

量子コンピュータ研究の最前線

量子コンピュータのハードウェア研究が活性化し、すでに10年以上が経過しました。その結果、基本素子である量子ビットの状態を操作する技術は格段に向上しましたが、一方で根本的な問題も明らかになっています。本特集では、このような問題点の克服に向けて、NTT研究所において進めている新しい試みについて紹介します。

やまぐち ひろし

山口 浩司

NTT物性科学基礎研究所

量子物理の進展と応用

「驚くほどの速さで検索が行える」「これまで天文学的な時間がかかっていた因数分解が、あっという間に終わってしまう」など、革新的な演算速度が予言され、注目を集めてきた量子コンピュータですが、そのハードウェアに関する本格的な研究が始まってから10年以上が経過しました。量子コンピュータを構成するもっとも基本的な素子単位を「量子ビット」と呼びますが、これまでさまざまな物理系を用い、より完成度の高い量子ビット実現に向けての研究が精力的に進められてきました。

量子コンピュータの動作原理として用いられている物理法則は、「量子力学」と呼ばれるものです⁽¹⁾。量子力学は我々の常識の源となっているニュートンの「古典力学」とは大きく異なる概念で自然法則を記述します。そこでは例えば、「すべての力学系は波と粒子の2つの側面を持つ」であるとか、あるいは「あらゆる力学系は複数の場所（状態）に同時に存在できる」などという、我々の常識とはかけ離れた考え方が必要になります。このような、自然が持っている多重性を用いて超

並列演算を行うのが量子コンピュータです。

しかし、この考えを受け入れると、例えば「我々の体も波になり、2つの場所に同時に存在できるの？」とか、「そのときに我々の心はどちらにいる？」「片側が死んだら、もう片側もそうなるのか」など、哲学的な領域にまで踏み込んだ多くの疑問が生まれます。量子力学が完成したのは、今から1世紀近く前の1920年代です。その後このようなさまざまな議論を引き起こしたわけですが、結局のところ「いろいろ実験してみると、やはり完璧な理論であることは間違いないようだ」というのが現在では共通の認識になっています。

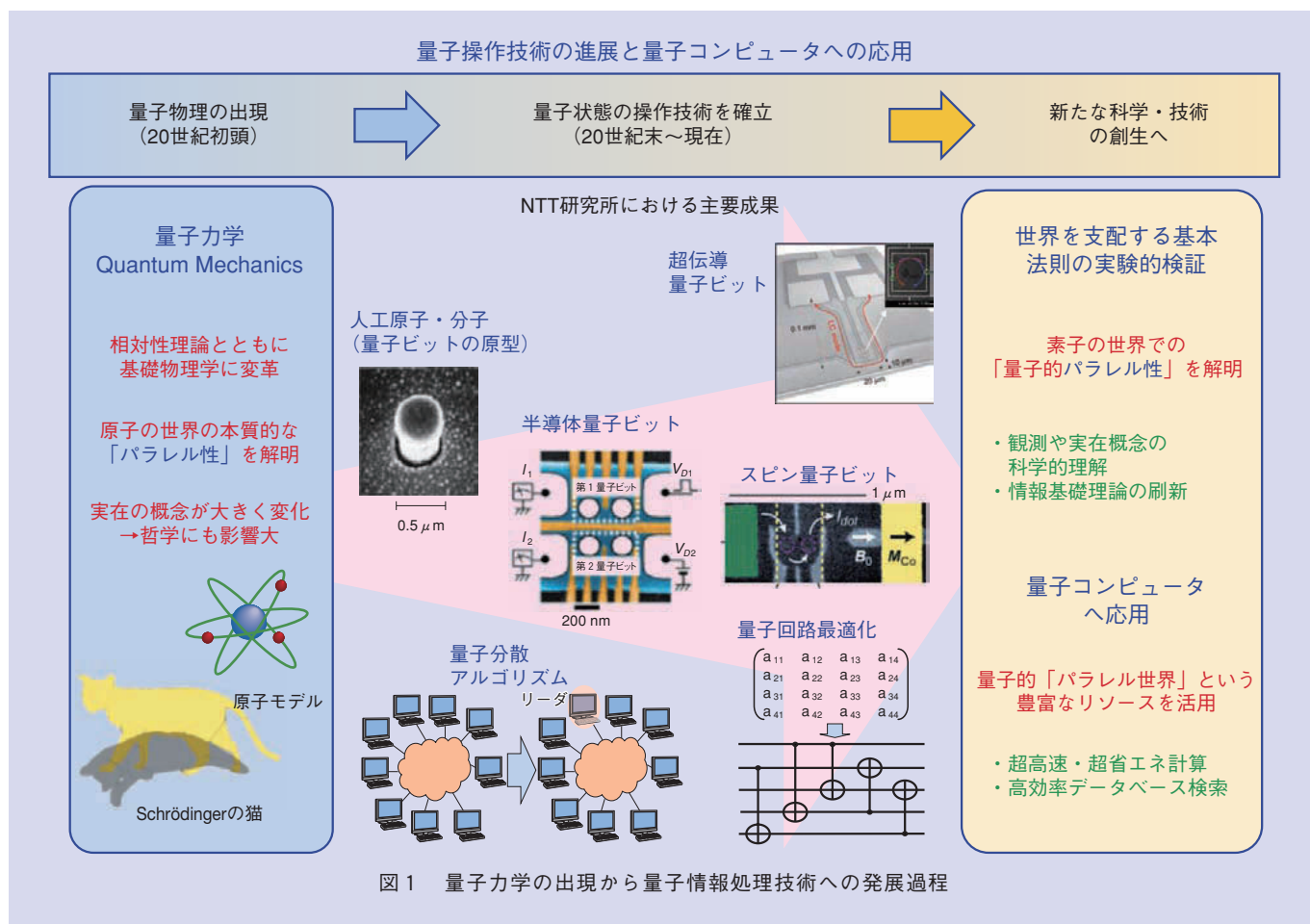
一方、量子力学的な現象の工学的応用という意味では、半導体のバンド構造は量子力学的効果がないと現れないし、レーザなども光と物質の量子力学的な相互作用がなければ実現できないわけですから、ある意味、量子力学は極めて多くの革新的技術をこの世に生み出してきたといえるでしょう。しかし「同時に2つの場所に存在できる」といった量子力学が予言する本質的な部分を用いた技術というのは、実は量子コンピュータや量子暗号などの量子情報処理技術によって、初めて研究さ

れ始めたわけで、意外に最近のことなのです。

量子力学の発展過程を図1に示します。NTT研究所では、従来からLSIや光半導体素子などの研究に向けて高度の微細加工技術を開発し、その新しい応用として量子力学的な性質が出現する半導体や超伝導体の微細構造の研究を行ってきました。その結果、10年ほど前より、このような量子状態の制御が可能となってきたわけです。このように量子力学の原理的な部分を用いる技術が大きく発展すれば、将来的には超高速・超省エネの計算技術や高効率データベース検索、新材料・医薬の探索・設計などの応用技術が開花するものと期待されています。

量子コンピュータ研究の課題

この10年にわたるさまざまな試みの結果、個々の研究は著しく進展し、量子コンピュータにおいて「0」、「1」のビット情報を表現する量子状態を精密に制御する技術は、10年前とは比べ物にならないほど進展しました。しかし、このような研究を進めていく過程において、量子コンピュータ実現に向けての深刻な課題も、いくつか明らかになってきました。



もっとも大きな問題の1つは、多ビット化が容易ではないという点です。通常の「古典的」コンピュータの場合、1つの演算素子（ANDやORなど）が完成したら、それを結合させていくことはそれほど難しいものではありません。もちろん、現在のCPUのように集積化が極限まで進み、さらにGHzという高い速度で演算していくレベルに至ると、半導体トランジスタにおいても、さらなる集積化は簡単ではあり

ません。しかし1個の基本素子が完成すれば、それらを配線でつなぎ合わせて複合動作をさせていくという初期の開発段階において、多ビット化に対する本質的な問題はなかったのではないのでしょうか。一方、量子ビットには多ビット化に向けた本質的な課題が存在します。それは量子状態が長い時間維持できないという点です。このため演算時間に制限があり、演算のアルゴリズム自体は高速であっても多数回の演

算を実行することができないわけです。1個の量子ビットにおける量子状態を一度だけ操作するのでしたら、現在の技術レベルではそれほど難しい技術ではありません。しかし、それを複数個に対して複数回実行しようとするとき量子状態が壊れてしまい、演算が継続できないのです。

この問題は、もちろん初期の段階から重要視されていましたが、当初は「いかにして長い時間量子状態を維持

できる量子ビットを見つけるか」という視点で研究が行われていました。その結果分かったことは、それぞれの物理系の量子ビットで長所と短所があるということです。例えば、ある系では大変に速い演算が可能なのですが、すぐに量子状態が壊れてしまう。しかし、別の系では演算は得意ではないのですが、長い時間量子状態を保持できる。また、ある系は量子ビットを複数組み合わせた多数ゲートに適しており、別の系では単体での性能は優れているが複数の量子ビットを用意することは難しい、などです⁽²⁾。これにより、現在では1種類の量子ビットを用いて多数ビットの量子計算を行う、という試みを無理に進めるのではなく、異なる種類の量子ビットをうまく組み合わせ、全体として優れた量子コンピュータのシステムをつくる、という研究の方向性になってきています。

それでは、このような視点で研究されている量子ビットには、どのようなものがあるのでしょうか。本特集では、最近NTT研究所で行われているさまざまな異なる種類の量子ビットに関する研究を紹介します。研究のフェーズはさまざまで、実際に量子ビットとしての動作を確認したものから、基礎物性を探索している段階のものもあります。以下ではそれぞれの研究に用いられている量子系の特徴を簡単に紹介することにしましょう。

さまざまな物理系による量子ビット

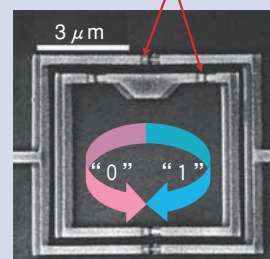
■超伝導量子ビット

超伝導とは低温において金属の電気抵抗がゼロになる現象です。電気抵抗がなくなると、例えばぐりと周回する閉じた回路をつくったとき、回路を流れる電流は永久に止まりません。この電流はとても安定しているため、これを用いて量子状態を表現したものが超伝導量子ビットです。超伝導量子ビットは、固体系量子コンピュータに用いる素子としてもっとも研究が進んでいるものの1つです。

超伝導量子ビットの基本構造を図2に示します。アルミニウムからなる閉じた超伝導回路に、ジョセフソン接合^{*1}と呼ばれる超伝導電流を邪魔する部分を設けます。この接合により、右回りの電流と左回りの電流が相互に混ざり合い、電流が右にも左にも同時に回っている量子的な状態が実現できます。この状態を用いて量子ビットをつくらうというものです。

超伝導回路は、制御性がとても優れた量子ビットですが、一方、その多ビット化は大きな課題でした。この超伝導量子回路だけで多ビット化を構成するのではなく、別の量子系を「量子メモリ」として用いる試みに最近取り組んでいます。具体的には、ダイヤモンドのNVセンタ^{*2}と呼ばれる複合欠陥の持つスピン状態を量子メモリとして用いる研究を進めています。また、量

ジョセフソン接合：アルミニウムと酸化アルミニウムとの接合



材料：アルミニウム
(超伝導転移温度～1.2 K)

右回りと左回りの電流が同時に流れる

図2 超伝導量子ビット構造

子ビットに用いる電流は非常に微弱なため、どのようにしてその微弱な信号を読み出すかも大きな課題です。これから2つの取り組みについて、本特集記事『超伝導量子ビットとスピン集団のコヒーレント結合』と『電気回路による量子非破壊測定の実験』で紹介しします。

■スピン量子ビット

スピンというのは電子や陽子などの素粒子の自転のことです(図3)。といっても、ピンとこない方も多いと思いますが、実は量子力学とアインシュタインの相対性理論の要請から、電子は「自転し続けなければならない」こと

*1 ジョセフソン接合：2つの超伝導体を極めて薄い絶縁膜を介して接触すると、超伝導電子対が絶縁膜を通過し、電圧の発生なしに電流が流れる現象のこと。

*2 NVセンタ：ダイヤモンド内の窒素-空孔複合体。

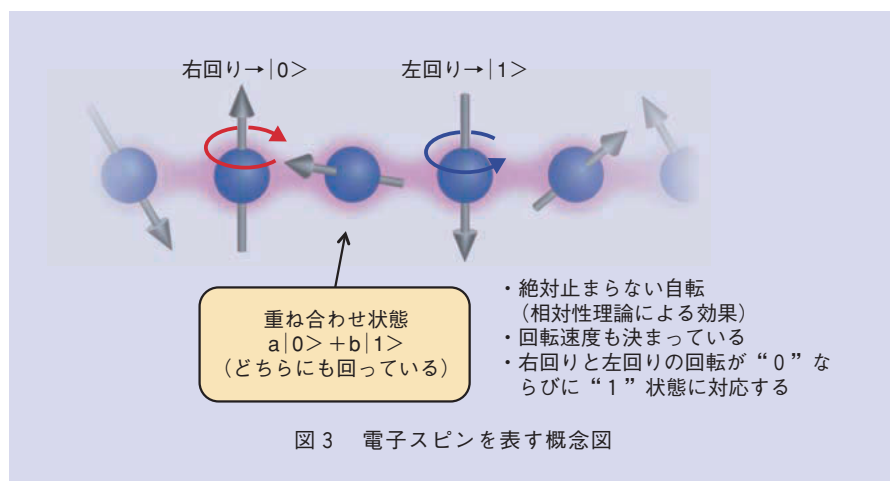


図3 電子スピンを表す概念図

が示されています。この止まらない回転の向きが右回りか左回りかによって量子状態を表現するのが、スピン量子ビットです。

スピン自体はさまざまな技術に応用されています。例えば、もっとも身近なところでは磁石があります。なぜ磁石が磁力を持つかというと、それは電子スピンがあるからです。電子の自転がある種の回転電流を引き起こし、その結果電磁石と同様に磁力を生み出すのです。

一般に、スピン量子ビットは、量子状態を長く維持できる可能性が指摘されています。例えば、ダイヤモンドのNVセンタでは、およそミリ秒程度まで量子状態が維持できるとされています。これは従来の固体系量子ビットに比較して2～3桁長い時間になります。このため量子メモリとしての可能性が模索されているわけです。半導体中の電子スピンを電圧によりコントロールす

る研究、および表面弾性波と呼ばれる物質の表面を伝搬する超音波によって、スピンを離れた場所に伝搬させる研究について、本特集記事『電子スピン回転とスピン軌道係数の定量的決定』と『超音波を用いた電子スピン輸送』で紹介します。

■冷却原子

最後に冷却原子について紹介します。冷却原子は半導体や超伝導体などの固体材料を用いたものではないため、固体素子として量子コンピュータを構成する対象ではないと考えられていました。しかしながら、最近ではアトムチップとして冷却原子を固体素子に組み込む試みが進んでおり、また量子状態を維持できる時間が極めて長い。ため、量子ビットの有力な候補として活発に研究が進められている量子系の1つになっています。

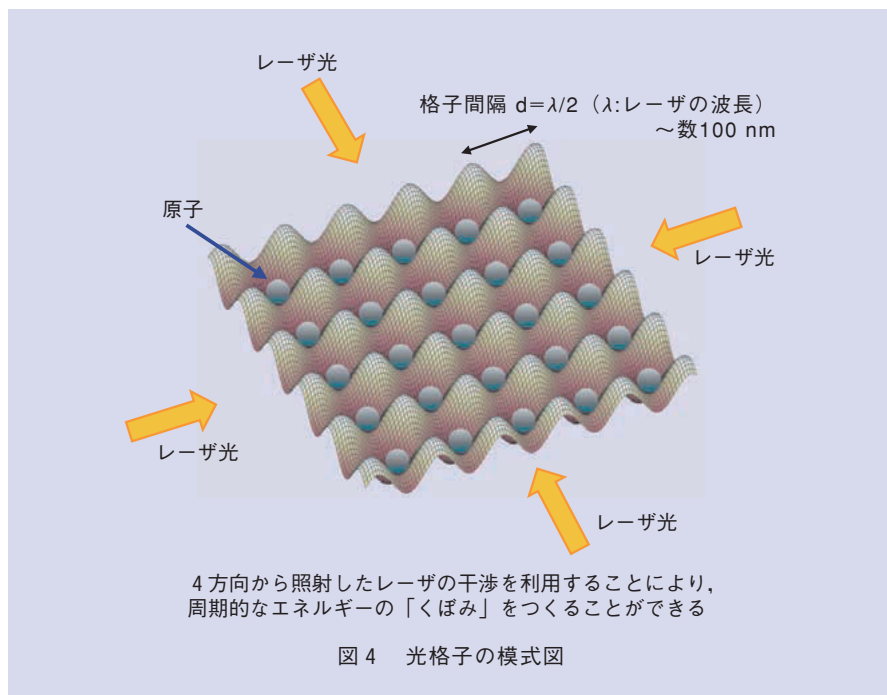
もともと、原子は量子力学の創生期において量子現象がもっとも早く確認

された物理系の1つです。気体中の孤立した原子においては量子性を壊す外界との相互作用が小さいため、比較的容易に量子力学的な性質が確認できたことが理由でしょう。しかし、その量子状態を制御しようとする、大きな障害が現れます。それは、気体を構成している原子は驚くほどのスピードで空間を飛び回っていることです。このため、全体としての平均的な量子状態を測定するのは比較的容易ですが、1個1個の原子の量子状態を個別に制御することは大変難しいわけです。

この問題を解決する方法は原子を冷却することです。原子が動き回る理由は熱運動なので、温度を下げてやれば原子をある空間に閉じ込めることができ、個別の量子状態の制御が可能となります。しかし、冷却といっても原子の動きを止めるまで冷やすのですから簡単ではありません。これにはレーザ冷却という特殊な手法を用います。NTT研究所ではこのような原子の冷却に関する研究を進めています。レーザ冷却により原子を格子状に規則正しく並べる手法について、本特集記事『光格子中の冷却原子気体を用いた量子シミュレーション』で紹介します。

量子の世界が示す多様性と将来

量子力学とともに物理学の基本法則として有名なアインシュタインの一般相対性理論は、宇宙空間と地上では時間の経つ速度が違うなど、我々の世



界観を変える多くの予言をしました。その提唱は1915年であり、すばらしい理論ではありましたが、我々の日常に対する影響は著しく小さいため、身の周りの技術に入ることにはまずないだろうと、つい最近まで考えられていました。しかし、現在我々が使っているカーナビゲーションのGPSシステムは、一般相対性理論を応用して初めて実現できたものです。技術の進歩というのは本当に驚くべきもので、こんなことは無理だろうと思っていた技術が、あっという間に普及してしまいます。

すでに述べたとおり、量子力学が発見されてすでに1世紀近くが経ちますが、その原理的な部分が応用技術として研究され始めたのは本当に最近のこ

とです。その意味で、量子コンピュータの研究は、まだ始まったばかりであり、これから長い時間がかかるのも事実です。しかし、研究者たちは常に新しい試みを絶やさず大きなブレークスルーをねらっています。本特集で紹介する研究も、そのような試みの一例です。このような技術をうまく組み合わせることで、驚くほど優れた量子コンピュータが近い将来実現されるかもしれません。あるいは、量子コンピュータとは全く違う応用技術が、予想しない側面から大きく発展することを期待する研究者もいます。量子の世界が持つ多様性は、現在の技術の基礎をなす古典力学の世界とは大きく異なり、量子コンピュータはその応用例の1つに

すぎないかもしれません。

■参考文献

- (1) 山口：“量子・ナノデバイス研究の最前線～量子計算からナノマシン技術まで～,” NTT技術ジャーナル, Vol.24, No.4, pp.41-45, 2012.
- (2) T. D. Ladd, F. Jelezko, R. Laflamme, Y. Nakamura, C. Monroe, and J. L. O’Brien: “Quantum computers,” Nature, Vol. 464, No.7285, pp.45-53, 2010.



山口 浩司

固体素子の上で量子状態を自在に操れるなどということは、私が大学で量子力学を学んでいたころには想像もできない、驚くほど進んだ技術だと思います。量子コンピュータに限らず、実はほかにも多くの応用が可能なのではないでしょうか。

◆問い合わせ先

NTT物性科学基礎研究所
量子電子物性研究部
TEL 046-240-3475
FAX 046-240-4317
E-mail yamaguchi.hiroshi@lab.ntt.co.jp