

論文の内容の要旨

論文題目： シュタルク・アトムチップによる中性原子の運動制御

氏名： 蜂須 英和

1. 研究の背景

近年のエレクトロニクスとフォトニクスの目覚ましい発展は、これらの情報の担体である電子・光子の制御技術が成熟したことによる。このアナロジーから、より多様な自由度を持つ原子の高度な制御技術の確立により、アトムロニクスとも言うべきより高度な情報処理系の構築が期待される。

原子の制御ツールには、イオンに対するクーロン力やローレンツ力、中性原子に対するゼーマン効果やシュタルク効果がある。イオンには比較的相互作用の強いクーロン力やローレンツ力が働くため、イオンは中性原子に比べて扱い易く、その研究は早くから行われていた。これに対し、電荷を持たない中性原子の運動制御は磁気双極子モーメントや電気双極子モーメントを通して行うため、イオンのような荷電粒子を扱うほど容易ではない。しかし、レーザー冷却技術の発達で運動エネルギーの小さい原子を用意することを可能にし、近年その制御が研究されるようになった。1995年のアルカリ原子のボーズ・アインシュタイン凝縮（BEC）実現の成功は、自由空間中での原子制御技術の成熟を物語っている一つの例である。

初めて BEC 実現が報告された直後、マイクロチップによる磁気トラップのアイデアが発表された。このトラップは、マイクロチップの配線に流す電流で磁場を発生させ、それと原子スピンとのゼーマン相互作用を基本制御ツールとしている。これを皮切りにマイクロチップ上での原子制御の開発が精力的に進められ、かつては実験室の巨大な装置でしか実現し得なかった実験をマイクロチップというコンパクトな系で行えるようになった。このような原子制御を目的としたマイクロチップをアトムチップと呼んでいる。このアトムチップは進歩著しいマイクロエレクトロニクス技術との融合を図ることで、アトムロニクスの基盤として大きな期待が寄せられた。しかし、原子がミクロンレベルでチップ表面に近付くと、表面で発生した熱的変動磁場（ジョンソンノイズに起因する電流が磁場を発生させる）と原子スピンの結合などによるトラップロスが問題になるようになった。これはトラップの小型化、強いては集積化の困難さを示唆する。

この中性原子の磁場アトムチップ同様、イオントラップに対しても同様の懸念がある。早くからその制御技術が開発されていたイオントラップでも、マイクロチップを使った研究が進められており、その良好な制御性のため、原子系において現在最も高度な制御が行われている。しかし、その制御が容易であることと相反して中性原子の磁場アトムチップ以上に電荷と環境との結合が非常に強いというデメリットもある。

本研究は、イオントラップのような制御をスピンのない状態の中性原子系で実現することで、イオントラップや磁場アトムチップで問題になっている表面との相互作用、及び環境からの外乱にロバストなアトムチップの開発を目的に行った。我々が提案するシュタル

ク・アトムチップでは、微小電極が形成する交替電場による原子のシュタルクシフトを制御ツールとするため、電荷もスピンもない状態の中性原子を扱える。スピンのない状態の中性原子はチップ表面に発生する熱的変動磁場との結合がほとんどないため、この制御技術の確立は外乱による揺らぎが極めて小さい原子トラップ系を構築する。また、トラップに磁場を必要としないので、磁気副準位の自由度が解放される。例えば、ストロンチウム原子の $5s5p^3P_2$ 準安定状態の磁気副準位を使った量子ビットへの応用が考えられる。この場合、スピンを持った状態の原子を扱うことになるが、このトラップには電流が不要であるため電極に抵抗率の大きな素材を使うことができる上、電極層を極限まで薄くすることができる。この結果、チップ表面に発生する熱的変動磁場を抑えることができるので、スピン原子を扱うにも拘わらず表面との相互作用を小さくすることができる。

シュタルク・アトムチップの工学面での特徴は、トラップ原子とチップ表面との相互作用が小さいため、トラップ構造の微細化を可能にすることである。これに加え、構造の微細化に伴って低電圧でのトラップ駆動が可能となるため、数ミクロンの電極構造では数ボルトレベルでの原子トラップが実現できる。さらに、このトラップは電圧駆動であるため、ジュール熱による発熱がない。その結果、電流を必要とする系で問題となり得る構造の微細化に伴う発熱を回避できる。これは、将来のアトムチップ上での原子制御素子による IC 実現を期待させるものであり、エレクトロニクスでバイポーラトランジスタから FET へと移行することで IC が発達したことに似ている。

これまでの電場による中性原子制御の研究としては、自由空間中における 2 次元電場トラップや静電場と光による複合トラップなどの実現は報告されているが、3 次元電場トラップに関しては提案こそあるもののその現実には至らなかった。これは、シュタルク効果が弱い効果であるため、強電場中に運動エネルギーの小さい原子を用意しなければならなかったためである。本研究では、微小電極により比較的容易に強電場を生成し、1 μ K 程度まで冷却した原子を利用したことでこれに成功した。また、原子種として基底状態に磁気モーメントを持たないストロンチウムを選んだことで、スピン禁制遷移を利用したレーザー冷却を通して比較的容易にスピンを持たない状態の極低温原子を生成できた。

2. シュタルクトラップの原理

電場中での中性原子のシュタルクシフトは、

$$U(\mathbf{r}) = -\frac{1}{2}\alpha E(\mathbf{r})^2$$

と表される。ここで、 α は分極率、 E は電場である。安定状態にある原子の分極率は正なので、電場中の原子は電場の極大点に集まろうとする High field seeker として振舞う。しかし、Earnshaw の定理により自由空間中では静電場の極大点は作れないため、静的な 3 次元トラップはできない。そこで、2 次元固体基板に作製した電極により交替電場を作成することで、イオンでの rf トラップと同様な動的安定化により原子を 3 次元トラップする。電極球モデルを用いて、このトラップ原理を定性的に示す。まず、図 1.(a) の様に x 軸方向に配置した 1 組の電極対に電圧 $\pm V_0$ をかけた場合のシュタルクポテンシャルは、図 1.(b) の様な鞍型形状になる。したがって、このとき原点近傍にいる原子は x 軸、 y 軸方向にそれぞれ斥力、引力を受ける。電圧をかける軸を x 軸、 y 軸で交換することで、ポテンシャルを

回転させ、今度は x 軸方向に引力を働かせる。どちらの位相に対しても z 方向には束縛力が働くため、電圧の印加方向を適当な周波数で交換することで、原子を 3 次元トラップすることができる。

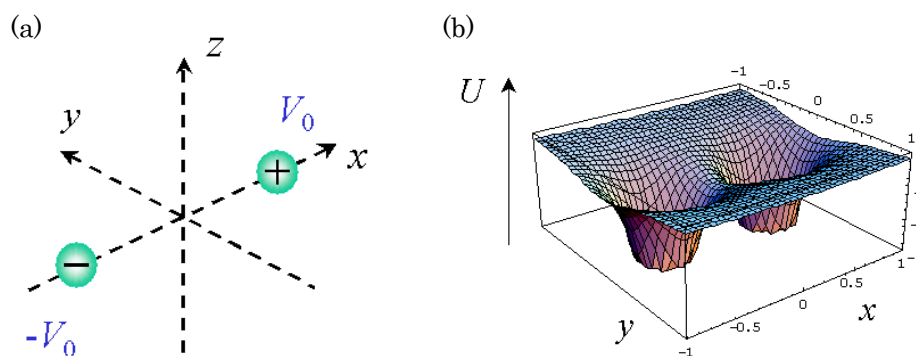


図 1: (a)球電極モデル(b) (a)によって形成される原子が感じるシュタルクポテンシャル

3. シュタルクトラップ実験

本研究の実験配置を図 2 に示す。シュタルク・アトムチップを AR コートウィンドウに真空対応エポキシ系接着剤で貼り付け、さらにこれを真空槽に同接着剤で貼り付けることで真空をシールした。

実験は以下の手順で行った: (i)ミラー磁気光学トラップにより、アトムチップ(電極)の下 1.5 mm 程度の位置に冷却原子を作成する。(ii)電極中心部(貫通穴)でフォーカスしたレーザー光をアトムチップの上下方向から入射して定在波を作る(光格子)。前述したように、原子は電場の強いところに集まるので、原子は定在波の腹にトラップされる。(iii)この定在波を作る 2 本のレーザー光に周波数差を付けることで定在波の腹を制御し、原子をシュタルクトラップ領域に運ぶ(移動光格子)。(iv)移動光格子を遮断し、電極に電圧をかけることでシュタルクトラップを開始する。(v)適当なトラップ時間後、図 2 のようにプローブ光を照射し、原子からの蛍光を高感度 CCD カメラにより検出する。

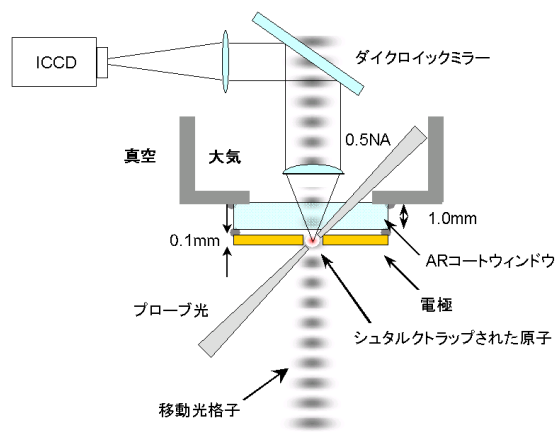


図 2: 実験配置

図 3 ((a)、(b)はそれぞれ印加電圧を on、off にしたとき)はこの手法によりトラップしたシュタルク・アトムチップ中の原子集団の様子である。このときのトラップ条件は、印加電圧 $V_0 = \pm 200$ V、電圧駆動周波数 6.4 kHz でトラップ時間は 20 ms である。シュタルクトラップの特性を図 4、5(シュタルクトラップ時間 5 ms での結果)に示す。プロットが実験結果で、曲線が数値解析によって得られた計算結果である。このとき振幅をフィッティングパラメータとして使った。図 4 は電圧駆動周波数依存の評価を示しており、これから駆

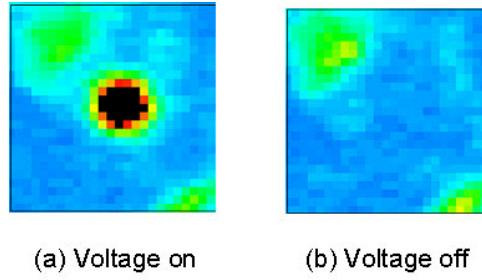


図 3: シュタルクトラップのその場観測

動周波数 6.4 kHz のときが最も安定なトラップであることが分かった。この駆動周波数 6.4 kHz の条件下で、電圧パルス(パルス周期 $T[s]=1/6.4$ [kHz], パルス位相 $\phi=0, 360$ [deg]がパルス列のエッジ)の開始する位相を制御することでトラップ原子の電圧パルス初期位相依存を調べた結果を図 5 に示す。この依存性は、電圧パルスの印加によってトラップ中心から広がろうとしている原子をトラップ中心に引き戻す動的安定化の基本原則に基づくもので、移動光格子によって運ばれてきた原子集団の位相空間分布と電圧パルスの開始する位相に対するシュタルクトラップ可能な原子の初期位相空間分布との重なり具合に起因している。

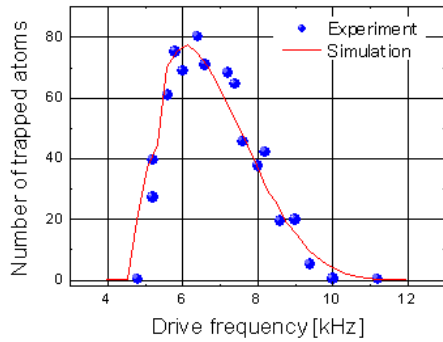


図 4: 電圧駆動周波数依存

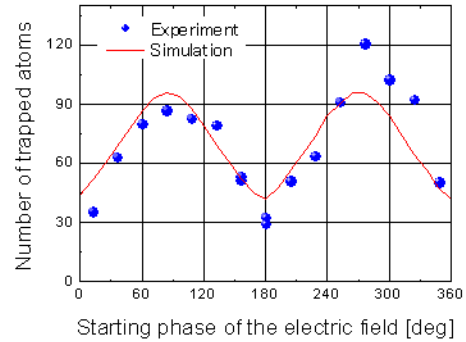


図 5: 電圧パルス初期位相依存

本研究では、固体基板上に作製したミクロンサイズの微小電極が形成する交替電場によって、スピンを持たない状態の中性原子を情報の担体とする新しいアトムチップ（シュタルク・アトムチップ）の実現に成功した。また、このシュタルク・アトムチップという新しい系において単一原子レベルでの時間・空間分解可能な観測系を構築し、シュタルクトラップ原子のダイナミクスを調べた。このシュタルク・アトムチップでは電荷もスピンも持たない状態の原子の制御を可能とし、その結果、イオントラップや磁場アトムチップで問題になっているチップ表面の熱的変動磁場などに起因する外乱の影響を格段に抑えることができる。このこととトラップ構造と駆動電圧のスケーリング則から、低電圧駆動での小型な原子トラップが可能になるため、このトラップ技術の拡張はアトムロニクスにおける原子制御素子の集積回路実現を期待させる。