

## 超伝導量子コンピュータへ向けた研究

東京理科大学 理学部第一部 物理学科 教授 ツイヅァオシェン  
蔡 兆申

## 量子コヒーレンスと情報処理

情報を記録して保持すること、そして情報を加工して計算処理をする技術の進展は、文明の進化に計り知れない影響を及ぼしてきた。文字の発明に続き、算盤や機械式計算器の出現、そして近代での様々な電子デバイスに基づくコンピュータの目覚ましい発展は、人類社会の根幹を担っている。ここで述べた従来の情報の基礎単位は、すべて何らかの古典力学の法則に従う物理状態を利用したものである。例えば、現代コンピュータで使われるビットの情報は、シリコントランジスタ回路（例えばCMOS）の「オフ」状態と「オン」状態や、コンデンサー（例えばDRAM）に蓄積される電荷の有無の状態など、二つの古典状態を使い、高度に複雑化した情報処理機能を実現している。このように古典的バイナリ状態に基づく計算機を以下では古典コンピュータと呼ぶ。

その一方で、量子コヒーレント状態を使って情報処理を行うという全く新たなコンピュータのパラダイムが近年急速に発展している。物質が「量子コヒーレント」に振る舞うということは、例えば、その物質が二つの場所を同時に占有できるという、大変奇妙な量子力学の特性を反映したものだ。量子ビットは量子力学に従う2準位系である。古典的ビットでは、0と1のどちらかの状態しか占有できないが、量子ビットでは、「量子コヒーレンス」の現れとして、0と1の状態を量子的に重ね合わせることで、両方の状態を

同時に占有することができる。量子ビットの数 $n$ が増えると、同時に重ね合わせることで可能な状態は $2^n$ に比例して指数関数的に急速に増大する。このような指数関数的な重ね合わせ状態の増加には、量子もつれ、または量子エンタングルメントと呼ばれる、多体量子系間の「非局在な相関」が関与する。量子コンピュータは、このように生成された膨大な数の重ね合わされた量子状態を、いちどきに操作することで演算を進める量子並列計算機と考えることができる。

宇宙の根源的原理である量子力学は、90年程度前に確立したが、このような量子コヒーレンスの不思議な振る舞いを個別の量子系で調べる実験は、最近の20年間でようやく実現できるようになった。このような量子コヒーレンス制御の科学技術の進展に伴い、量子コンピュータはもはや単なる机上の空論ではなく、将来的には実際に実現可能となる超高性能情報処理システムであると考えられている。

量子コンピュータにはいろいろな形式が存在するが、最も理論的に研究が進んでいるのは、ゲートモデル型に基づく万能量子計算機である。ゲートモデル型量子コンピュータは、古典コンピュータが不得意とする一部の計算問題を、指数関数的効率を持って解くことが可能であることが数学的に証明されている。ゲートモデル型量子コンピュータを目指した研究は、Google、IBM、Intel、Rigettiなどの企業が超伝導回路方式を使って開発を

進め、現在では50~100ビット程度の集積回路が実現している。量子回路の情報処理能力が古典コンピュータの能力を超える実証実験は「量子超越性」の実現とも呼ばれるが、これが超伝導量子回路で達成される日も間近に迫っている（世界の量子コンピュータ開発の詳細は、本特集号の「量子コンピュータの歴史と現状そして未来」も参照）。

一方量子アニーリング型と呼ばれるシステムの研究も進んでいる。これは最適化問題を効率的に解くことを目指した量子計算方式である。古典コンピュータと比べ、この回路方式の優位性は一般的には明確ではないが、すでに2000ビット程度の超伝導量子アニーリング回路が試作され、その性能の評価の研究が進められている（量子アニーリングに関しては、本特集の「量子アニーリングの現状と未来」を参照）。

量子ビットは2準位の重ね合わせ状態にかかわる自由度（振幅と位相の自由度）がある。古典ビットの状態が完全にデジタル的であることと比較すると、量子ビットの状態は上記の自由度を伴ってアナログ的に記述される。また量子ビットのコヒーレンスは、外部環境の影響を受け比較的短時間で失われてしまう。コヒーレンスがなくなると量子計算は成り立たないので、量子エラー訂正という手順を用いて量子コヒーレンスの消失の影響を訂正することが必要になる。この量子エラー訂正を成立させるには、量子ビットのアナログの状態を高い精度で制御しなくてはならない。表面コードと呼ばれる最も研究の進んだエラー訂正方式では、この量子状態制御に必要な閾値精度は99%程度である。

## 超伝導量子ビット

万能型量子コンピュータを構成する量子ビットは、様々な物理系が候補として考えられるが、ここでは超伝導量子ビットをめぐる研究の進展を紹介する（電子スピンを利用する

量子ビットは本特集の「電子スピンの量子コヒーレンスと量子もつれ」を参照）。量子コンピュータを構築する量子ビットが最低限クリアしなければならない5つの条件として、物理学者 David DeVincenzo が1996年に提唱したものがある：① 集積化が可能な2準位系であること；② 初期化が可能なこと；③ 量子コヒーレンス状態を十分長く保てること；④ 量子万能ゲート操作（1ビットと2ビットの量子論理操作）が可能なこと；⑤ 量子状態の読み出しが可能なこと。これ以外にも、すでに述べた量子状態操作の高い精度や、量子ゲート操作の絶対時間が短いことなども、高性能で現実的な量子コンピュータには大変重要な条件である。

上記の条件は幾分定性的なものであり、どの程度それらの条件を満足するべきかは議論の余地がある。より正確な定量的な条件は、実際の量子コンピュータの設計の詳細に準じて発生する。超伝導量子ビットは、上記の条件のそれぞれを定性的にはクリアしている物理系である。

超伝導状態とは金属の抵抗がゼロになる奇妙な現象である。金属内の無数にある伝導電子は勝手に動き回ることができる。しかしひとたび金属が超伝導状態に転移すると、勝手に動き回れたおのおのの電子の自由度はすべて奪われ、すべての伝導電子は単一の「巨視的量子状態」と呼ばれる特殊な量子的な状態に落ち込む。この超伝導の巨視的量子状態を利用した量子ビットが超伝導量子ビットである。

超伝導量子ビットの集積化は、現時点で50~100ビット程度の超伝導量子ビット回路がすでに実現していて、その詳細の動作の評価が進んでいる。量子ビットを基底状態へセットする初期化は、単に希釈冷凍機を使って冷却することで励起状態へ励起する確率を数%程度に抑えられ、さらに能動的ドライブをすることでそれを0.1%程度に低減できる。

超伝導量子ビットでは数十マイクロ秒の間コヒーレンスを保つことが実現していて、その間 99% 以上の高い精度で量子論理操作を行うことが実証されている。また量子状態の単事象・量子非破壊読み出しも 90% 以上の高精度で実現している。また超伝導量子ビットの 1 ビット操作は 100 MHz 程度、2 ビット操作は 30 MHz 程度の高速で、かつ 99% 以上の高精度をもって実現している。

超伝導量子ビットはこのような優れた数々の特性を持ち合わせているので、世界中の大きな量子コンピュータ開発プロジェクトで採用されている。同時に主要企業における量子コンピュータ開発研究においても、そのほとんどが超伝導量子ビット方式を採用していることも特記できる。

下図に、2 種類の典型的な超伝導量子ビットの模式図を示す。超伝導回路という大きな(巨視的な)物理系において、量子コヒーレ

ンス性を保ったまま系の物理状態を制御することを、われわれは 1999 年に世界に先駆けて実現した (NEC 筑波研究所にて)。超伝導量子ビットは、設計上の大きな自由度や、局所的量子状態制御・読み出しが比較的簡単にできることを特徴とする人工原子である。

図に示したのは、磁束型量子ビットと電荷型量子ビットの模式図であり、これは超伝導の状態に許された二つの自由度である磁束(位相)の自由度と電荷数の自由度に、それぞれ対応する。以下その動作原理について少し詳しく説明する。磁束型量子ビットでは、磁束を保持するための超伝導ループにより構成される。ループにはジョセフソン接合が備えられている。ジョセフソン接合とは、二つの超伝導体を弱く結合した超伝導デバイスであり、量子ビットではトンネル型のジョセフソン接合が使われる。この構造は 1964 年より知られている超伝導量子干渉計 (SQUID) と基本的には同じである。ジョセフソン接合では超伝導性が弱まっているので、ここを通過して磁束が超伝導ループの内外を移動し、ループ内に閉じ込められる磁束量子の数が増減することが可能になる。

古典的な SQUID 回路では、磁束量子の移動にはエネルギーの散逸を伴う。その一方、磁束量子ビットで重要なのは、磁束の移動が量子力学的にコヒーレンスを保って起こることである。仮にこの過程でエネルギーの散逸があると、量子性は失われる。磁束量子ビットによる量子重ね合わせは 2003 年によく実現した。また補助的な回路として、図のように外部より磁束を超伝導ループに印加するためのインダクター (コイル) と電流源が備えられている。磁束型量子ビットは、現在特に量子アニーリング回路で主に研究がなされている。

電荷型量子ビットは磁束型量子ビットと双対の関係にあり、互いに「裏返した」ような構造になっている。まず磁束量子ビットの主

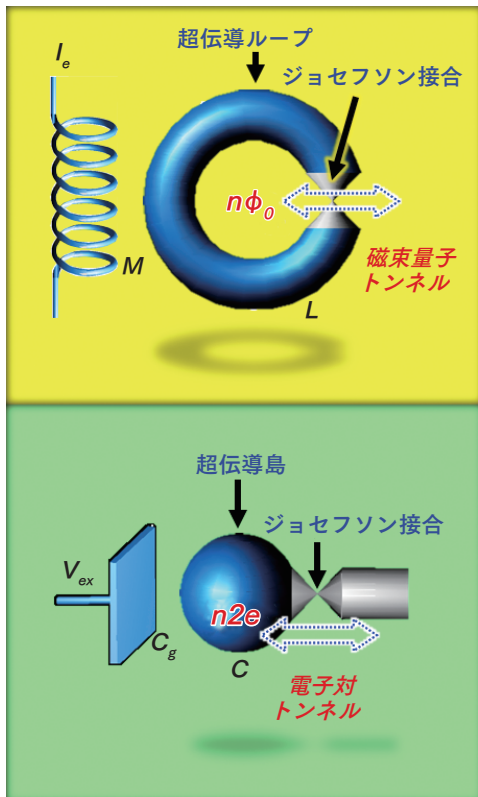


図 超伝導量子ビット模式図

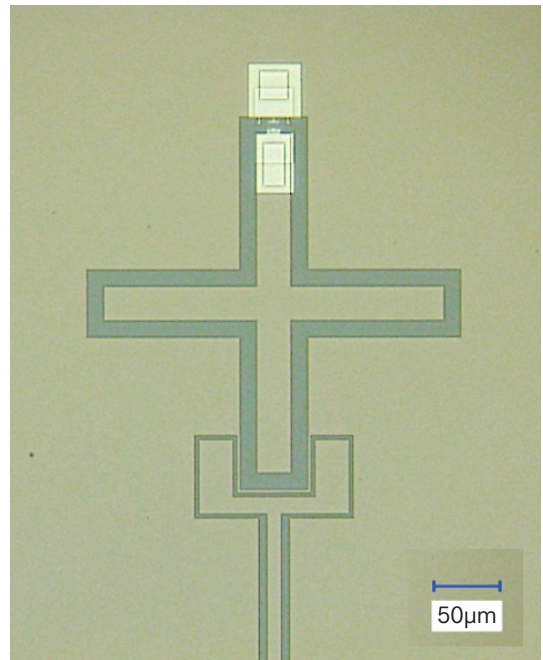
構造である超伝導ループが消え、逆にループの中心の穴がふさがれ、超伝導の島として現れる。この構造は、電子対箱（クーパー対箱）と呼ばれる 1980 年代後半より知られる回路と同一なものである。この回路では、磁束ではなく電子対（超伝導体中の電荷の単位）がコヒーレントにジョセフソン接合をトンネルする。この回路での量子重ね合わせ制御の実験は 1999 年に実現した。また補助回路として、電荷を超伝導島に印加するためのコンデンサー（コイルではなく）と電圧源（電流源ではなく）が備えられている。現在ゲート型量子コンピュータの研究は、電荷型量子ビットをその基本素子として進められている。

以上の量子回路では、超伝導ループ中の磁束数や、超伝導島中の電子対の数は量子化されている。また隣り合う磁束数や電荷通数の状態間には量子コヒーレントな相互作用があるので、自然原子のような量子化されたエネルギー準位が出現する。したがってこのような超伝導回路は、人工原子と呼ばれる。ここで重要なのは、ここで出現する量子化エネルギー準位は、膨大な数の超伝導電子が関与する超伝導巨視的量子状態であるということだ。

超伝導人工原子の一番下の二つのエネルギー準位、つまり基底状態と第一励起状態のみに注目した二準位系は量子ビットとして実質的に扱える。外部よりマイクロ波パルスを超伝導量子ビットに印加することにより、その状態間の遷移を制御し、任意のコヒーレントな量子重ね合わせ状態を作ることが可能である。また超伝導量子ビットでは、高精度な量子状態操作のみではなく、状態の観測も高精度で実現している。

### 超伝導量子コンピュータ研究の現状

ゲートモデルに基づく超伝導量子コンピュータの研究は、現時点では電荷量子ビットを使った回路の研究が最も進んでいる。特に超伝導島（左頁図下）をわざと大きくして、量



トランズモン型量子ビット写真

子ビットのエネルギーバンドがゲート電圧の変動に影響されにくくした、トランズモン型と呼ばれる電荷量子ビットを用いた研究が主流となっている。写真は典型的なトランズモンの写真である。

写真中、真ん中にある十字型の構造はアルミ薄膜で構成された超伝導島である。写真上方に見えるのはジョセフソン接合であり、これもアルミ薄膜とアルミ酸化膜により構成されている。このようなアルミ材料を使った超伝導量子ビットが現在の主流であり、これはこの材料系を使った量子ビットの作成の容易さとコヒーレンス特性の優れていることの反映である。また下方に見えるのは、量子ビットと結合した超伝導共振器の一部である。

量子力学は原子レベルの微視的な物理系の状態を支配する法則であるが、この写真に示した量子回路は 250 ミクロン程度の巨大な広がりを持つ超伝導体の回路であるが（自然原子より約 7 桁以上巨大！）、きちんと量子力学的にコヒーレントに振舞う。この島の中には約 100 億個の伝導電子があるが、超伝導状態

ではそれらは巨視的集団として量子状態を形成する。島の大きさを大きくすることで、ゲート電圧（図下）の変動に対して安定した量子ビットの動作が実現する。このように、人工原子は固体電子素子であるが故、設計や制御の面での自由度に優れていて、特に集積化が比較的容易に実現できることを特徴としている。

超伝導量子ビットのコヒーレント状態を保てる時間（デコヒーレンス時間）は、過去20年の間ほぼ指数関数的に伸び続けた（およそ2年間で10倍）。写真に示した我々の研究室で作成した超伝導量子ビットの典型的エネルギー緩和時間（励起状態1から基底状態0への緩和時間）は約20マイクロ秒である。最初に作られた電荷量子ビットの寿命が1ナノ秒以下であったことを考えると、この分野が大変な進歩を遂げているのが分かる。

超伝導量子ビットのデコヒーレンス時間は桁違いな進展を遂げているが、いまだにその詳細で微視的な物理は不明である。現在の現象論的なコヒーレンスの消失過程のモデルは、実験を説明するのにある程度成功を収めている。しかし現在以上の量子ビットの長寿命化を達成するためには、微視的な材料の研究の進展が望まれている。シリコンデバイスの黎明期には、材料研究の進展によりシリコン内の不純物を取り除くことに成功したことにより、その性能を大幅に向上させることができ、現在のシリコンデバイスの黄金時代を築き上げることに成功した。この成功例を踏襲し、超伝導量子ビットのデコヒーレンス微視的な物理が理解され、材料研究により超伝導量子ビットの性能がこれまで以上に進歩することを大いに期待している。

量子コンピュータを実現するには、万能のセットのゲート操作を行う必要がある。これは1ビットの回転の状態制御を行うゲート操作と、2ビットの量子論理演算ゲート操作がそのセットとなる。それぞれのゲート操作は

独立して量子状態を正確に制御する必要がある。現在の量子ビット回路方式では、万能の量子ゲート操作のセットを、99.8%以上の高精度で実現している。このような高精度な量子ゲート操作の実現は、超伝導量子ビットのデコヒーレンス時間が大幅に改善されたことに大きく関連している。

古典コンピュータではエラー訂正手法を用いて正確な論理演算を可能にしている。量子コンピュータでも同様にエラー訂正は重要な計算手順である。それどころか、デコヒーレンスの影響を強く受け、かつアナログ的な論理演算を行う量子系では、古典計算器以上にエラー訂正は重要な役割を果たす。量子エラー訂正を行うにあたり、量子状態制御の精度に最低限達成しなくてはならない閾値がある。表面コードと呼ばれる量子計算で最も研究の進んだエラー訂正方式では、この閾値精度は99%程度であることは前にも述べた。したがって、超伝導万能量子ゲートの操作制度は、表面コード型エラー訂正を遂行するために必要な閾値を満足する性能をすでに実現している。

超伝導量子ビットの読み出しには様々な方式があるが、現在最もよく使われているのは、分散読み出しと呼ばれる観測手法である。分散読み出しとは、量子ビットに超伝導共振器を結合させ、この結合した系の共振周波数を観測する読み出し方である。この場合、系の周波数は量子ビットの状態により変調が生じるので、この変調を計測することにより量子ビットの状態が観測可能となる。

分散読み出し時に系を共振させるためのマイクロ波信号は、あまり強くすると量子ビットのデコヒーレンスを生じてしまう。したがって分散読み出しでは、一般的には比較的弱い信号を検測する必要がある。そのためには信号/雑音比が十分高い特殊な増幅器が必要となる。ジョセフソンパラメトリック増幅器(JPA)はこの需要を満足できる増幅器であ

る。JPA を使い、量子ビットの状態を一回の検測のみで正確に読み出す（単事象読み出し）ことが可能になっている。また分散読み出し方では、量子非破壊読み出しが可能となる。

## 展望と期待

以上説明したように、超伝導量子ビットに基づく量子コンピュータの研究は着実に進み、その実現のために満たすべく数々の重要な基準を次々に達成してきた。しかしまだまだ未解決の大きな問題もある。その中でも最重要である量子ビットの集積度のスケールアップの問題を以下に取り上げる。

電子デバイスの情報処理能力は、ムーアの法則にしたがって過去 70 年前後、確実な進展を遂げてきた。これは、デバイスの 1 ビットあたりのエネルギーの絶え間ない低減により達成されたものである。このような長期にわたるスケールアップの進歩が可能であった理由は、そもそも古典的電子デバイスのバイナリ状態には膨大な数の電子が関与していたからである。我々はこれまで様々な工夫により、電子デバイスの微細化を通し、その論理記述に関連する電荷数を削減すること（そしてポテンシャル電圧を多少下げること）により、エネルギー／ビットの低減を実現した。したがってこの微細化スケールアップの一つの明らかな限界は、電荷数削減の量子限界である。

上記の古典電子デバイスと比べ、量子ビットの集積度のスケールアップは全く異なった物理的背景を持つ。固体電子デバイスである超伝導量子ビットでは、その論理記述に関与する電荷や磁束の数はすでに量子限界にて動作する。それゆえ現在の超伝導量子ビットのこれ以上の微細化は、原理的にあまり期待できない。そもそも量子ビットはムーアの法則の原理的な終点で動作するデバイスである。その点で量子ビットは、古典的な超伝導単量

子磁束デバイスや古典的単電子デバイスと類似している。

この 20 年の間、超伝導量子ビットの集積化は着実に進み、近年では約 10 倍／4 年のペースで集積化が進んでいる。これは量子ビットの設計の進歩、制御パルスの最適化、スケールアップ可能な量子ビット間の結合方式の発展などによるところが大きい。その結果、現在は 50～100 ビット程度の集積回路が実現していて、「量子優越性」の証明も最近報告されている。

それでは、このような量子ビットの集積化は如何に達成されたのであろうか。超伝導量子ビットの集積化の進歩は、高集積化に伴う量子チップ自体の大型化（チップ面積はビット数にほぼ線形に比例する）、周辺回路である量子状態制御用のマイクロ波パルス回路の集積化などによって達成された。このような言わば力づくによる集積化は、ムーアの法則に従う集積化とは全く異なるルールに則っている。これから重要になるのは、多ビット化のための大型量子チップの作成技術とそのパッケージング技術、マルチチップ化技術、周辺の多チャンネル古典制御回路の集積化、多ビットスケールアップに対応する量子制御ソフトウェアなどなどであろう。

量子コンピュータは、これまでのムーアの法則に従う古典計算機を超越する、全く新たな計算パラダイムに則る情報処理装置である。エラー耐性を備えた数千論理ビット相当の本格的な超伝導万能量子コンピュータが実現するのはまだ先と思われるが、すでに着実な進展が見えてきた。現在のスケールアップが仮に保たれた場合、今世紀の中ごろには真の量子コンピューティングの時代が到来するであろう。それまでは、様々な小規模量子計算システムが社会の中で活躍することを期待している。

