永久電流アトムチップによるボース・アインシュタイン凝縮

量子力学の特異な性質を利用して，従来技術を凌駕するデバイスを目指した「超伝導永久電流アトムチップ」を用いて，私たちは原子の巨視的な量子状態を実現することに成功しました．本稿では当初の予測に反する超伝導アトムチップの奇妙な振る舞いに悩まされながらも，幾多の問題を克服し，極めて安定なボース・アインシュタイン凝縮をチップ上で実現した技術について紹介します．

向井（むかい） 哲哉（てつや）　/今井（いまい） 弘光（ひろみつ）

NTT物性科学基礎研究所

原子を用いた量子デバイスへの挑戦

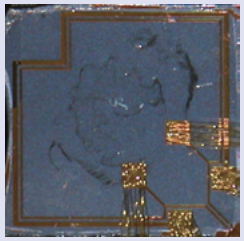
ミクロの世界を説明するために考えられた量子力学は，日常的な常識で考えると，どうにも不思議な性質を持っています．例えば，「0」か「1」かの決定的な状態ではなく，「0」でもあり「1」でもある「重ね合わせ」と呼ばれる確率的な状態の存在です．このような量子力学の特異な性質を利用すれば，従来型の計算機よりも桁違いに高速な演算や原理的に安全な暗号通信ができると考えられています．この夢の技術には「量子デバイス」，すなわち，量子状態を安定に保存するための量子メモリと，量子状態を制御する量子ゲートを手に入れることが不可欠です．その実現に向けて，世界中でさまざまな方法が試みられていますが，私たちは原子を用いる方法でその開発に挑戦しています．

原子を用いる量子デバイスの開発については，2007年に本誌特集記事にて「超伝導永久電流アトムチップ」の実現を中心に解説しています[1]．当時の記事では，ピストルの弾丸のように高速で飛行する原子をレーザの光で減速，すなわち，冷却して，超伝導永久電流がつくる極めて安定な磁場でチップ上に捕捉する技術までを詳しく紹介しています．本稿で紹介する技術は，その延長線上にある技術で，当初は予想もしていなかったさまざまな問題に直面しつつも，その問題を克服することで，超伝導アトムチップ上に巨視的な量子状態のボース・アインシュタイン凝縮（BEC: Bose-Einstein Condensation）＊1を生成することに成功しました．BECは，極めて特異な性質に対する科学的な興味から，現在もさかんに研究が行われていますが，今回非常に安定なチップ上にBECを実現したことにより，工学的な応用にも道が拓けてきました．特にBECは，光の世界のレーザのように位相のそろった波として振る舞うことから，量子メモリや量子ゲートの初期状態として利用することが期待されています．現在は，まだ量子デバイスへの扉を叩いた段階に過ぎませんが，新しい技術を開発する際に直面した問題と，その解決法を振り返りながら，本技術の特徴を紹介したいと思います．

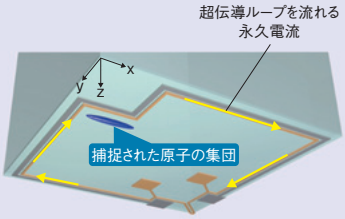
＊1　ボース・アインシュタイン凝縮：ボース粒子（1つの量子状態を占有できる粒子数に制限がない粒子）気体を，状態数の少ない低温に冷却した結果，すべての原子が最低エネルギー状態に落ち込んだ状態．1995年に米国で初めて実験が成功し，2001年にノーベル物理学賞を受賞しています．

超伝導アトムチップの不思議な振る舞い

超伝導アトムチップは，熱的・電磁気的なノイズが抑えられるため，原子を安定に捕捉できることが特徴の1つと考えられています．超伝導アトムチップ（**図1**）を用いて原子の捕捉に



(a)　超伝導永久電流アトムチップ



(b)　チップで原子を捕捉する模式図

図1　超伝導永久電流アトムチップ

成功した私たちは[2]，その安定性を実証するために，原子の捕捉寿命を計測してみました．その結果，従来技術の約10倍に寿命が延びていることは確認できたのですが，これは私たちの予想を大幅に下回る結果でした[3]．理論上の計算によれば，超伝導アトムチップ上の捕捉寿命は従来技術の１万倍以上長くなるはずだと予測されていたからです．それ以外にも，当時は奇妙なデータのバラつきが散見される問題に悩まされていました．後に分かったことですが，これらの不可解な現象は，超伝導の奇妙な振る舞いから引き起こされたものでした．

超伝導アトムチップの研究には，強い磁場を得るために，より大きな電流を駆動できる第２種超伝導体が好んで用いられます．よく知られているように，この第２種超伝導体には，超伝導体の内部に磁束が侵入し，ピン留めされる性質があります．磁束が侵入する条件は，超伝導体に外から加える磁場の強さに依存し，私たちが通常実験で用いる10倍以上の強い磁場を加えなければ，磁束は侵入しません．しかしながら，超伝導体が薄膜形状の場合には，それよりも小さい磁場で磁束は侵入するのです．さらに，超伝導体がある温度以下の場合には，磁束がより侵入しやすくなるうえに，磁束が樹枝形状のパターンを形成する状態に劇的に変化する現象まで起きるのです．これらの現象を私たちは超伝導アトムチップの実験により偶然知ることになりました[4]．当時は，未知の相転移現象を見出したのではないかと驚いたものですが，私たちが確認するわずか数年前に，超伝導の専門家たちにより，別の方法で確認されたばかりの現象であることが判明しました．

原因が分かれば，解決法はおのずとみえてきます．超伝導アトムチップの温度を磁束の侵入が起こらない適切な温度に保つことが解決法となり，その後，超伝導アトムチップは原子を極めて安定に捕捉できる実力を発揮できるようになりました．

蒸発冷却と超伝導ループ回路

超伝導アトムチップで原子を安定に捕捉できれば，BECに至る方法はよく知られています．蒸発冷却と呼ばれる方法で原子をより一層冷却すれば良いのです．蒸発冷却の原理は，熱平衡状態にある原子の集団から，エネルギーの高い原子のみを取り去ることで，残りの原子が再度熱平衡化するときには，より低い温度になるという単純なものです（**図２**）．このとき，エネルギーの高い原子のみを取り去るには，高いエネルギーを持つ原子にのみ共鳴する交流の磁場を照射します．一般のアトムチップでは今でもよく用いられる方法ですが，チップ上に加工した電線に交流の電流を印加することで

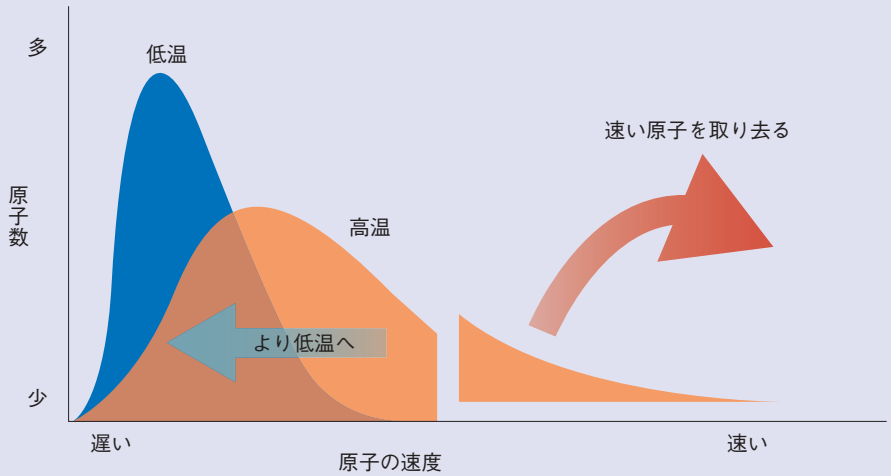


図２　蒸発冷却の模式図

交流磁場を発生させる方法があります．ところが，この方法を採用した私たちは，エネルギーの高い原子のみならず，すべての原子が失われてしまうという問題に直面しました．

全く新しい実験を試みる場合，従来と同じ方法が使えないことは珍しくありません．私たちが独自に開発した超伝導永久電流チップが持つ特性が上記の問題と直接関係していました．

超伝導の閉ループ回路の場合，ループの内側を貫く磁束は保存します．いわゆるフラクソイド保存則*2です．超伝導永久電流チップは，この特性を利用して，チップ上の電線に電源をつながずに永久電流を流すことができます．この最大の利点である永久電流は，必然的に超伝導の閉ループを貫く，チップに垂直な方向の磁場に敏感になるのです．特にチップ上の電線に加えた交流電流が発生する磁場は，超伝導の閉ループを貫く磁場をループの近くで発生させるため，永久電流を強く変調し，原子を捕捉するポテンシャルを不安定にすることが分かりました．

永久電流チップでは，交流磁場の印加法として，チップ上の電線を使えないことが明らかになったことから，私たちはコイルを新たに作成し，チップ面と垂直な向きに取り付けることで，交流磁場が閉ループを貫かないようにして上記の問題の解決を図りました．この方法により永久電流が変調されることがなくなり，蒸発冷却を行うことができるようになりました．

*2　フラクソイド保存則：超伝導体の閉ループ回路の内側を貫く磁束と，その閉ループを流れる電流がつくる磁束との和をフラクソイドと呼び，超伝導状態が続く限り，このフラクソイドの値が変化しないという超伝導体の特徴的な性質．

BECの観測

超伝導永久電流チップ上で生成したBECは，チップから開放された原子集団が重力により落下するときに，トラップ中での速度分布に応じて広がる様子を撮影する飛行時間計測法により観測しました．**図3**は典型的な観測結果です．蒸発冷却を進めるにしたがい，トラップ中での原子の速度は遅くなり，原子集団の広がり方は小さくなります．このとき，マイクロケルビンの低温（図3左）から，ナノケルビンの極低温（図3右）へと温度が下がっています．これと同時に，画像の中心付近に非常に密度の高い領域が現れてきます．この高密度部分がBECに相転移した原子集団です．最終的には，約10万個の原子をすべてBECに相転移させることができました．図3には，トラップの形状を反映した大きな横長の形状から，小さな縦長の形状へと変化するBECの特徴も顕著に現れており，BEC生成の確証の1つとなっています[5]．

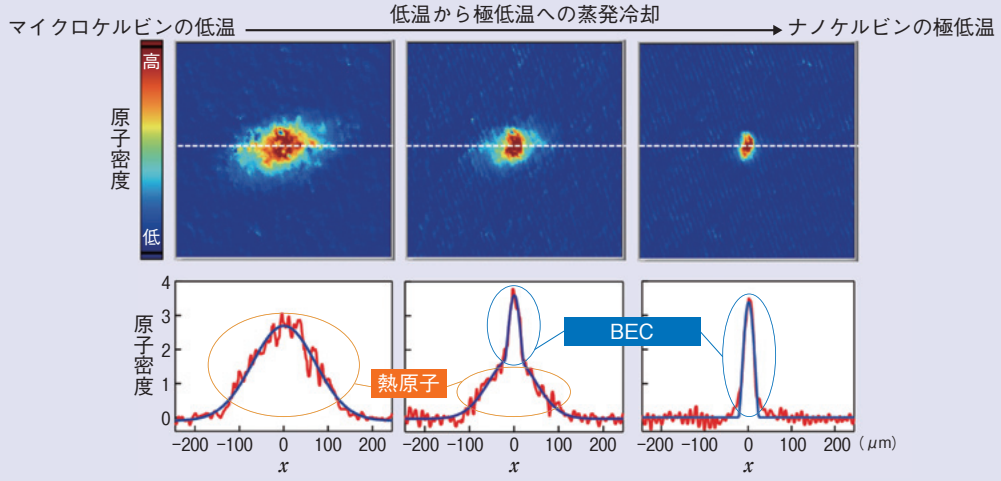
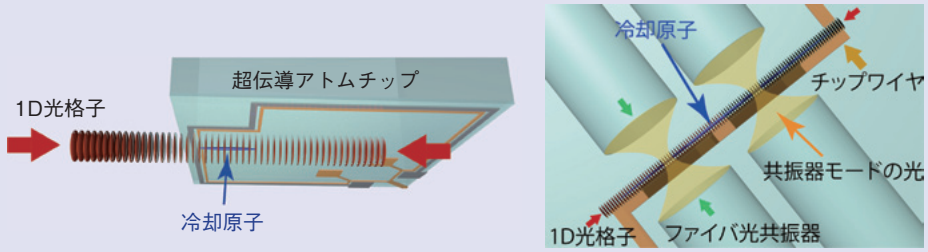


図3　BECが生成する過程の飛行時間計測



(a)　光の定在波（光格子）で原子集団を分割するイメージ図　　(b)　光共振器で光と原子を結合するイメージ図

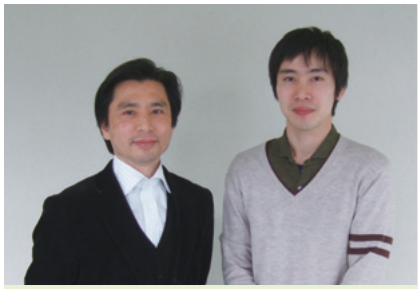
図 4　超伝導チップ上のBECの応用例

今後の展望

今回私たちが生成したBECは，極めて安定な永久電流チップ上に生成されていることが最大の特徴です．環境の変化に敏感な量子状態を，チップ上で長時間安定に保持できる特性は従来技術をはるかに凌駕しています．また，10万個の原子がすべて位相のそろった状態にあるということは，１原子を１つの量子ビットととらえれば，10万個の量子ビットを初期化していると考えることもできます．現在はまだ10万個の原子が１つの集団を形成していますが，**図 4** のように，複数の原子集団に分割して，個々の集団を独立に制御する仕組みを実現すれば，量子デバイスの実現へ，また一歩近づくことでしょう．

■参考文献

(1) 向井：“原子でつくる量子コンピュータ，” NTT技術ジャーナル，Vol.19, No.11, pp.24-27, 2007.
(2) T. Mukai, C. Hufnagel, A. Kasper, T. Meno, A. Tsukada, K. Semba, and F. Shimizu: “Persistent Supercurrent Atom Chip,” Phys. Rev. Lett., Vol.98, No.26, 260407, 2007.
(3) C. Hufnagel, T. Mukai, and F. Shimizu: “Stability of a superconductive atom chip with persistent current,” Phys. Rev. A, Vol.79, No.5, 053641, 2009.
(4) F. Shimizu, C. Hufnagel, and T.Mukai: “Stable Neutral Atom Trap with a Thin Superconducting Disc,” Phys. Rev. Lett., Vol.103, No.25, 253002, 2009.
(5) H. Imai, K. Inaba, H.Tanji-Suzuki, M. Yamashita, and T. Mukai: “Bose-Einstein condensate on a persistent-supercurrent atom chip,” Appl. Phys. B, 2014.



（左から）向井　哲哉/ 今井　弘光

「相反する状態の重ね合わせ」「波として振る舞う粒子」など，一般的な常識で考えると，どうにも不思議な量子力学の世界は，私たちにどんな未来をみせてくれるのでしょう．将来の夢への挑戦を応援してください．

◆問い合わせ先
NTT物性科学基礎研究所
量子光物性研究部
TEL　046-240-3634
FAX　046-240-4722
E-mail　mukai.tetsuya@lab.ntt.co.jp