンピューターの方法

## —— スケーラブルな量子情報処理に向けて ——

根本 香 絵

### Qubus Computation: A New Route Towards Scalable Quantum Information Processing

Kae NEMOTO

Qubus (quantum bus) quantum computation is a new way to construct a scalable quantum information processing (QIP). In the recent years, we have seen proof-of-principle experiments in a number of matured experiment setups, and now the scalability in the implementation level is becoming one of the most important and urgent issues we face in the research field of quantum information. We explain how the qubus QIP works and how it can hugely contribute to construct a scalable quantum information processing.

**Key words:** quantum information processing, single photon, coherent state, scalability, quantum repeater

量子情報処理の実現に向けてさまざまな実現化の方法が活発に提案され、その多様な方法の中には、これまでに数量子ビットを用いた量子情報処理の基本原則を実験的に実証できるものが出てきた。その中には例えばイオントラップ、線形光学、NMRなどを用いた量子情報処理の方法が挙げられる。これらそれぞれの実現化の方法において、物理系が異なることでその実験の難しさも異なり、それぞれに固有の長所、短所がある<sup>1-5)</sup>。そういったなかにあつて、ファブリケーションや集積化などのこれまで培ってきたITテクノロジーの蓄積を考えると、固体物理素子を用いた実現化は将来の大規模な量子情報処理にとって大変魅力的な実現化の方法であるといえよう。しかし固体物理を用いた素子の実現化は、今のところ他のより進んでいる実現系にくらべると遅れているのが現状である。

これら量子情報処理の基本原則の実証実験を通して私たちが学んだことは、量子コヒーレンスを保ちながら量子状態を操作することは大変に難しく、そのために必要となる量子コントロールは質、量ともに壮大であるということである<sup>6)</sup>。もちろん私たちが直面する困難は実現化に用いる物理系、物理的な性質で異なり、例えば固体物理系では量

子コヒーレンスをいかに保ちながら量子制御を行うかが大きな問題であるし、一方、光の系では弱い光学非線形を補っていかに2つの光子に2量子ゲートを操作するかということや、非ガウス型の光をどのように生成するかなどが焦点となる。実証実験に成功しているさまざまな実現系においても、その実験系を拡張するために量子ビットを加えていくと、これら本質的な難しさや問題はまた形を変えて表面化する<sup>7)</sup>。つまり系に量子ビットを追加しようとする、また新たな困難が持ち上がるというわけである。そういった困難はもちろん扱っている物理系によって実にさまざまであるわけだが、大切なことはここで私たちが直面している問題は、どのような物理系を用いていたとしても、共通にスケーラビリティをいかに満たすのかということであることに気がつく。スケーラビリティとは、取り扱う情報処理の量が大きくなってもその情報処理を行う物理系が巨大化せずに拡張できる性質のことである。ここで特に焦点をおいているのは、理論的な抽象的レベルのスケーラビリティの問題ではなく、実現化においてスケーラビリティを満たす基本素子をいかに構成できるのかという問題であつて、さらにそれをどう用いるのかという問題でもあ

る。今後量子情報処理が検証実験から一歩進み、実用的なデバイスとして実現するためには必要不可欠なステップであり、量子情報処理研究における緊急の課題である。

このスケーラビリティの問題を乗り越える方法として、量子バス (Qubus) の必要性が大きな注目を集めつつある。Qubus 量子コンピューターの提案はその流れを生み出した先駆的な研究<sup>8-10)</sup> のひとつで、量子ビットの直接相互作用を使わずに、量子ビットと Qubus の相互作用を基礎として量子情報処理を構成するところに特徴がある。この Qubus 量子コンピューターの考え方は、スケーラビリティに伴うさまざまな問題を本質的に解決する実現化提案の筆頭であり、物理系固有となりがちな直接相互作用の必要性を取り除くことで、同時に直接相互作用に伴うトポロジ的な制限などの物理的な制約からコンピューターアーキテクチャーを開放し、これまでになく効率化された量子情報処理を可能にする。量子計算モデルによらずに、多様な物理系に適用でき、しかも距離やサイズなどのスケールによらない量子情報処理のユニバーサルな構成方法を提供するのが特徴である。長距離から量子ビットゲートまで基本的に同じ原理で動作するために、インターフェースとしての役割ももち、量子ネットワークを Qubus 量子情報処理の原理で構成することが可能である。また、特に光は通信には欠かせないことなどを思い出しでも明らかなように、物理系にはそれぞれ特徴があり、インターフェースを備える Qubus 量子情報処理は、さまざまな物理系の利点を生かした量子情報処理の構成を可能とするなどの優位性をもつ。Qubus を用いた量子情報処理の方法にはいろいろな物理系が考えられるが、本稿ではコヒーレント光を Qubus に用いた場合での量子情報処理の方法を例に、Qubus 量子情報処理がどのように構成されるのかについてみることにする。

Qubus と量子ビット間の相互作用は Qubus 量子情報処理の基本素子として重要である。この Qubus と量子ビット間の相互作用を行う基本素子と単一量子ビット操作はユニバーサリティーを満たし、これらの素子の組み合わせで任意の量子変換を任意の精度で行うことが可能である。

Qubus と量子ビット間の相互作用として、まず量子ビットの状態によって条件的に Qubus であるコヒーレント光の位相を回転させるものが考えられよう。Jaynes-Cumming 相互作用で dispersive 極限で得られるハミルトニアン

$$H_{\text{eff}} = -\frac{g^2}{\Delta} a^\dagger a \sigma_z$$

はこの条件的回転を与える。ここで、 $a$  は Qubus の消滅

演算子、 $\sigma_z$  は量子ビット上の対角化されたパウリ演算子である。量子ビットの状態を  $c_0|\uparrow\rangle + c_1|\downarrow\rangle$ 、コヒーレント状態を  $|\alpha\rangle$  として、ここに上のハミルトニアンで与えられる Qubus に対する条件付回転相互作用を行うと、系全体の状態は、

$$e^{-iH_{\text{eff}}t} (c_0|\downarrow\rangle + c_1|\uparrow\rangle) \otimes |\alpha\rangle = c_0|\downarrow\rangle |ae^{-i\theta}\rangle + c_1|\uparrow\rangle |ae^{i\theta}\rangle$$

となる。ここで回転角  $\theta$  は  $\theta = g^2 t / 2\Delta$  で与えられる。光と物質の相互作用は弱いので回転角は小さいことが予測されるが、必要な条件は位相の違う 2 つのコヒーレント光が区別できることなので、コヒーレント光の強度を十分大きくとると、オーバーラップ  $|\langle ae^{-i\theta} | ae^{i\theta} \rangle|$  を理論的には任意に小さく取ることが可能である。したがって、相互作用が弱くても 2 つの状態を十分に区別することが可能である。コヒーレント光によって光の非線形効果を増幅できると考えてもよい。Qubus を測定し 2 つの状態  $|ae^{-i\theta}\rangle$  と  $|ae^{i\theta}\rangle$  を区別することによって、量子ビットを直接測定することなしに、量子ビット上の量子非破壊測定 (QND 測定) が可能である。量子ビットがキャビティの中の人工二準位原子の場合には、キャビティ中の量子ビットの状態を測定しようという場合に、キャビティからでてきたコヒーレント光を測定することで、量子ビットの状態を測定することができるし、また量子ビットに単一光子を用いている場合には、このように量子ビットを測定せずに Qubus のみを測定することは、すなわち単一光子を壊さずにその状態を測定できることなので、これが量子非破壊測定になっていることがわかりやすい。また逆に量子ビットのほうを測定すれば、単一光子やシュレーディンガーの猫状態など量子的な光の生成に用いることができる。(この性質から Qubus 量子情報処理を QND アプローチと考えることもできる<sup>11)</sup>。) 一方、超伝導素子のようにマイクロ波などの Qubus と量子ビットの相互作用の強い物理系などでは、条件付変位相互作用

$$U = \exp[i\theta x_p \sigma_z]$$

を用いることができる場合がある。この相互作用を用いて、条件付回転相互作用と同じように量子情報処理を構成することができる。実際に超伝導量子ビット系では Qubus との相互作用や QND 測定は実証されており<sup>12-14)</sup>、今後の研究の発展が楽しみな分野である。

次に量子情報処理のゲート構成を考えよう。まず、条件付回転相互作用で考えると、図 1 のようにパリティゲートを構成することができる。パリティゲートは 2 量子ビットのパリティを測定するゲートであるが、エンタング

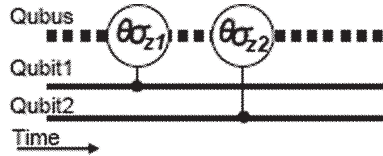


図1 パリティゲートの概念図.

ル生成ゲートとしても用いられる。2つの量子ビットを同じ重さに重ねあわせた状態に初期化しておけば、相互作用後の系全体の状態は

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{2} [ (|\uparrow\downarrow\rangle + |\downarrow\uparrow\rangle) |\alpha\rangle + \frac{1}{2} [ (|\uparrow\uparrow\rangle |\alpha e^{i\theta}\rangle + |\downarrow\downarrow\rangle |\alpha e^{-i\theta}\rangle) ] ]$$

となる。ここでQubusを測定することで最大にエンタングルした状態を生成できることが上式からわかる。このことは、例えばホモダイン測定を用いて状態 $|\alpha\rangle$ を他の状態 $|\alpha e^{\pm i\theta}\rangle$ から区別することを考えて、測定結果が状態 $|\alpha\rangle$ を示すときは測定によって量子ビットの状態は $(|\uparrow\downarrow\rangle + |\downarrow\uparrow\rangle)/\sqrt{2}$ に射影されることをみればよい(このときコヒーレント状態 $|\alpha\rangle$ と $|\alpha e^{\pm i\theta}\rangle$ のオーバーラップはゲートの誤り確率に相当するが、先ほども述べたようにオーバーラップは理論的には任意に小さくとることができる<sup>15)</sup>。このパリティゲートはユニタリー性を満たさないが、このゲートを組み合わせることで2量子ビット論理ゲートを構成することが可能であるし、また量子通信の中核技術である量子中継やクラスター状態生成などにおいても特に有用であることから重要なゲートである<sup>16,17)</sup>。量子中継は長距離間にBellペアを生成する方法だが、まずは中継点間にエンタングルした量子ビットのペアを生成しないと行かない。パリティゲートは中継点間のエンタングルメント配信にそのまま用いることができ、その場合は2つの量子ビットの間は数十kmにもなる。中継点の間で生成されたエンタングルした量子ビットのペアに純粋化を施してBellペアの精度を保ちながら、エンタングルメントスワッピングでエンタングルメントの距離を伸ばしていくのである。このとき、ホモダイン測定を用いるとパリティゲートは確率的にしか成功しないが、量子中継の場合には確率的な要素は問題とはならない。この長距離パリティゲートは高速エンタングルメント配信を可能にし、この方法に基づく量子中継の方法は従来の方法に比べるとはるかに高い性能を達成できることが示されている<sup>16)</sup>。しかしながら、これまではこの方法に代表されるようなコヒーレン

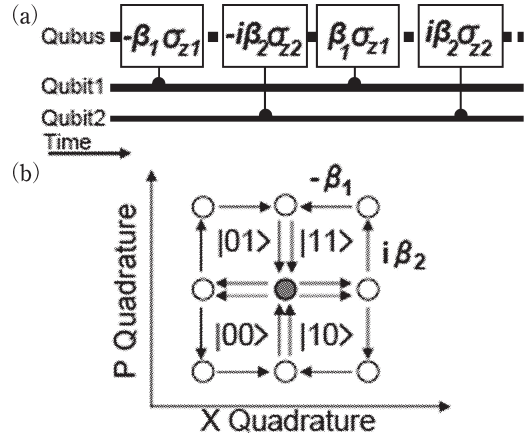


図2 CPhaseゲートの概念図。(a) 回路概念図、(b) ゲート中のQubusの位相空間での軌跡。

ト光を用いるエンタングルメント配信の方法は、配信中におこる光子損失に弱いことが指摘され、コヒーレント光を用いるエンタングルメント配信における決定的な弱点であるという指摘があった。ところが、最近の研究成果ではコヒーレント光を用いても光子損失に耐性をもつエンタングルメント配信の方法が提案されており、そのような常識を破る結果を示している。この新しい研究結果では、光子損失にあわせてコヒーレント光を調節することが可能なことから、従来の方法に比べてむしろより高性能でフレキシブルな量子中継システムを構成することが可能であることが注目できる<sup>17,18)</sup>。

さて、量子計算には論理ゲートが必要である。実際に、このパリティゲートを3つ組み合わせることで論理ゲートのひとつCNOTゲートを構成できることが示されている<sup>8)</sup>。さらに、測定を必要としない2量子ビットゲートも可能であることがわかっている。測定を必要としないため高速なゲート構成が期待できることも特徴的である。例えば条件付変位ゲートを用いると、図2のように4つの条件付変位ゲートによってCPhaseゲートが構成できることがわかる<sup>10)</sup>。条件付変位ゲートを通過するごとに、Qubusの状態は位相空間上で動いていき、最終的にはすべての軌跡が元の点に戻るため、再び量子ビットとQubusはセパラブルな状態となる。この間に、図に示したように量子ビットの4つの基底状態 $|00\rangle$ ,  $|01\rangle$ ,  $|10\rangle$ ,  $|11\rangle$ によってQubusの状態の位相空間上での軌跡が異なり、それぞれの状態はこの囲まれた面積と状態の移動した方向によって決まる位相を獲得する。Qubusの軌跡が囲む面積をうまく調節することで、条件的な位相を量子ビット上の状態に残すことができるというわけである。

ゲートから長距離量子通信まで量子ネットワークを

Qubus の原理で構成する方法を示したが、これらは Qubus 量子情報処理のひとつの構成方法にすぎない。Qubus 量子情報処理の方法は多様な物理系に適用でき、いろいろなバリエーションが考えられる点が重要である。その中で光は Qubus としての役割だけでなく、量子情報処理を担う安価な量子ビットとしても活躍し得ることにも注目したい<sup>19)</sup>。このような多様な Qubus 量子情報処理の構成方法は、今後とも実証努力とともに大きく前進していくと期待される。

## 文 献

- 1) J. I. Cirac and P. Zoller: "Quantum computations with cold trapped ions," *Phys. Rev. Lett.*, **74** (1995) 4091-4094.
- 2) E. Knill, R. Laflamme and G. J. Milburn: "A scheme for efficient quantum computation with linear optics," *Nature*, **409** (2001) 46-51.
- 3) Pieter Kok, W. J. Munro, K. Nemoto, T. C. Ralph, J. Dowling, and G. J. Milburn: "Linear optical quantum computing with photonic qubits," *Rev. Mod. Phys.*, **79** (2007) 135-175.
- 4) N. A. Gershenfeld and I. L. Chuang: "Bulk spin-resonance quantum computation," *Science*, **275** (1997) 350-356.
- 5) D. G. Cory, A. F. Fahmy and T. F. Havel: "Ensemble quantum computing by nuclear magnetic resonance spectroscopy," *Proc. Nat. Acad. Sci. U. S.*, **94** (1997) 1634-1639.
- 6) J. Emerson, M. Silva, O. Moussa, C. Ryan, M. Laforest, J. Baugh, D. G. Cory, R. Laflamme: "Symmetrized characterization of noisy quantum processes," *Science*, **317** (2007) 1893-1896.
- 7) A. O. Niskanen, K. Harrabi, F. Yoshihara, Y. Nakamura, S. Lloyd and J. S. Tsai: "Quantum coherent tunable coupling of superconducting qubits," *Science*, **316** (2007) 723-726.
- 8) K. Nemoto and W. J. Munro: "Nearly deterministic linear optical Controlled-NOT gate," *Phys. Rev. Lett.*, **93** (2004) 250502.
- 9) W. J. Munro, K. Nemoto and T. P. Spiller: "Weak nonlinearities: A new route to optical quantum computation," *New J. Phys.*, **7** (2005) 137.
- 10) T. P. Spiller, K. Nemoto, S. L. Braunstein, W. J. Munro, P. van Loock and G. J. Milburn: "Quantum computation via communication," *New J. Phys.*, **8** (2006) 30.
- 11) K. Nemoto and W. J. Munro: "Universal quantum computation on the power of quantum non-demolition measurements," *Phys. Lett. A*, **344** (2005) 104-110.
- 12) J. Johansson, S. Saito, T. Meno, H. Nakano, M. Ueda, K. Semba and H. Takayanagi: "Vacuum Rabi oscillations in a macroscopic superconducting qubit LC oscillator system," *Phys. Rev. Lett.*, **96** (2006) 127006.
- 13) M. A. Sillanpää, J. I. Park and R. W. Simmonds: "Coherent quantum state storage and transfer between two phase qubits via a resonant cavity," *Nature*, **449** (2007) 438.
- 14) J. Majer, J. M. Chow, J. M. Gambetta, Jens Koch, B. R. Johnson, J. A. Schreier, L. Frunzio, D. I. Schuster, A. A. Houck, A. Wallraff, A. Blais, M. H. Devoret, S. M. Girvin and R. J. Schoelkopf: "Coupling superconducting qubits via a cavity bus," *Nature*, **449** (2007) 443-447.
- 15) S. D. Barrett, P. Kok, K. Nemoto, R. G. Beausoleil, W. J. Munro, T. P. Spiller: "A symmetry analyser for non-destructive Bell state detection using EIT," *Phys. Rev. A*, **71** (2005) 060302.
- 16) P. van Loock, T. D. Ladd, K. Sanaka, F. Yamaguchi, K. Nemoto, W. J. Munro and Y. Yamamoto: "Hybrid quantum repeater using bright coherent light," *Phys. Rev. Lett.*, **96** (2006) 240501.
- 17) S. G. R. Louis, K. Nemoto, W. J. Munro and T. P. Spiller: "The efficiencies of generating cluster states with weak nonlinearities," *New J. Phys.*, **9** (2007) 193.
- 18) W. J. Munro, R. Van Meter, Sebastien G. R. Louis and K. Nemoto: "A high bandwidth quantum repeater," *Phys. Rev. Lett.*, **101** (2008) 040502.
- 19) S. J. Devitt, A. G. Fowler, A. M. Stephens, A. D. Greentree, L. C. L. Hollenberg, W. J. Munro and K. Nemoto: "Topological cluster state computation with photons," arXiv:0808.1782.

(2008年7月15日受理)