

RIKEN NEWS

No. 302 August 2006

8

創薬を見据えてタンパク質の構造を解く

p8 特集

体質を科学する遺伝子多型研究

p11 TOPICS

「第6回理研アドバイザー・カウンシル」を開催

神戸、横浜の両研究所で一般公開を開催

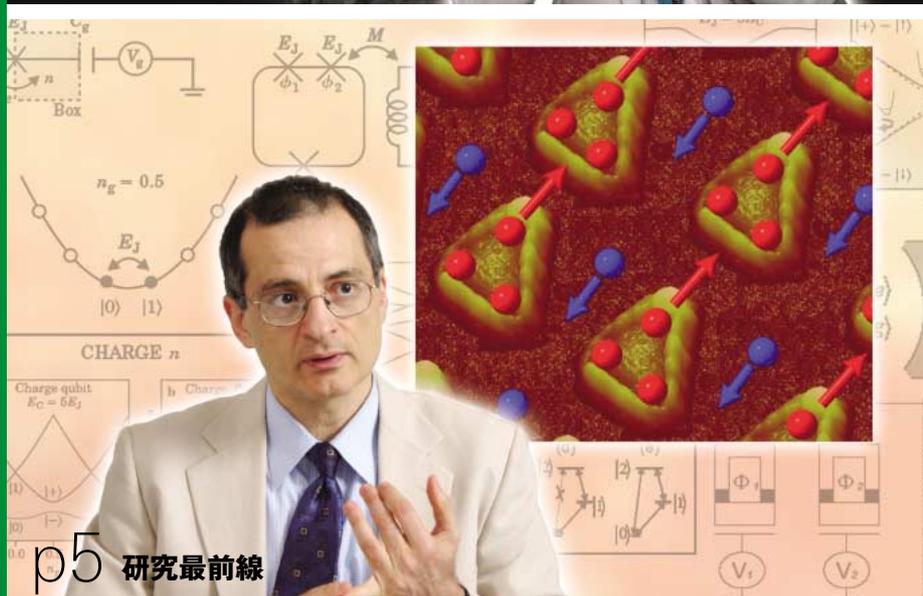
役員の報酬等および職員の給与の水準を公表

p12 原酒

立役者ノリ教授

国際的研究者集団「単量子操作研究グループ」(後編)

p2 研究最前線



p5 研究最前線

量子を飼いならす
夢の量子コンピュータの実現に挑む

量子を飼いならす

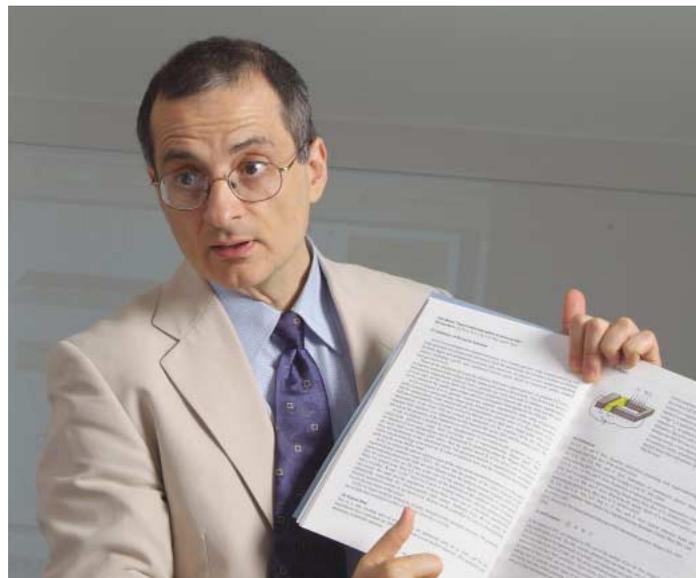
夢の量子コンピュータの実現に挑む

Franco NORI

フランコ ノリ

フロンティア研究システム 単量子操作研究グループ
デジタル・マテリアル研究チーム チームリーダー

現在のスーパーコンピュータが数千年かかって解けない問題を、わずか数十秒で解く量子コンピュータ。この夢のコンピュータの開発で世界をリードしているのが、単量子操作研究グループである。単量子操作研究グループは、ミクロな世界で現れる量子現象を解明し、それを利用した画期的な装置や材料、情報技術の開発を目指している。量子コンピュータは、その究極の目標の一つである。理論研究を担当するデジタル・マテリアル研究チームは、量子を操り、量子現象を利用するための新しいアイデアを次々と提案し、研究グループの中核的な役割を果たしている。



磁束量子を“飼いならす”

ある温度以下で電気抵抗がゼロになる超伝導体は、強力な磁石や高感度の磁気センサーとして、リニアモーターカーや医療用のMRI（磁気共鳴画像診断装置）など、さまざまな装置に利用されている。さらに、エネルギー問題解決のため、エネルギーロスのない送電線や電力貯蔵装置への応用も期待されている。

ただし超伝導体には、“磁場に弱い”という問題がある。超伝導体は磁場を嫌い、磁場を排除して内部に入り込まないようにする性質がある。しかし、超伝導体のニオブ（Nb）や高温超伝導体に強い磁場がかかると、磁力線が束ねられて極細の糸のような形で超伝導体を貫く領域がたくさんできる。この領域を「磁束量子」と呼ぶ（図1）。このとき物質全体としては超伝導状態だが、磁束量子の領域は常伝導状態で電気抵抗がある。この磁束量子は粒子のように超伝導体の中を不規則に動き回る。磁束量子が動くとノイズとなり、高感度磁気センサーとしての精度を低下させる原因となる。さらに大きな電流を流すと磁束量子の動きが激しくなり、熱が発生して物質全体が超伝導状態ではなくなってしまう。

大きな電流を流したり、高感度磁気センサーとしての精度を向上させるには、磁束量子の動きを止める必要がある。従来、超伝導体のきれいな結晶

中にわざと不純物を入れて欠陥をつくり、磁束量子を「ピン止め」することが経験的に行われてきた。しかし、磁束量子を直接見たり、動き回る様子を観測することができないため、磁束量子をうまく制御することができなかった。

「ホログラフィー電子顕微鏡」を開発し、磁束量子が動き回る様子を直接見ることに世界で初めて成功したのが、^{とのむら}外村 彰 博士率いる（株）日立製作所のグループである。2001年10月、外村博士は理研に単量子操作研究グループを立ち上げ、グループディレクターに就任した。その際、外村グループディレクターが米国に赴き、“三顧の礼を尽くして”招いたのが、^{フランコ ノリ}Franco Nori チームリーダーである（『理研ニュース』2006年7月号および本号「原酒」参照）。

「外村先生には“あなたは各チームをつなげるノリの役目をしてください”と言われていました」とNori チームリーダーは笑う。「私たちデジタル・マテリアル研究チームは、実験系チームに理論的なアイデアを提案したり、実験データを解析するなどのサポートをしています」

Nori チームリーダーは、磁束量子を“飼いならす”、意のままに操る研究分野のパイオニアの一人である。磁束量子を操る方法の一つは、超伝導体に不純物で規則的な構造をつくることだ。例えば、超伝導体のニオブの中に、不純物としてニッケル（Ni）の

三角形構造を並べる(表紙下段)。外部の磁場を強くしていくと、一つの三角形構造の中に三つの磁束量子(赤)が捕らえられる。一方、三角形構造の外側の磁束量子(青)は自由に動くことができる。ここに交流電流を流すと、自由に動ける磁束量子は一定の領域の中で、電流の向きが変わるたびに行ったり来たりする。一方、三角形構造に捕まっている磁束量子は、隣の三角形構造へ一方向(赤い矢印)に飛び移るようになる。不純物の構造をつくることで、磁束量子が動く方向をコントロールできるのだ。

このような、ある一方向の運動のみを許す仕組みを「ラチェット(爪車)構造」という(図2)。2005年、ラチェット構造の中で磁束量子が一方向に動く様子を、外村グループディレクターらがホログラフィー電子顕微鏡で詳細に観察することに成功した。ラチェット構造は磁束量子だけでなく、さまざまな微粒子の制御に応用できる可能性がある。「ラチェット構造により、微粒子が上下左右無秩序に動くブラウン運動のエネルギーを利用した微小モーターができるかもしれません」とNoriチームリーダーは語る。

電流で磁束量子を操る

磁束量子を操るもう一つの方法は、交流電流のかけ方を工夫することである。「テーブルクロスの上の皿をイメージしてください」とNoriチームリーダーは説明する。「テーブルクロスをゆっくり引くと皿も一

緒に動きますが、緩急をつけて引くと、皿を奥に移動させたり、手前に引き寄せたりすることができます。それと同じように、交流電流のかけ方を工夫すると、磁束量子を意のままに操ることができます」

交流電流のかけ方で磁束量子を操るというNoriチームリーダーらのアイデアは、世界で初めてのものである。超伝導体に特別な構造物をつくり込む必要がないため、実用化において極めて有利だ。交流電流のかけ方によって磁束量子を一方向に動かしたり、1ヶ所に集めたりすることができる。磁束量子をピン止めして、大きな電流を流したり、磁気センサーの感度を飛躍的に向上させるだけでなく、今まで“邪魔者”だった磁束量子を操り、新しい機能を生み出し、スイッチなどの素子をつくれる可能性が開けてきた。

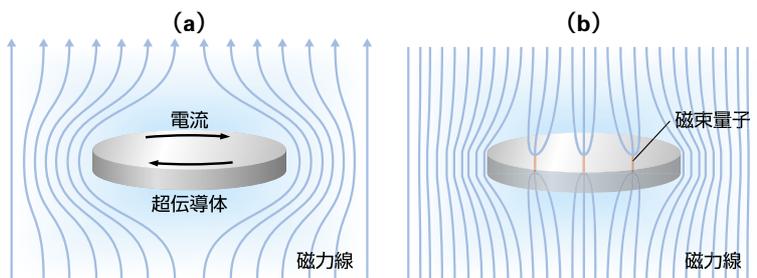
量子コンピュータ、超高速計算の仕組み

磁束量子は、電子や光子のような物質やエネルギーの最小単位である「量子」の一種だ。Noriチームリーダーたちが目指す、量子を操り新しい機能を生み出す研究の究極のゴールの一つが、量子コンピュータである。量子コンピュータは現在のスーパーコンピュータが数千年かかっても解けない問題を、わずか数十秒で解くことができると期待されている。

現在のコンピュータは、“0”と“1”を表すビットを論理ゲートで操作して計算を行う。例えば、二つのビットに“0”と“1”を入力し、論理ゲートで操作して“0”と“0”という答えを出力する。

量子コンピュータも、ビットを論理ゲートで操作して計算するという仕組みは同じだ。ただし、量子はさまざまな状態を共存できるという、量子の本質的な現象を利用して、膨大な量の計算を同時に処理する。まず、“0”と“1”の状態を共存させた「量子ビット」をつくる。従来のコンピュータの一つのビットに一度に入力できるのは“0”か“1”のどちらかだが、量子ビットは、“0”と“1”の状態を同時に表現できる。さらに、二つの量子ビットを論理ゲートで相互作用させると、“00”“01”“10”“11”という順列組み合わせで可能な4通りの状態が同時にでき、並列処理できる。従来のコンピュータでは4回の入力・計算が必要なところが、一度で済むわけだ。このように複数の量子ビットを相互作用させることを、「量子絡み合わせ」と呼ぶ。20個の量子ビットの量子絡み合わせを行えば、2の20乗で約100万通り、N個のビットでは2のN乗通りの状態が同時に表現でき、並列処理できる。

図1 磁束量子



超伝導体は磁場を排除する性質がある(a)が、ニオブや高温超伝導体に強い磁場がかかると、磁力線が束ねられて極細の糸のような形で貫く「磁束量子」ができる(b)。

図2 ラチェット構造の例



ボールはAの方向には動かしやすいが、反対のBの方向には、急な上り坂があるため動かしにくい。

2001年、米国の研究者たちが液体中の分子を利用した7個の量子ビットにより、15を3と5に素因数分解する実験に成功した。実際に量子コンピュータの仕組みで計算が行えることが実証されたのだ。ただし、量子コンピュータで実用的な計算問題を解くには、数百個以上の量子ビットを集積する必要がある。液体中の分子や原子を利用した量子ビットでは、集積のためのよいアイデアが現在のところない。

超伝導体で量子コンピュータをつくる

ツイスタフォニク

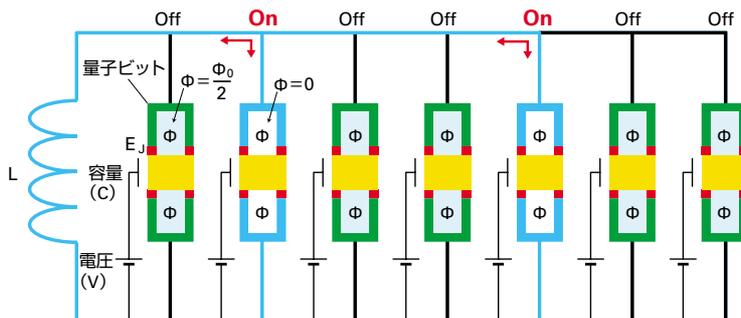
1999年、蔡兆申博士率いる日本電気(株)のグループが、超伝導体の固体素子(ジョセフソン素子)で量子ビットをつくることに世界で初めて成功した。固体素子は、量子ビットの集積や回路の設計がしやすいため、実用化により有利だと考えられている。蔡博士は単量子操作研究グループ 巨視的量子コヒーレンス研究チームのチームリーダーに就任。2002年に二つの量子ビットの量子絡み合いを起こす論理ゲートの作製に成功した。デジタル・マテリアル研究チームは、その実験データを解析して実際に量子絡み合いが起きていることを確認した。

量子コンピュータの実用化には、量子ビットをたくさん集積し、特定のビットの量子絡み合いを起こして計算する必要がある。2002年に蔡チームリーダーらがつくった論理ゲートは、二つの量子ビットを直接つなげて量子絡み合いを起こす。ただし、これでは隣り合う量子ビット同士しか量子絡み合いが起きない。Noriチームリーダーらは、複数の量子ビットを共通のコイル構造(インダクタンス)などでつなぐことで、計算処理の対象となる特定の量子ビットを、効率よく選択的に相互作用させる回路のデザインを提案した(図3)。このデザインならば、実用化に必要な数百個の量子ビットを集積し、特定のビット同士の量子絡み合いを起こすことが理論上可能だ。現在、世界中でさまざまな方法による量子コンピュータの研究が行われているが、量子絡み合いの実現は難しく、そのための回路のアイデアは限られている。主要なアイデアのいくつかは、デジタル・マテリアル研究チームから提案されたものだ。

今後の課題をNoriチームリーダーは次のように語る。「特定の量子ビットの量子絡み合いを素早く、しかもほかの量子ビットに影響しないように起こす必要があります。それが難しいのです。量子絡み合いが実際に起きているのかどうかを確かめたり、答えを導き出し読み取ることも大きな課題です。固体素子には製造上の誤差が必ずありますが、そ

今、私たち科学者にとって、
量子コンピュータは
最もエキサイティングな研究テーマです。

図3 量子ビットを集積するための回路のデザイン



複数の量子ビットを共通のコイル構造(インダクタンス:L)でつなぐことで、必ずしも隣り合っていない特定の量子ビット間の結合を“On”にして量子絡み合いを起こすことができる。

れを考慮し、きちんと計算させるための計算手順(アルゴリズム)の開発も必要です」

Noriチームリーダーらは、これらの極めて難しい課題を克服するための新しいアイデアを次々に発表している。斬新なアイデアはどのようにして生み出されるのか。「理論家は部屋にこもって研究するというスタイルが多いのですが、さまざまな分野の専門家がいる私たちのチームは、実験系チームと活発に議論しながら研究を進めています。ビジターも世界中からひっきりなしにやっています。ダイナミックな交流が、私たちのチームの強みです」

最後に、Noriチームリーダーに量子コンピュータ実用化の見通しを聞いた。「量子コンピュータの研究は始まったばかりで、まだ実用化の具体的な時期をいえる段階ではありません。量子コンピュータを実用化するには、私たちが今、研究対象としているジョセフソン素子がいいのか、別のものもいいのかも分かりません。まだ、すべてに可能性が開かれています。だからこそ今、量子コンピュータは私たち科学者にとって最もエキサイティングな研究テーマなのです」

R

取材協力: デジタル・マテリアル研究チーム 丸山耕司客員研究員

関連情報:

- 2005年8月17日プレスリリース (<http://www.riken.jp/r-world/info/release/press/2005/050817/index.html>)
- 2002年10月23日プレスリリース (<http://www.riken.jp/r-world/info/release/press/2002/021023/index.html>)