

アトムチップ

— 基板上で冷却原子を操作する —

中川 賢一^{*,**}・堀越 宗一^{*,†}

Atom Chip: Manipulation of Cold Atoms on a Chip

Ken'ichi NAKAGAWA^{*,**} and Munekazu HORIKOSHI^{*,†}

Atom chips are the atom optics devices in which ultracold atoms and Bose-Einstein condensate (BEC) atoms can be trapped and manipulated on a substrate with magnetic and/or electric field. It will make it possible to realize various atom optics and quantum optics experiments including atom interferometer and quantum information processing on a small chip. In this review paper, we describe the principle of the guiding and manipulating atoms using current-carrying wires on an atom chip and also the fabrication of atom chip, and we will show about the applications of atom chips including BEC interferometers for the precision measurements and the quantum information processing.

Key words: atom chip, atom optics, BEC, laser cooling, atomic interferometry

アトムチップとは電子デバイスのように基板上に微細な電極等を作製して電場、磁場または光を用いて極低温原子をガイドおよび操作する原子光学デバイスのことである¹⁾。このようなアトムチップが生まれた背景は、レーザー冷却およびボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) の実現によって $1\mu\text{K}$ 以下の極低温原子の生成および操作が可能になり、これを光と同様に操作する原子光学の研究が近年著しく発展してきたことにある。この原子光学においては極低温原子を粒子および物質波として操作することで原子干渉計による精密計測や量子エンタングルメントなどの特異な量子状態の実現が可能になってきた²⁾。このような原子光学の研究においてはより高度で複雑な原子の操作が必要となり、これらの要求を満たすものとしてアトムチップが注目されている。アトムチップは従来の原子物理および原子光学の世界を電子デバイスや光デバイスと同様のマイクロおよびナノスケールの世界と融合することを可能にするもので、量子コンピューターなどの量子情報処理への応用が期待されている。量子コンピューターには高精度な

原子および光の量子状態の操作が必要とされるが、これにはアトムチップで実現可能となる微細かつ複雑な原子の操作技術が最適である。また、アトムチップを用いれば量子ドットや SQUID などの量子デバイスの原子版を実現することが可能になり、高感度センサーや単一光子源などに応用することが期待できる。本解説では、このアトムチップの原理およびこれを用いた BEC 原子の生成および干渉計の実験を紹介し、最後に量子情報処理への応用に向けた最近の研究および課題を議論する。

1. アトムチップの原理

アトムチップの基本は基板上に作られる微細なポテンシャルを用いて極低温原子をガイドおよび操作することであり、これには磁場、電場を用いた方法がすでに実現されている。ここでは多くのアトムチップで用いられている電線を通る電流が作る磁場を用いた微細なポテンシャルの実現方法を示す。

スピン μ_m をもつ原子に対する磁場ポテンシャルは

* 電気通信大学レーザー新世代研究センター (〒182-8585 調布市調布ヶ丘 1-5-1) E-mail: nakagawa@ils.uec.ac.jp

** 科学技術振興機構 CREST (〒332-0012 川口市本町 4-1-8)

† 現所属: 科学技術振興機構 ERATO 上田マクロ量子制御 (〒113-8656 東京都文京区弥生 2-11-6)

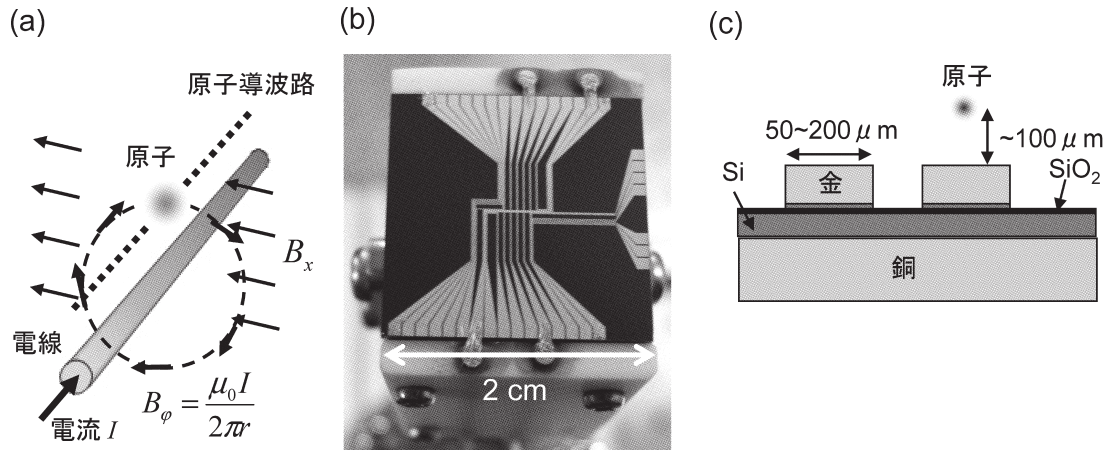


図1 アトムチップ。(a) 電線を通る電流が作る磁場による原子導波路、(b) アトムチップの基板、(c) 電極の構造。

$U(\mathbf{r}) = -\boldsymbol{\mu}_m \cdot \mathbf{B}(\mathbf{r}) = \mu_B g_F m_F B_z$ で与えられる。ここで μ_B はボーア磁子、 g_F は g 因子、 m_F は磁気量子数、 B は磁場の大きさを表す。また、原子の状態が $g_F m_F > 0$ の場合 (weak-field-seeking state), 原子は磁場の最小値に向かう力を受ける。このため三次元的に磁場が最小になるような磁場配置を実現することにより、原子を安定に三次元的に閉じ込めることが可能となる。また、二次元的に磁場の大きさが最小になるような磁場を作ることにより、原子を一次元的にガイドする原子導波路が実現できる。このような磁場配置は、電線を通る電流が作る磁場を用いることにより簡単に実現できる³⁾。電線を通る電流は電線に垂直な方向に大きさ $B_\phi = \mu_0 I / 2\pi r$ の磁場を作る。これに電線に垂直な方向に一樣な磁場 B_x を加えると電線に沿って電線から $10 \sim 100 \mu\text{m}$ 程度離れた位置で磁場がゼロになり、原子を電線に沿ってガイドする原子導波路が実現される (図1 (a))。実際には磁場が完全にゼロになると原子はスピンフリップを起こしてトラップから逃げてしまうため、これを防ぐために電線に平行な方向にも弱い磁場を加える。このようにして得られる磁場ポテンシャルは電線からの距離 r を小さくすることにより非常に大きな磁場勾配が得られるため、 $1 \mu\text{m}$ 以下の幅の微細な電線パターンを用いれば原子を 100 nm 以下の領域に閉じ込めて操作することが可能になる。

アトムチップではおもにフォトリソグラフィ技術を用いて基板上に微細な電線パターンを作製する。基板材料としては絶縁体で電線からの発熱を効率よく放熱するため熱伝導性が高いことが求められ、シリコン、サファイヤ、窒化アルミ (AlN) などが用いられる。電極材料としては、電流による発熱を小さくするため電気伝導率が高い銅、金、アルミなどが用いられる。図1 (b) にアトムチップの

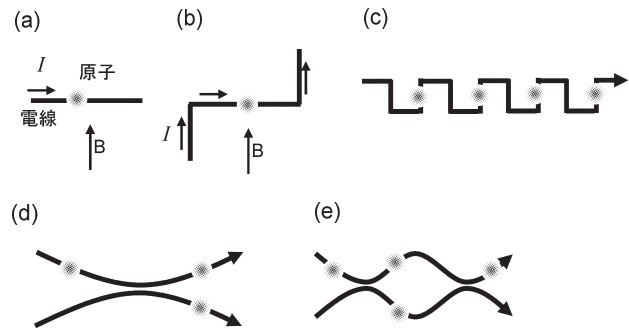


図2 アトムチップ上の原子光学素子。(a) 導波路、(b) 3D トラップ、(c) 1D アレイ型トラップ、(d) ビームスプリッター、(e) 干渉計。

基板の例を示す。フォトリソグラフィで作製したマスクを用いてまず金を蒸着し、次に鍍金によってこの金電極の厚みを $10 \mu\text{m}$ まで厚くする (図1 (c))。このように作製された電線パターンには数 A 程度の電流を流すことができる。なお、この電流の上限はジュール熱による温度上昇による圧力の上昇や電線の切断によってその限界が与えられる。

このように基板上に作製された微細な電線パターンを用いることにより、先に述べたように原子を電線に沿ってガイドする原子導波路 (図2 (a))、三次元的に原子を閉じ込めるトラップ (図2 (b))、およびアレイ状のトラップを実現することが可能である (図2 (c))。さらに、2つの原子導波路を近づけることにより原子を2つに分けるビームスプリッターが実現可能で (図2 (d))、これを複数組み合わせれば原子干渉計を実現することも可能になる (図2 (e))。

2. アトムチップによる BEC の生成

アトムチップ上のマイクロ磁場トラップで操作可能な原

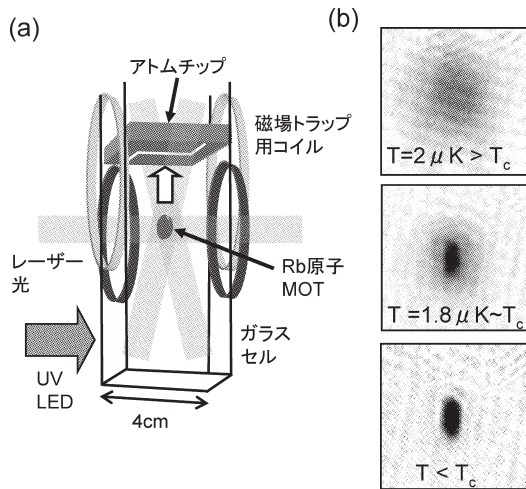


図3 (a) アトムチップを用いた BEC 生成装置。(b) 蒸発冷却の最終温度 T を変えて測定した原子雲の TOF 吸収像 (上中下図)。

子は温度 $100 \mu\text{K}$ 以下の極低温原子である。このため通常レーザー冷却を用いて、真空チェンバー内で冷却された原子をチップ上のマイクロ磁場トラップにロードする。さらに後で述べる原子干渉計においては、コヒーレントな物質波である BEC を用いる必要があり、原子の温度をさらに $1 \mu\text{K}$ 以下に冷却する必要がある。アトムチップの技術はこの BEC の生成にも大きなメリットがある⁴⁾。チップ上の微小な磁場ポテンシャルを用いることにより比較的容易に高い原子密度が得られ、これは原子の弾性衝突レートを高くすることになり BEC 生成における蒸発冷却のスピードを大きく向上させる。筆者らはこのアトムチップを用いて 3 秒以下の高速な BEC 生成を実現したが、これは従来の大型の磁場トラップを用いた方法に比べて生成時間を 1 桁以上短縮したことになる⁵⁾。

図 3 (a) にアトムチップを用いた BEC 生成装置を示す。先のアトムチップの基板は、 10^{-10} Torr 以下の超高真空中にひかれたガラスセルの中に電極面を下にして取り付けられている。まず、ガラスセル中の室温の ^{87}Rb 原子をレーザー冷却によって $100 \mu\text{K}$ 以下に冷却して磁気光学トラップ (MOT) に 3×10^7 個以上集める。次に、この冷却 Rb 原子を磁場トラップに移し、さらに複数の磁場コイルを用いて原子をチップ表面から 1mm 以下まで近づけアトムチップのマイクロ磁場トラップに移す。電線に流す電流を増やすことによりチップ上の原子は圧縮されて表面近傍に近づけられ、RF 磁場による蒸発冷却によって転移温度の $1.8 \mu\text{K}$ 以下に冷却することにより最終的に BEC が生成される (図 3 (b))。このような方法で、最短で 0.8 秒間の蒸発冷却、磁気光学トラップによる予備冷却およびチップへの

輸送の時間を含めても、3 秒以下で BEC を生成することが可能である。また、蒸発冷却時間を長くして最適化することにより、最大 20000 個程度の BEC 原子を生成することができる⁵⁾。このアトムチップを用いた BEC 生成は従来の大型の磁場トラップを用いた方法に比べ非常に再現性よく BEC を作ることができるため、生成速度の速さと合わせて BEC を用いたさまざまな実験を非常に効率よく短時間で行うことを可能にする。

3. アトムチップ上の干渉計

アトムチップを用いることにより極低温原子や BEC 原子を基板上で自由自在に操作できるため、このチップ上に原子干渉計を実現して加速度計やジャイロスコープなどの高感度センサーに利用することに興味もたれている。この原子干渉計においては原子と外力との間の相互作用時間が検出感度を定めるが、自由空間では重力による自由落下によりこの相互作用時間は 1 秒程度が限界である。これに対して、アトムチップなどで作られる磁場トラップにトラップされた原子を用いれば、重力の影響を受けずにこれを 1 秒以上に延ばすことが可能となり検出感度の大きな向上が期待できる。

最初のアトムチップ上の BEC 原子を用いた干渉計は、コロラド大学の JILA 研究所のグループが実現した⁶⁾。この実験では、チップ上のマイクロ磁場導波路中の BEC 原子に導波路に沿った方向に光定在波パルスを入射して原子を回折することにより、原子のビームスプリッターおよびミラーを実現して原子のマイケルソン干渉計を構成した。この実験によって、温度 $1 \mu\text{K}$ 以下の BEC 原子が室温のアトムチップ基板近傍 ($\sim 100 \mu\text{m}$) の導波路中を伝播しているにもかかわらず、基板等の熱雑音の影響を受けずに 20% 以上の高いコントラストの干渉信号が得られることがはじめて示された。その後、電気通信大学においても、JILA とほぼ同様のアトムチップ上の BEC 干渉計を実現して干渉信号のコントラスト低下の原因を調べた (図 4)⁷⁾。BEC 原子は最初の $\pi/2$ パルスにブラッグ回折によって 2 つの運動量状態 ($p=0$, $p=2\hbar k$) に分けられ、次に π パルスによって各成分は反射され、再び $\pi/2$ パルスによって 2 つの成分が結合することによりマッハ・ツェンダー型原子干渉計が構成されている (図 4 (a))。干渉信号は、終状態の各運動量成分の原子数を吸収像より測定することにより得られる (図 4 (b))。また、2 番目の $\pi/2$ パルスの対向する光の位相差 ϕ を変化させて干渉計の 2 つの運動量成分間の位相差を変えて測定することにより干渉フリンジが得られる (図 4 (c))。実験の結果、相互作用時間が短い

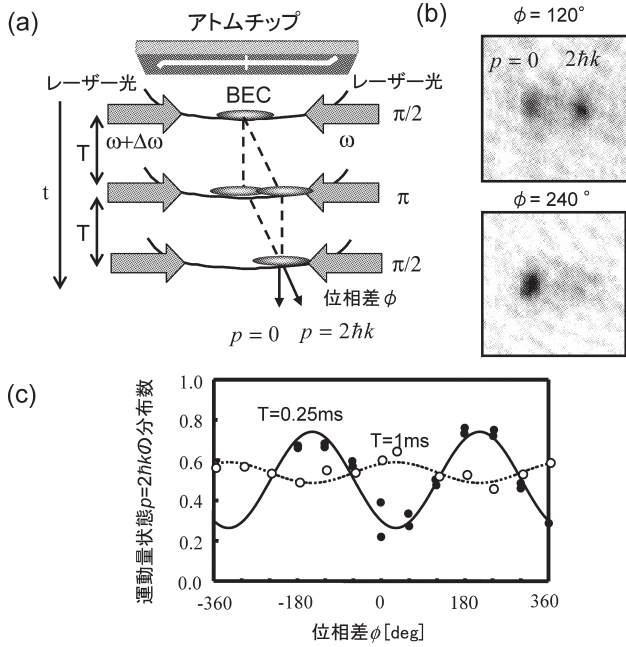


図4 (a) 3パルス ($\pi/2$ - π - $\pi/2$ パルス) からなるアトムチップ上のマッハ・ツェンダー型原子干渉計. (b) 各位相差における干渉計の終状態の2つの運動量状態 ($p=0$, $p=2\hbar k$) の分布. (c) パルス間隔 T が 0.25 ms (●) および 1 ms (○) のときの干渉フリンジ信号.

場合 (パルス間隔 $T=0.25$ ms), 50% 以上の高いコントラストの干渉信号が得られたが, 相互作用時間が長くなると ($T=1$ ms), コントラストが大きく低下することが確認された. これは理論的な考察の結果, 原子が導波路中を伝播する際, 原子間の斥力相互作用および軸方向の閉じ込めポテンシャルによって原子の速度が変化し, これが位相ずれ (ディフェージング) を引き起こして干渉信号のコントラスト低下を生じさせていることがわかった.

そこで, このポテンシャルによる速度変化の影響を回避する新奇な原子干渉計を考案した (図5)⁸⁾. これは調和振動ポテンシャル中の原子の速度が振動の周期時間後に再びもとの速度に戻ることを利用したもので, ポテンシャルの振動周期 T に一致して2つの光パルスを加えて原子の分割および再結合を行うことにより, 原子の速度変化の影響を受けずに干渉計を構成することができる (図5 (a)). 一方, BEC 原子は原子密度が高いため原子間の相互作用が一般的に無視できないが, 非調和項が十分小さい調和振動ポテンシャルにおいては BEC の内部運動 (集団振動) と外部運動 (重心運動) は結合しないため, 原子間相互作用による内部運動の励起およびこれに伴う干渉信号のコントラスト低下は十分小さいことが予想される. 実際にこのような方法を用いて光パルスの間隔 $T=58.66$ ms において実験を行ったところ, 30% 以上の高いコントラストの干

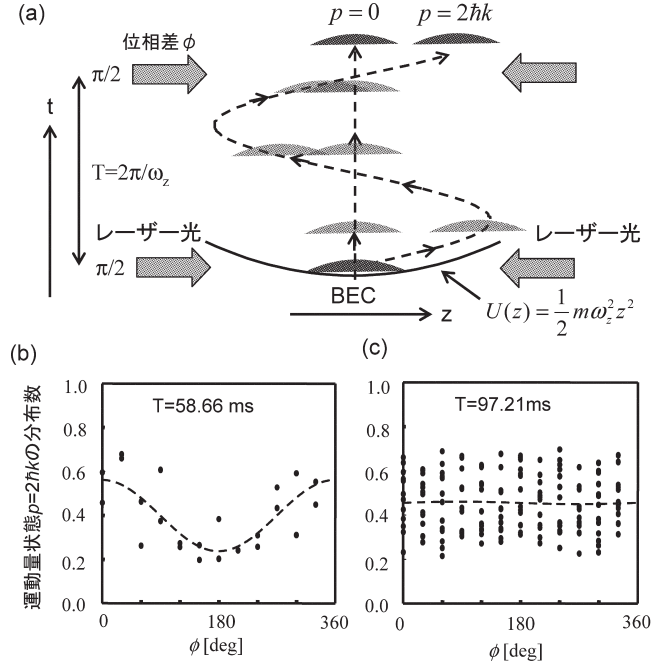


図5 (a) 2つの $\pi/2$ 光パルスからなる調和振動ポテンシャル中の原子干渉計. (b) パルス間隔 $T=58.66$ ms における干渉信号. (c) パルス間隔 $T=97.21$ ms における干渉信号.

渉信号が得られた (図5 (b)). これによってトラップ原子を用いた干渉計において原子と外場との相互作用時間を十分長くできることが示され, その長い相互作用時間を生かした高感度センサーが実現可能になるものと期待される. 実際, 今回実現された原子干渉計は共振型の加速度計として働くことが干渉信号の理論的な解析により明らかになった. これはよく用いられるバネにつけた重りの変位を測定するタイプの加速度計のバネを磁場ポテンシャルに, 重りを原子に置き換えたものとみなすことができる. 実験においてもパルス間隔を約 100 ms まで長くしたところ, ランダムに大きく変動する干渉信号が観測され (図5 (c)), これは床から伝わる振動によって干渉信号の位相がランダムに変調されたものと考えられる. パルス間隔が 100 ms の場合, この干渉計はその逆数の周波数 10 Hz 付近に感度のピークをもつ加速度計として働くが, 光学定盤の防振性能が落ちる 10 Hz 以下の低周波数域の床からの振動雑音を干渉計が拾っているものと考えられる⁸⁾.

4. アトムチップの量子情報処理への応用

近年, 量子暗号や量子コンピューターなどの量子情報処理の研究が国内外で盛んに行われているが, 極低温原子を量子情報に応用することに多くの関心が寄せられている. この理由として, 原子の内部状態を量子ビットとして用いることにより, 半導体や超伝導などの電子デバイスに比べ

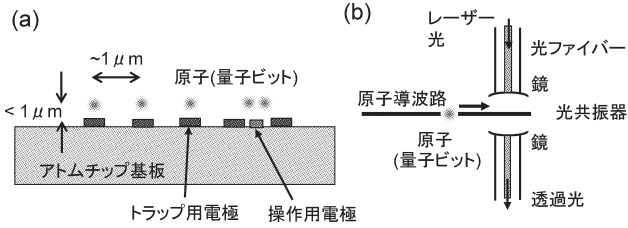


図6 アトムチップを用いた量子情報処理。(a) チップ上での量子ビットの操作、(b) 光共振器を用いた原子(量子ビット)の状態検出。

て周囲環境の影響を受けにくく、長いコヒーレンス時間が期待できること、また原子は内部構造をもつため、操作の自由度が高く、多様な量子ゲート操作が実現しやすい点が挙げられる。今までに、光格子とよばれる光定在波ポテンシャル中の BEC 原子を用いて量子コンピューターの実現に向けた基礎実験が行われている²⁾。しかし、光格子の場合、原子を1個ずつ独立に操作および検出することが難しく、本格的な量子演算を行うには限界がある。これに対して、アトムチップを用いれば先に示したようなアレイ型のマイクロ磁場トラップを用いて原子を1個ずつトラップし、さらにこれらの原子を独立に操作することが可能になるものと期待される(図6(a))⁹⁾。

原子1個レベルの操作には $1\mu\text{m}$ 以下のマイクロ磁場トラップが必要になるが、このためには原子を基板から $1\mu\text{m}$ 程度離れた位置にトラップする必要がある(図6(a))。しかし、先に述べた電流による磁場トラップにおいては、原子が基板(電極)に近づくにつれて原子のトラップ寿命が短くなるという表面問題があることが明らかになってきた¹⁰⁾。これは室温の電線中の電子の熱ゆらぎによって磁場がゆらぎ、原子のスピンフリップを引き起こして原子をトラップから逃がしてしまうもので、原子が金属表面から $10\mu\text{m}$ 以下に近づくとも顕著に現れる。このような表面問題を低減するには、電極材料の電気伝導度を低くする、電極の厚みをスキンドープス以下に薄くする等が考えられる。また、超伝導磁石を用いれば、本質的にこの電流のゆらぎの影響を受けない。このような超伝導を用いたアトムチップは最近実現されており^{11,12)}、その詳細は本特集の向井氏の「最近の技術から」を参照してもらいたい。超伝導磁石の代わりに永久磁石を使うことによっても電流のゆらぎを回避でき、この場合装置を極低温に冷却する必要がなく、すでにいくつかのグループで実験が行われている^{13,14)}。光磁気ディスクやハードディスクなどに用いられている磁性薄膜材料を用いて、これに磁場パターンを書き込むことにより任意の磁場ポテンシャルを実現することができる。しかし、永久磁石のみではダイナミックに磁場ポ

テンシャルを変化させることができないため、電流による磁場と組み合わせる必要がある。また、現状の磁性体材料の問題点としては、磁区の構造などにおいて一様でスムーズな磁場を実現するのが難しい点が挙げられる¹⁴⁾。それでも、表面から $10\mu\text{m}$ 以下においても表面の影響を受けずに長いトラップ時間が実現されている¹³⁾。

量子コンピューターにおいては演算結果を得るために各量子ビットの量子状態を観測する必要があり、原子1個レベルの状態検出が必要となる。これを実現するひとつの方法として、高フィネスの光共振器を用いて共振器中の原子1個の吸収を測定する方法が考えられている(図6(b))。共振器を用いることにより吸収信号がフィネス倍増大するため、原子1個の吸収を検出することが可能になる¹⁵⁾。なお、チップ上に微小な光共振器を実現する方法としては、光ファイバー端面に鏡を施して平行に配置する方法が提案されている⁹⁾。

量子コンピューターにおいて最も重要なのは、複数の量子ビット間の量子相関(エンタングルメント)の実現にある。先の BEC 原子を用いた光格子の実験においては、基底状態の原子間の相互作用(弾性衝突)を用いて複数の原子間の量子相関が実現されたが、この相互作用は基底状態においては非常に小さいため原子同士を 100nm 以下に近づける必要がある。また、この相互作用エネルギーが量子ビットのゲート操作の速さを決めるため、基底状態原子ではこれは周波数にして 1kHz 程度となり、これ以上高速なゲート操作を実現するのは非常に難しい。この原子間相互作用を大きくする方法のひとつとして、原子の高い励起状態のリュードベリ状態を用いる方法が提案されている¹⁶⁾。主量子数 n が大きくなるとリュードベリ状態は n に比例した大きな双極子モーメントをもっているため、非常に大きな双極子-双極子相互作用が期待できる。これにより、原子間の距離が $1\mu\text{m}$ 以上においても 10MHz 以上の大きな相互作用が得られるため先のアトムチップで実現可能な $1\mu\text{m}$ 程度のマイクロトラップが利用でき、また 10MHz 以上の高速なゲート操作が期待できる。

アトムチップを用いた BEC の生成および原子干渉計、また量子情報処理への応用に向けた展望を紹介してきたが、最近では BEC だけでなくフェルミ縮退原子の生成や分子のガイドの実験も報告されており¹⁷⁾、アトムチップは今後ますます広く応用されるものと考えられる。このアトムチップの技術によって、BEC および極低温原子の実験が比較的容易に実現できるようになり、海外では年々多くの研究者が新たに参入してきている。日本においても、こ

のアトムチップを用いた BEC および極低温原子を用いた新奇な実験のアイデアが数多く生まれることを期待したい。

本研究の一部は文部科学省科学研究費基盤研究 (B) (課題番号 17340120), (財)日本宇宙フォーラム「宇宙環境利用に関する地上研究公募」プロジェクトの支援のもとに行われた。

文 献

- 1) R. Folman, P. Kruger, J. Schmiedmayer, J. Denschlag and C. Henkel: "Microscopic atom optics: From wires to an atom chip," *Advances in Atomic, Molecular, and Optical Physics*, Vol. 48, eds. B. Bederson and H. Walther (Academic Press, Amsterdam, 2002) pp. 263-356.
- 2) O. Mandel, M. Greiner, A. Widera, T. Rom, T. W. Hänsch and I. Bloch: "Controlled collisions for multiparticle entanglement of optically trapped atoms," *Nature*, **425** (2003) 937-940.
- 3) J. Reichel: "Microchip traps and Bose-Einstein condensation," *Appl. Phys. B*, **75** (2002) 469-487.
- 4) W. Hansel, P. Hommelhoff, T. W. Hänsch and J. Reichel: "Bose-Einstein condensation on a microelectronic chip," *Nature*, **413** (2001) 498-501.
- 5) M. Horikoshi and K. Nakagawa: "Atom chip based fast production of Bose-Einstein condensate," *Appl. Phys. B*, **82** (2006) 363-366.
- 6) Y.-J. Wang, D. Z. Anderson, V. M. Bright, E. A. Cornell, Q. Diot, T. Kishimoto, M. Prentiss, R. A. Saravanan, S. T. Segal and S. Wu: "Atom Michelson interferometer on a chip using a Bose-Einstein condensate," *Phys. Rev. Lett.*, **94** (2005) 090405.
- 7) M. Horikoshi and K. Nakagawa: "Dephasing due to atom-atom interaction in a waveguide interferometer using a Bose-Einstein condensate," *Phys. Rev. A*, **74** (2006) 031602 (R).
- 8) M. Horikoshi and K. Nakagawa: "Suppression of dephasing due to a trapping potential and atom-atom interactions in a trapped-condensate interferometer," *Phys. Rev. Lett.*, **99** (2007) 180401.
- 9) P. Treutlein, T. Steinmetz, Y. Colombe, B. Lev, P. Hommelhoff, J. Reichel, M. Greiner, O. Mandel, A. Widera, T. Rom, I. Bloch and T. W. Hänsch: "Quantum information processing in optical lattices and magnetic microtraps," *Fortschritte der Physik*, **8-10** (2006) 702-718.
- 10) M. P. A. Jones, C. J. Vale, D. Sahagun, B. V. Hall and E. A. Hinds: "Spin coupling between cold atoms and the thermal fluctuations of a metal surface," *Phys. Rev. Lett.*, **91** (2003) 080401.
- 11) T. Nirrengarten, A. Qarry, C. Roux, A. Emmert, G. Nogues, M. Brune, J.-M. Raimond and S. Haroche: "Realization of a superconducting atom chip," *Phys. Rev. Lett.*, **97** (2006) 200405.
- 12) T. Mukai, C. Hufnagel, A. Kasper, T. Meno, A. Tsukada, K. Semba and F. Shimizu: "Persistent supercurrent atom chip," *Phys. Rev. Lett.*, **98** (2007) 260407.
- 13) C. D. J. Sinclair, E. A. Curtis, I. Llorente-Garcia, J. A. Retter, B. V. Hall, S. Eriksson, B. E. Sauer and E. A. Hinds: "Bose-Einstein condensation on a permanent-magnet atom chip," *Phys. Rev. A*, **72** (2005) 031603(R).
- 14) S. Whitlock, B. V. Hall, T. Roach, R. Anderson, M. Volk, P. Hannaford and A. I. Sidorov: "Effect of magnetization inhomogeneity on magnetic microtraps for atoms," *Phys. Rev. A*, **75** (2007) 043602.
- 15) I. Teper, Y.-J. Lin and V. Vuletić: "Resonator-aided single-atom detection on a microfabricated chip," *Phys. Rev. Lett.*, **97** (2006) 023002.
- 16) D. Jaksch, J. I. Cirac and P. Zoller: "Fast quantum gates for neutral atoms," *Phys. Rev. Lett.*, **85** (2000) 2208-2211.
- 17) S. Aubin, S. Myrskog, M. H. T. Extavour, L. J. LeBlanc, D. McKay, A. Stummer and J. H. Thywissen: "Rapid sympathetic cooling to Fermi degeneracy on a chip," *Nature Phys.*, **2** (2006) 384-387.

(2008年2月12日受理)