

# 原子でつくる量子コンピュータ

原子は量子コンピュータを実現するうえで優れた特徴を持っていますが、原子一粒一粒の運動を制御する技術が最大の問題となります。NTTが世界に先駆け開発に成功した超伝導永久電流アトムチップによりこの問題を解決し、量子計算機を実現する方法について解説します。

むかい てつや

向井 哲哉

NTT物性科学基礎研究所

## 量子コンピュータ開発へのアプローチ

量子コンピュータは、量子力学の原理に基づく超並列性により、従来の計算機では、計算に数万年もかかるような難しい問題を、短時間で解くことができるといわれています。これを実現するには、量子コンピュータのCPUに相当する量子ゲート演算素子として、少なくとも量子状態を記録する量子ビットと、その量子状態を必要に応じて書き換える相互作用が必要です。このような量子ゲート演算素子の候補として、NTTでは、半導体や超伝導体の微細加工により得られる離散的エネルギー状態を用いる研究が重点的に行われてきました。いわゆるトップダウン型のアプローチです。

一方、これとは対照的に、量子力学的な振る舞いがよく理解されている原子の内部状態を用いて量子ゲート演算素子を実現するボトムアップ型のアプローチが秘かに進められ、最近、世界に先立つ成果を得るまでに発展してきました。本稿では最近の報道発表で注目を集めている、原子を用いる量子コンピュータの開発について紹介します。

## 原子の特徴

原子は、陽子と中性子の集まりである原子核の周りを、電子が取り囲む構造を持つ複合粒子としてよく知られています。また、特定の波長の光を吸収・放出することから、量子力学的な振る舞いもよく理解されています。これら原子の大きさは、一番外側まで広がっている電子雲の直径がおおよそ0.1 nmです。最先端のナノテクノロジーの限界が10 nm程度ですから、その100分の1程度の大きさです。また、室温27℃の原子は、時速1 000 kmというジェット旅客機やピストルの弾丸のような速度で飛び回っています。このように高速で運動している非常に小さな原子を、量子ビットとして利用するた

めには、図1のように個々の原子を空間的に捕捉して思いのままにその運動を制御しなければならないという課題があります。この課題を解決することは、今から約20年前までは全くの夢物語でしたが、1997年にノーベル物理学賞を受賞した原子冷却技術を応用することで、それが単なる夢物語ではないことが明らかになってきました。

## 原子冷却技術

近づいてくる救急車のサイレンの音が、遠ざかるときよりも高い音に聞こえるのは、ドップラー効果としてよく知られています。この音波におけるドップラー効果と同じことは光でも起こります。すなわち、光に向かって動いている場合、光の周波数は静止して

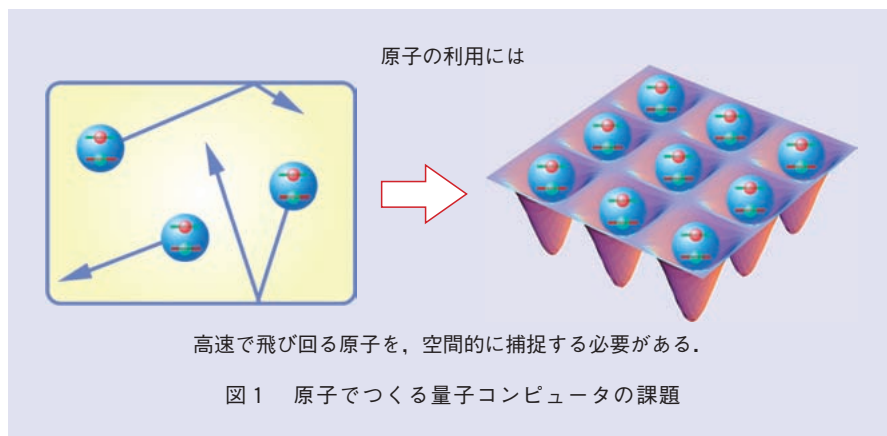


図1 原子でつくる量子コンピュータの課題

いる場合よりも高く感じられます。この性質を利用して、原子の運動と対向する方向から光を入射すると、原子は共鳴よりも低い周波数の光を、共鳴する周波数であるとみなして吸収します。光を吸収した原子は、不安定な状態なので、光を放出することで安定化しますが、このとき原子は共鳴する周波数の光を放出します。光のエネルギーは周波数に比例することから、図2に示すように光の吸収・放出の1サイクルで原子は相対的に低いエネルギーの光を吸収し、高いエネルギーの光を放出することになりエネルギーの損失が起こります。原子は、このエネルギーの損失を運動エネルギーで賄うため、速度が遅くなるのです。このような光の吸収・放出のサイクルを数万回繰り返

すことで、原子の速度は急激に減少し、わずか1秒にも満たない間に、原子はヒトが歩くよりも遅い速度の時速1 km以下になります。ピストルの弾丸のように飛んでいた原子が、一瞬にしてほとんど止まってしまうという驚異的な物理現象です。これは温度に換算すると、図3のように室温から、その1千万分の1の数10  $\mu$  Kまで一気に冷却することに相当します。最先端の固体冷却技術を長時間駆使しても到達できる温度はmK程度ですから、それよりもさらに2桁低い温度に原子は冷却されるのです。

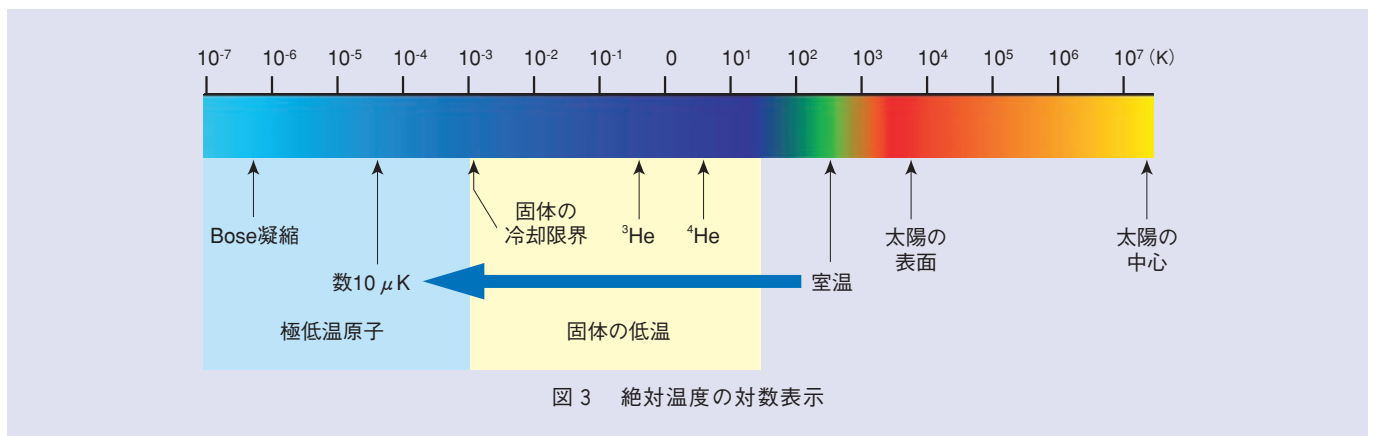
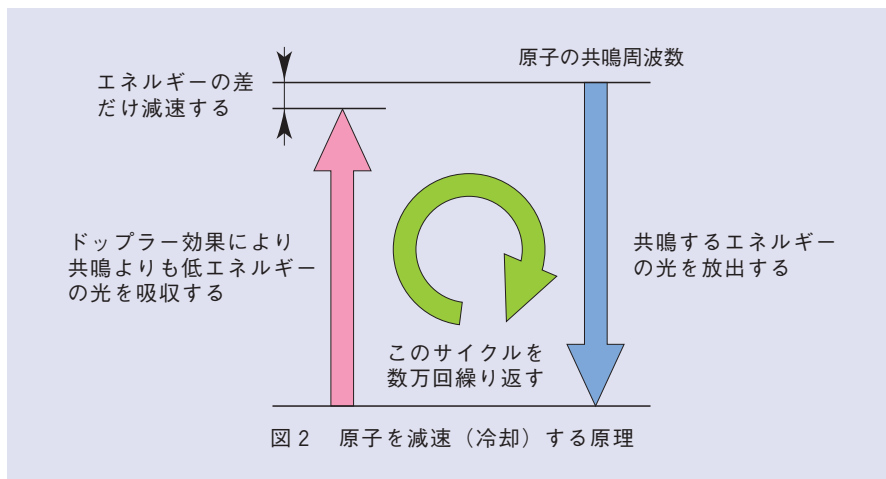
### 磁気トラップ

数10  $\mu$  Kという低温にまで冷却された原子は、比較的弱い力のポテンシ

ルでも捕まえることができるようになります。例えば、磁場のポテンシャルです。原子はプラスの電荷を帯びた原子核とマイナスの電荷を帯びた電子からなる複合粒子ですから、内部エネルギー状態によって非常にかすかですが磁場のポテンシャルを感じることができます。具体的には、原子のエネルギー状態の磁気副準位の違いにより、①磁場に引力を感じる状態、②磁場を感じない状態、③磁場に反発する状態があります。この内、③の状態のとき、図4のように原子は磁場の極小点をつくることで、そこに捕捉することができます。

### アトムチップ

ダイナミックに制御のできる磁場の極小点は、電流の周りに発生する磁場と外から加える磁場を組み合わせることで、発生させることができます。図5のように固体表面上にZ型に加工した電線を通る電流が発生する磁場に補助磁場を加えることにより原子を捕捉する方法は、アトムチップと呼ばれ、最近5年程の間に急速に発展した技術です。この方法は比較的小さい電流で効率よく多数の原子を捕捉できるため、最先端の物理実験でも広く活用されていますが、一粒の原子を捕捉



するにはまだ問題が残っていました。一粒の原子を捕捉するには、多数の原子を捕捉する場合よりも、小さい領域に強い力で閉じ込める必要があるため、原子は電流に近いところで捕捉しなければならないのです。しかしながら、電流の近くでは、電流が発生するノイズの影響により、原子は磁場で捕捉できない①や②の状態に遷移してしまうことが明らかになってきました。この問題を解決するために私たちが世界に先駆け開発したのが、超伝導永久電流アトムチップです。この方法では、電流を駆動する電源も必要なく、原理的に

ノイズフリーにできることから、原子一粒を捕捉することができるように期待されています。

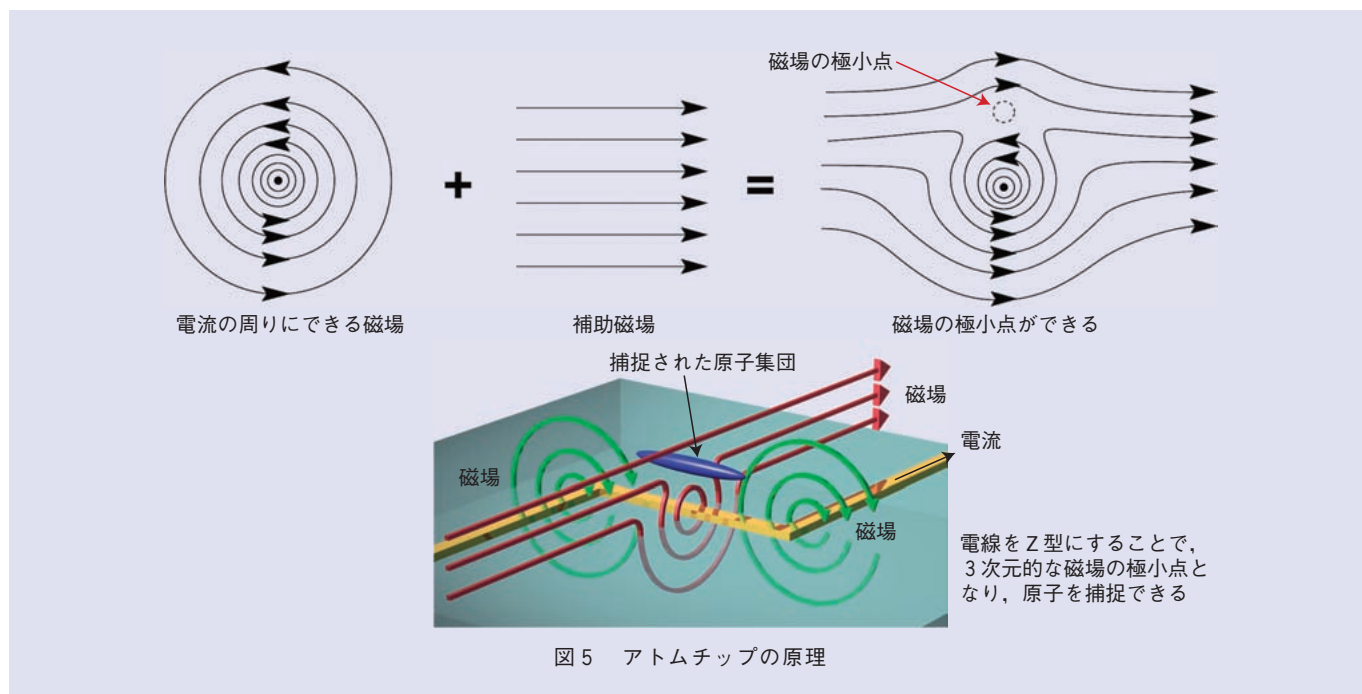
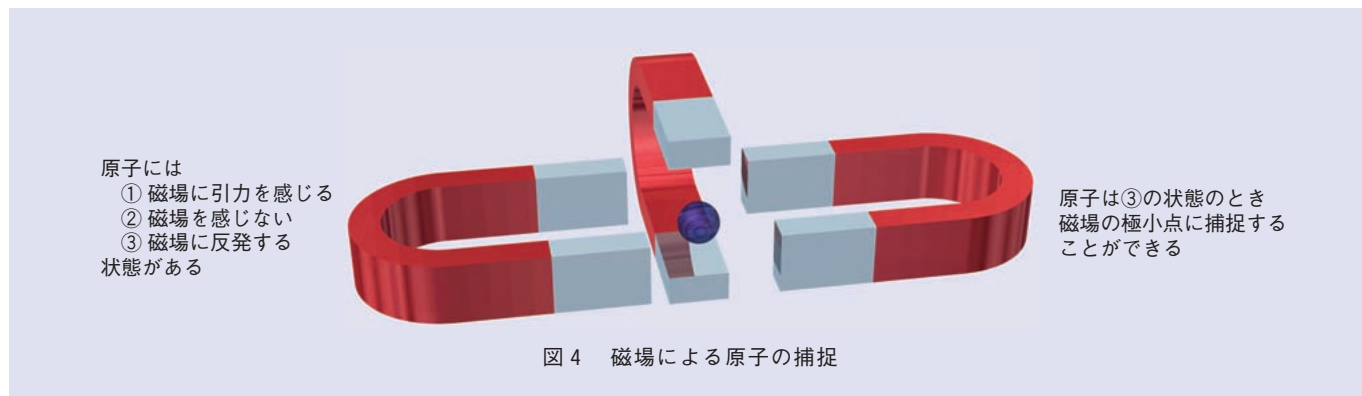
### 超伝導永久電流アトムチップ

図6は、200  $\mu$ Kに冷却した約50万個のルビジウム (Rb) 原子を、チップ表面から300  $\mu$ mの位置に捕捉したときの実験の様子とその結果です。理論的に計算される結果との比較から、2.5 Aの超伝導永久電流が流れていたことが分かりました。この技術を活用し、原子をチップの表面から数  $\mu$ mの位置に近づければ、原子一粒の運動を制御

できるようになると考えられます。このようにして捕捉された一粒一粒の原子は、量子力学的によく知られている光との相互作用を用いることで、量子状態の重ね合わせを用いる量子計算が実行できるようになると考えられます。

### 原子を使った量子コンピュータ

原子を使った量子コンピュータの特徴の1つは、量子ビットを人工的につくり出す必要がなく、天然に存在している全く同じ特性の原子を好きなだけ用いることができる数的拡張性があることです。また、原子一粒の大きさは



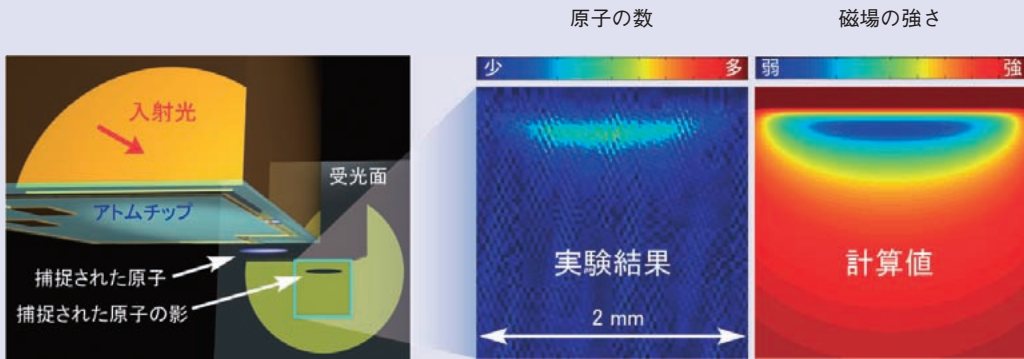


図6 超伝導永久電流アトムチップによる原子の捕捉

原子を一粒ずつ捕捉して、光を使って量子状態を制御する

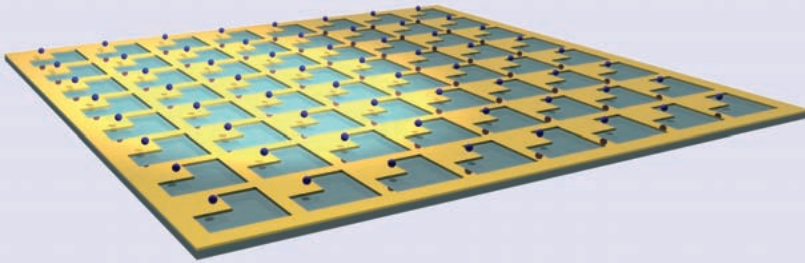


図7 原子を使った量子コンピュータの想像図

0.1 nmと非常に小さいのですが、それを制御するための電極の大きさは数  $\mu\text{m}$  で良いため、現在の微細加工技術でも十分に加工ができます。例えば、10  $\mu\text{m}$  の間隔で、原子を1個ずつ平面的に並べた場合、1 mm  $\times$  1 mm の領域に1万個の量子ビットを並べることができます。一方、10  $\mu\text{m}$  の間隔があれば、原子1個だけに集光した光を照射することが可能なおえ、1 mm  $\times$  1 mm の大きさであれば、全体を1つの光共振器モードの中に入れることも難しくありません。したがって、特定の原子1個だけを制御することも、また、全体の原子を一斉に制御することもできると考えられます(図7)。

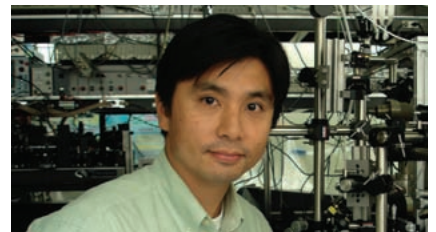
さらにもう1つの特徴は、原子が非常に安定であるということに由来しま

す。中性の原子が感じることのできる相互作用は非常に小さいため、1 mK以下まで冷却しなければ、原子を捕捉することはできませんでした。これは、原子を用いることの難しさの1つではありますが、外界からの影響が極めて小さく量子状態が長時間保存できることの証でもあります。すなわち、通常固体量子ビットでは、固体を通してさまざまな外乱の影響が入ってくるため、数マイクロ秒程度の時間が経てば量子状態は壊れてしまいますが、原子の場合、その100万倍以上長い時間が経っても量子状態は壊れないと考えられるのです。

### 今後の展望

以上のように、原子を用いるボトム

アップ型の量子コンピュータの開発は、まだ量子ビットの準備段階に過ぎませんが、原子の持つ数々の優れた特性は、非常に魅力的で将来有望であると考えられます。原子を用いる量子コンピュータの開発で、現在の問題点を挙げるとすれば、研究に不可欠な原子の冷却技術が非常に高度な技術であり、この技術を自在に操ることのできる研究者が極めて少ないことかもしれません。幸いNTTは、原子冷却の技術を持ち、極低温原子のBose凝縮も実現している世界で唯一の民間企業なのです。



向井 哲哉

原子一粒の量子状態を制御するなど、無謀な挑戦のようですが、将来は当たり前の技術になっているかもしれません。

#### ◆問い合わせ先

NTT物性科学基礎研究所

TEL 046-240-3634

FAX 046-240-4722

E-mail tetsuya@will.brl.ntt.co.jp