

研 究 報 告 書

「デコヒーレンスフリーな非発散波束の生成と量子制御への応用」

研究期間：平成 19 年 10 月～平成 23 年 3 月

研 究 者：前田 はるか

1. 研究のねらい

発散しない量子波束は古典論との対応原理の問題として量子論の正当性が議論されはじめた当初からの原理的テーマである。その当時既に Schrödinger は調和振動子の波動関数をコヒーレントに重ね合わせた波束の時間発展が古典的な粒子の運動に対応することを示したが、一方自然界の物質系では非調和ポテンシャルが普通であるため、その様な系で運動する波束は通常時間と共に発散してしまうことも早くから指摘されていた。近年モードロック短パルスレーザーの出現及びパルス波形整形技術などの著しい発展に伴い、我々の量子波束に対する理解が飛躍的に深まった。と同時に、波束のダイナミクスを能動的に制御する試みが物理や化学の枠組みを超えて急速に展開され、今日では量子制御の中心的技術の一つとして利用されているのみならず、量子情報処理に応用しようとする試みも行われている。しかるに、本質的に位相の擾乱に対して脆弱な波束を長時間にわたり保持し制御する決定的な方法はいまだ確立されておらず、その類の波束の生成機構の解明並びにその制御の方法論の開拓は新しい量子制御の展開をもたらすことが期待されるテーマである。

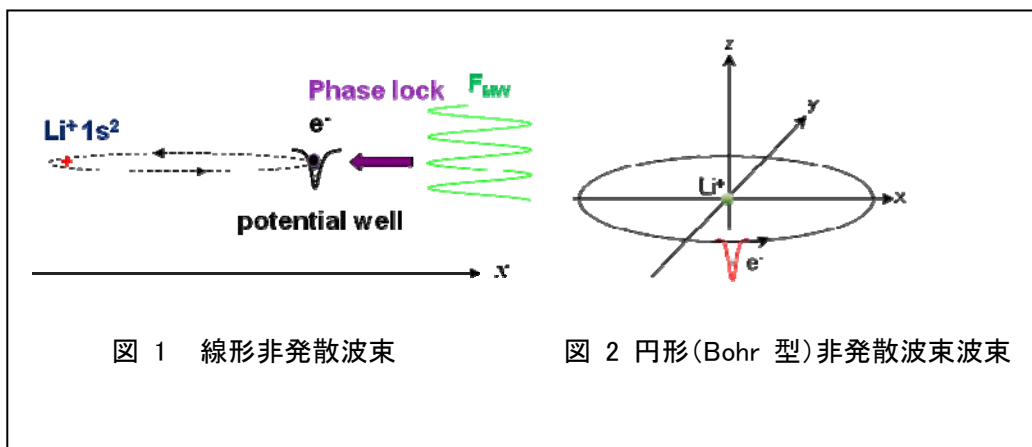
近年、本さがけ研究者らは、世界に先駆けて生成・観測に成功した発散しない波束が、極端に長寿命であると同時に高度な制御も可能である特異な波束であることを明らかにした。本さがけ研究では、この新奇な非発散波束及びそれが関わる物理現象を迅速且つ高い精度で検出、或いは観測するための装置を開発し、非発散波束の物理を深く理解するための幾つかの原理的実験を行うと共に、非発散波束を用いた“最も古典的”な原子状態の生成、非発散波束の関わる多準位系の多光子吸収現象に関する幾つかの実験、より複雑な系における非発散波束の励起の試み、極低温リユードベリガス中に非発散波束を励起することを試みる実験などを行うことを通じて、学術的には我々の量子力学と古典力学の対応原理に対する理解を一層深める新たな契機を提供すると共に、非発散波束の特徴を利用したこれまでにない量子制御や量子情報操作の技術の開拓を行うことを、当初の研究のねらいとした。

2. 研究成果

(1)最も古典的な原子状態＝円形非発散波束の生成と検出

本さがけ研究者が初めて観測した非発散波束は、高励起(リユードベリ)状態にあるリチウム(Li)原子に直線偏光した微弱な共鳴マイクロ波を照射することで生成した、線形の波束であった(図 1 参照)。そこでは共鳴マイクロ波に電子波束が位相同期され、少なくとも数万回も周期的な軌道運動を行うことが観測された。本さがけ研究ではこれを発展させ、“最も古典的”な原子状態、即ちボーア原子の如くに振る舞う円形非発散波束(図 2 参照)の励起と観測を行い、これに世界で初めて成功した。

実験では、高真空中で基底状態のLi原子を数種類のパルス波長可変レーザーを用いてリユードベリ状態に励起し、その後直線偏光した微弱な共鳴マイクロ波(周波数 17.5 GHz)を照射して線形の非発散波束を生成し、更に照射するマイクロ波の偏光を断熱的に直線から円に変化させることで円形の非発散波束を励起する方法を適用した。円形非発散波束の検出



には、マイクロ波に位相同期した二つのサブピコ秒のテラヘルツ ハーフサイクルパルスを用いて撃力を(例えば図 1 の x 軸及び y 軸方向から)与えることで、波束の(xy 平面上での)二次元的な運動を検出している。さらに、この円形波束は線形非発散波束と同様、極めて長い時間の間発散せずに軌道運動することも確かめた。この結果は米国物理学会の web Journal, Physics に紹介された(Physics 2,19 (2009))。

(2) 非発散波束を用いた原子の配向制御の実現

本実験では、非発散波束の運動が共鳴マイクロ波に位相同期されることを利用すると“原子の軸”の向きを自在に変化できることも明らかにした。図 3 ではリュードベリ状態にあるリチウム原子(図 3 (1))に y 軸方向に偏向した共鳴マイクロ波を照射することで y 軸方向に“軸”を持つ線形非発散波束((2))を励起し、その後マイクロ波の偏向を直線から円偏向にすることで円

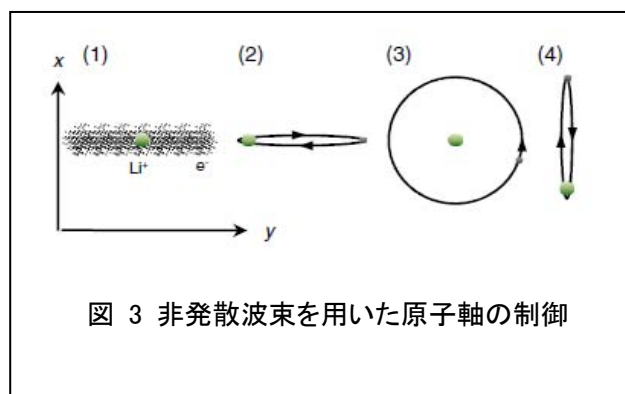


図 3 非発散波束を用いた原子軸の制御

形非発散波束を生成((3))した後、さらにゆっくりと共鳴マイクロ波の y 偏光成分を減衰させて x 軸方向に沿った偏光成分のみを残すことで、最終的には x 軸方向に“軸”を持つ原子状態((4))を生成できる様子を示している。実験ではこの様子をハーフサイクルパルスを用いて観測した。位相同期を用いた原子・分子の軸制御の実験研究は、本研究者の知限りでは報告されていない。特に強調すべき点は、本手法では非発散波束を利用していることからデコヒーレンスに対してロバストであるという特徴をもつことである。

(3) 非発散波束生成制御実験装置の開発

通常、非発散波束の実験はリュードベリ原子を用いて行う。これはリュードベリ原子の構造が極めて単純明快であること、及びリュードベリ原子の共鳴周波数がミリ波マイクロ波の領域にあることに起因する。非発散波束は多準位系に共鳴電磁波を照射することで生成出来ると考えられ、従って非発散波束を深く理解するための実験研究を行う場合にはリュードベリ原子をもちいることが最も適切である。本さきがけ研究では、日本で初めて非発散波束の研究に特化した実験装置の開発を行い、その立ち上げに成功を修めた。特筆すべき点は、使用するパルスレーザーすべてが高い繰り返し数(kHz)のもので構成されている点である。特に、リュードベリ原子を励起するために用いる波長可変 kHz レーザーシステムは、本さきがけ研究者が中心となって独自に開発したものを採用している(図 4 参照)。励起レーザーには kHz 発振のパルス Nd:YLF レーザーを用い、レーザーパルスを二つのポッケルズセルに

よって 3 つに時間分割し、分割したビームをそれぞれ Littman 型の色素レーザーの励起用光源として用いている。この結果、少なくとも 4 台の色素レーザーを同時に発振させることに成功した。このことは、本装置が Li のみならず多くの原子の励起に対して十分な性能を持っていることを意味する。

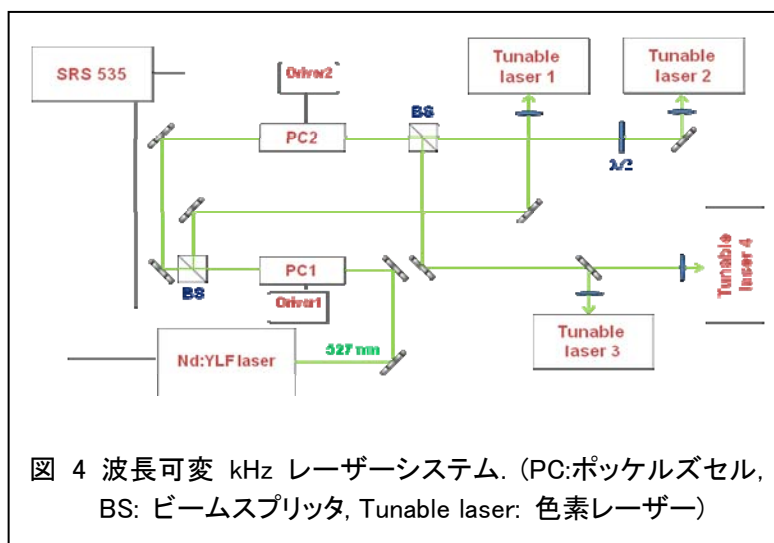
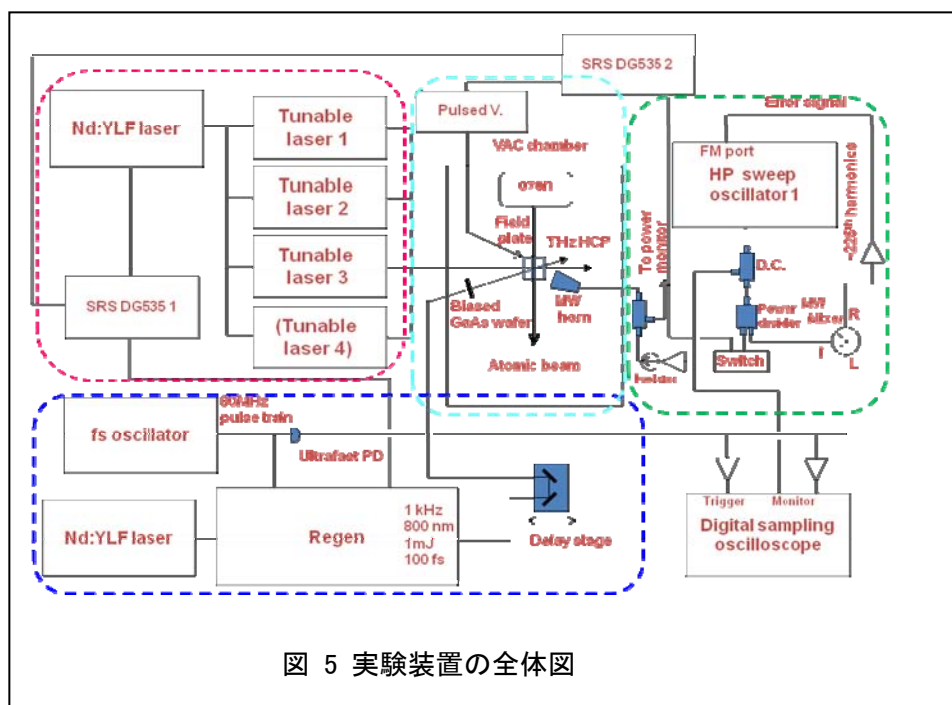


図 5 には開発した装置の全体図を示す。装置は大別して上述の波長可変 kHz レーザーシステム、再生増幅フェムト秒レーザーシステム、マイクロ波システム、及び真空装置から成り立っている。フェムト秒レーザーシステムは高繰り返しのコマーシャル製品を使用している。マイクロ波システムではフェムト秒レーザーに位相同期した CW マイクロ波をパルス化し



てから増幅し、それを真空容器内に導入して原子に照射することを行っている。真空装置内ではフェムト秒パルスバイアスした GaAs 半導体に照射してハーフサイクルパルスを生じ、それを原子に照射している。Li 原子は真空装置内で抵抗加熱により蒸気化し、ビーム状に整形している。ハーフサイクルパルスによってイオン化された原子波束は電場によりマイクロチャンネルプレートに加速して検出している。原子に非発散波束が生成されている場合、照射するハーフサイクルパルスのタイミングを変化させてイオン化信号を検出すると図 6 の様に sinusoidal な信号が観測されることとなる。図には 17.3 GHz のマイクロ波を主量子数 $n = 72$ の Li 原子に照射した場合の例が示されており、信号のピークとピークの間隔が

ちょうど 17.3-GHz マイクロ波の一周期、即ち
 ほぼ 60 ピコ秒に相当していることが認めら
 れる。本測定にかかる時間は高々1分程であ
 る。

以上、本装置では励起・イオン化のレーザ
 ーがすべて 1 kHz の高繰り返しで稼働し、デ
 ータの取得が極めて短い時間で終了する
 という一大特徴がある。これを利用することで
 今後多くの実験を迅速に行うことが期待され
 る。

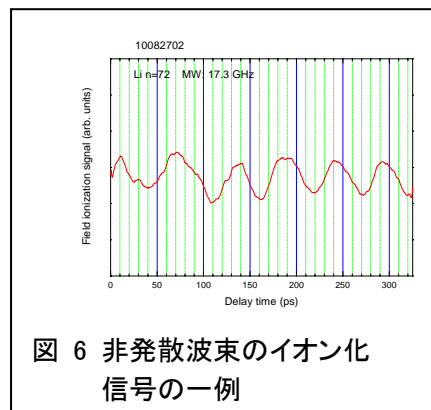


図 6 非発散波束のイオン化
 信号の一例

(4)量子ラダーシステムの多光子遷移・イオン化の観測

現在我々の、多準位系が介する非線形多光子現象に対する理解度は十分とは言い難く、そこには研究すべきテーマが山積する。本さがけ研究者は、特にラダーシステム(ここではリュードベリ原子)、即ち隣接する準位の間隔が少しずつ異なる様な準位構造をもつ多準位系に共鳴電磁波(ここではマイクロ波)を照射することが、非発散波束を生成することに他ならないことを明らかにした。これを発展させて、本さがけ研究ではマイクロ波によるリュードベリ原子の多光子遷移・イオン化に関する幾つかの実験を行った。その結果、原子の多光子イオン化が光電効果によるイオン化に移行する様子をはじめて観測することに成功した(図 7 参照)。図中に示されているグラフには、17 GHz のマイクロ波をリュードベリ原子に照射した時の原子のイオン化の確率を、原子のエネルギーに対してプロットしており、明らかにイオン化限界付近で 1 ～数光子イオン化を示す規則的なピークが認められる。もちろんピークの間隔はマイクロ波のエネルギーに相当している。もう一つの驚くべき結果は、一般的に N 光子イオン化(N はイオン化するために原子が吸収する光子数)の確率は光の強度の N 乗に比例すると見積もるのが妥当とされているが、この場合にはその規則が全く当てはまらないという観測結果である。本研究ではこれが多準位系の光イオン化に特有の現象であることを明らかにした。

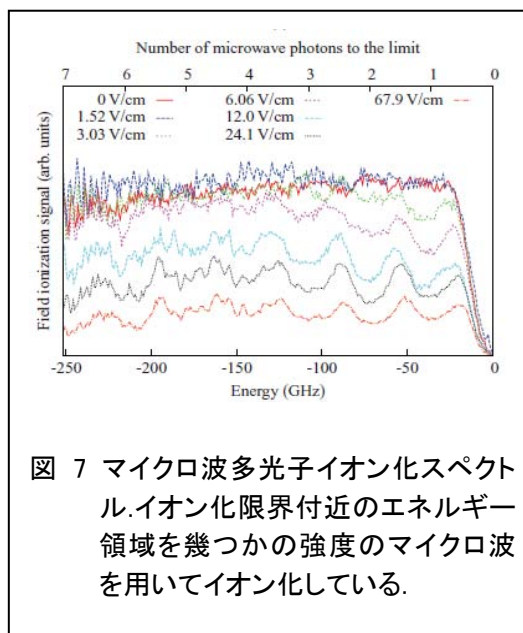


図 7 マイクロ波多光子イオン化スペクトル。イオン化限界付近のエネルギー領域を幾つかの強度のマイクロ波を用いてイオン化している。

さらに、マイクロ波によるリュードベリ原子の多光子イオン化現象は量子カオスを研究する上で最も簡単な例の一つとして長い間研究されてきた。その過程で、照射するマイクロ波の周波数が原子の内部(古典的)周波数とほぼ同等か或いは大きい場合には、原子が“イオン化されにくく”なる現象が実験的に確かめられた。これは量子干渉効果に基づく局在現象のあらわれと理解されている。本さがけ研究者は、ラダーシステムのイオン化に周波数チャープを持つ電磁波を用いることで量子局在効果を低減できることを実験的に明らかにした。これに関連して興味深い実験は、一度ラダーシステムに非発散波束を生成し、続いて照射する電磁波の波長をゆっくりと長波長側に変化させ、最終的にはたかだか非発散波束を“保持”するのに必要な電場強度でラダーシステムをイオン化する実験であろう。例えば $n = 70$ 程度

の原子状態は 10 V/cm 以上の強度の 18-GHz マイクロ波がそのイオン化に必要と見積られるが、一方 $n = 70$ に非発散波束を生成し保持するのにはたかだか 1 V/cm 程度の 18-GHz のマイクロ波が必要となるだけである。よって、 1-V/cm , 18-GHz のマイクロ波を原子に照射し非発散波束を生成してから、マイクロ波周波数を徐々に小さくしていくだけで原子のイオン化が可能と見積られる。ただし、これを実験で確かめることは今後の課題である。

3. 今後の展開

非発散波束を用いて量子系を制御する方法を、量子位相同期法＝量子系の持つ固有の内部周波数を外部クロックに同期させることで量子系の制御を行う方法、と名付けた場合、本研究の今後はまず、量子位相同期法の可能性をより具現化する方向に展開させていくことが考えられる。この場合、研究はビームを用いた研究とトラップされた原子を用いて行う研究の二種類を考えている。

前者の研究の利点は比較的实验を簡単に行える点、及び多種多様の原子、或いは分子を用いた実験が可能である点である。例えば、早急に試みるべき実験として、非発散 angular 波束の励起を挙げることが出来る。これはこれまで行ったものと同様の実験を電場中で行うことで遂行できると考えられる。更に、既述した様に二つの電子に二つの非発散波束を同時に励起する実験も興味深い。二つの電子波束を励起しそれらを制御する試みはこれまで全くといっていいほど報告されておらず、一般に行われてきた原子・分子の量子制御研究の枠組みを超えた実験研究となり得る可能性を秘めている。更に、非発散波束の重ねあわせ状態を励起することを試みる実験は、原子の内部状態を制御する強力な手法を追求するための意義深い実験である。

また、分子を対象とした実験研究も考えられる。実際、全く同じ物理の枠組みで、例えば二原子分子をモーターのように自在に回転出来ることが示唆されており、これを実証することは有意義である。当然、多原子分子や巨大分子への適用は最も興味深い。従来法とは異なる量子操作技術である量子位相同期法を用いた原子・分子のデバイス化、あるいは原子・分子反応の制御の実用化をめざすものである。

このことを踏まえた場合、これまでビームで行ってきた実験は、次の段階ではトラップされた原子を用いて再現することが自然な流れであろう。その他のモチベーションを記するならば、例えば極低温リユードベリガス中に二準位非発散波束を励起することは、そこにリユードベリブロケイド効果を期待することができ、中性原子を用いた量子情報処理を行う上で大切な基礎技術となり得る。また、極低温プラズマの再結合、リユードベリ原子のエネルギー制御などは反水素原子の物理と密接に関わるテーマであり、そこで非発散波束や共鳴マイクロ波の果たす役割は大きいであろう。また、トラップされた極低温原子ガスに非発散波束を励起することは巨大な振動双極子を生成することに他ならず、それによる多体効果・巨視的效果（例えば超放射など）の研究も興味深い。

ところで、磁気光学トラップ中に生成される極低温原子ガスには、条件を精密に変化させることによって、原子間、原子－電子間、原子－分子間、あるいは分子－分子間での極低温相互作用に基づく多種多様の物理化学反応が発現することが理解されつつある。例えばトラップ原子をリユードベリ状態に励起した場合、原子間に働く双極子・双極子相互作用やファンデルワールス相互作用によるブロケイド効果の他に、自発的イオン化、多原子分子的挙動あるいはアモルファスガスとしての挙動などを示すことが実験的・理論的な研究により明らかにされている。

近年我が国でも、冷却中性原子を用いた実験的・理論的研究が盛んに行われており、ボーズアインシュタイン凝縮を対象とした研究はその端的な一例である。ところが本さがけ研究者の知り得る限りでは、これら多くの研究は例えば原子干渉や量子相転移、量子反射、光格子を用いた量子コンピュータをはじめとする量子デバイスの原理研究といったテーマを対

象とする、どちらかというと物理的な興味に基づいた、あるいは物理的観点から俯瞰した研究がその大半を占めていると見受けられる。

一方、冷却粒子(=原子・分子・電子)同士が相互作用する反応のメカニズムの研究やその制御、あるいは冷却原子・分子の精密分光といった物理化学的な立場からの研究は、我が国ではどちらかというとそれほど盛んには行われていない様子である。

この様な背景を鑑み、本さがけ研究の更なる展開のもう一つの方向として、冷却粒子(=原子・分子・電子)同士が相互作用する反応のメカニズムの研究やその制御、あるいは冷却原子・分子の精密分光といった、物理化学的な立場からの研究を行うことを考えている。そのために必要となる磁気光学トラップ装置は本さがけ研究期間中に作成を完了することが予定されており、さがけ終了後の研究の大きな柱の一つと考えている。

4. 自己評価

当初にかかげた目標に対して本さがけ研究で達成できたテーマの数は決して多くはないが、円形非発散波束を世界で初めて実験室で生成出来たことは十分に評価されるべき結果であると自負している。

また、我が国で初めて非発散波束の研究に特化した実験装置を立ち上げることができ、またその性能が他国のものと比べて格段に優れている点が、これも十分に評価に値するものであると共に、今後の非発散波束研究の発展を約束するものであると自負している。

さらに、さがけ期間中には成果として発表できなかったものの、今後の研究の発展に寄与するであろう数々の興味深い研究の芽を育む事が出来たと自負する。また、今後の研究の展開を期待できる装置の立ち上げもほぼ達成することが出来たと考えている。

今後はこれらさがけ研究で得られた有形無形の財産を決して無駄にせぬよう切磋琢磨し続けることが大切であると考えている。

5. 研究総括の見解

位相の擾乱に対して脆弱な波束を長時間にわたり保持し、波束ダイナミクスを能動的に制御するというフィールドに先駆的に取り組み、オリジナルなアイデアで円形非発散波束を世界で初めて生成するという成果を得た。

主たる成果は次の4点で、非発散波束研究の礎を築いたと言える。

- 1) “最も古典的”な原子状態、即ちボーア原子の如くに振る舞う円形非発散波束の励起と観測に世界で初めて成功した。
- 2) 非発散波束の運動が共鳴マイクロ波に位相同期されることを利用し“原子の軸”の向きを自在に変化できることを明らかにし、非発散波束を用いた原子の配向制御に成功した。
- 3) 非発散波束研究にはリユードベリ原子をもちいることが最も適切であるが、日本で初めて非発散波束の研究に特化した実験装置の開発を行い、その立ち上げに成功を修めた。
- 4) 隣接する準位の間隔が少しずつ異なる様な準位構造をもつ多準位系に共鳴電磁波を照射することが、非発散波束を生成することに他ならないことを明らかにし、原子の多光子イオン化が光電効果によるイオン化に移行する様子をはじめて観測することに成功した。

今後の展開として、二つの電子に二つの非発散波束を同時に励起する実験が述べられているが、二つの電子波束を励起しそれらを制御する試みは原子の内部状態を制御する強力な手法開発に繋がる。冷却粒子(=原子・分子・電子)同士が相互作用する反応のメカニズム解明と制御、あるいは冷却原子・分子の精密分光といった研究へ発展して行くことを期待する。

6. 主要な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1.	H. Maeda, J.H. Gurian, and T.F. Gallagher, “Nondispersing Bohr wave packets”, Phys. Rev. Lett. 102 , 103001 (2009); <i>ibid.</i> , 103 , 149302 (2009).
2.	J.H. Gurian, H. Maeda, and T.F. Gallagher, “KHz dye laser system for high resolution spectroscopy”, Rev. Sci. Instrum. 81 , 073111 (2010).
3.	J.H. Gurian, K.R. Overstreet, H. Maeda, and T.F. Gallagher, “Connecting field ionization to photoionization via 17- and 36-GHz microwave fields”, Phys. Rev. A. 82 , 043415 (2010).