

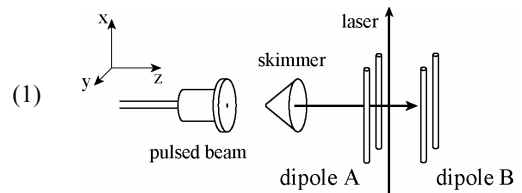
2P170

リュードベリ原子分子のシュタルク減速と冷却効果： シンプレクティック法によるシミュレーション (東北大院理) ○山北佳宏、高橋理沙子、大野公一

【序】本発表では、電場を用いてリュードベリ He 原子を気相中で静止させる実験のシミュレーションを報告する。全ての原子分子において、リュードベリ状態では極めて大きなシュタルク効果が働くため、空間的に不均一な電場によって原子分子に大きな力を与えることができる。これは、原理的にレーザー冷却を適用することのできない分子の並進運動を冷却する上で有用である。並進運動のシュタルク制御を、リュードベリ原子分子が放射失活や前期解離で崩壊する以前に終わるためには、急峻な電場勾配を短い飛行長で与える必要がある。しかし、電場の絶対値が大きくなるとリュードベリ状態が電場イオン化してしまうことが問題となる。それを回避するには、電場の空間形状を時間変化させることが有効であると考えられる。一般に、時間変化する不均一電場を用いると、シュタルク効果を起こす原子分子の並進エネルギーをポテンシャルエネルギーとして奪い去ることができ、このような方法で分子線の速度を実験室系に対して低減し、集団の並進温度の冷却を実現できれば、超高分解能分光や超低温衝突反応の研究につながると期待される。

【方法】不均一電場中に置かれた原子分子は、電場に対するシュタルク効果の勾配と電場の空間勾配に比例する力を受ける：

$$\mathbf{F} = -\frac{\partial U}{\partial \mathbf{r}} \frac{\partial E}{\partial \mathbf{r}}$$



いま、中心距離が 3.5 mm 離れた直径 0.5 mm の 2 本の細線から成る双極子の組 A, B を、分子線に沿って 8 mm 間隔で配置する (Fig. 1)[1]。各々の双極子に逆方向の電場を印加し、初速度

$v_0=800 \text{ ms}^{-1}$ 、並進温度 1 K の低速ビームに含まれる He(2^3S)原子を、時刻 $t=0$ に双極子対の中間点から 2 mm 上流の位置でリュードベリ状態のシュタルク準位へ選択励起する場合を考える。上流に置かれた dipole A の電圧を指数関数的に減少させると同時に下流側の dipole B の電圧を増大させると、電場強度の絶対値を小さく保ったまま、ポテンシャルの谷を作ることができ、谷の壁の勾配からリュードベリ He 原子の進行方向に対向する力を与えることができると考えられる。本研究では、主量子数 $n=15$ 、磁気量子数 $m=0$ のリュードベリ状態の最も高い $k=14$ シュタルク準位を考え、自作のプログラムで

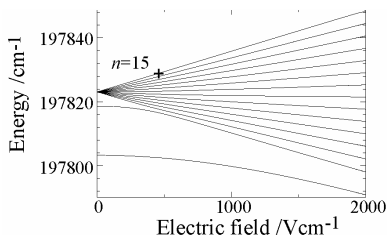


Fig. 2. Stark effect in the $n=15$, $m=0$ triplet Rydberg states of the helium atom.

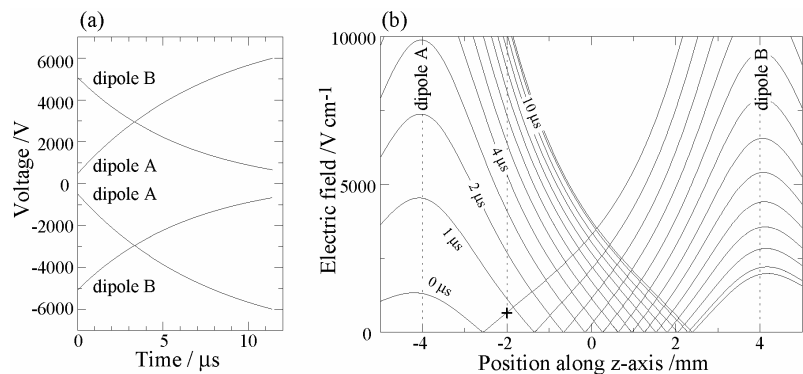


Fig. 3. Time variation of (a) voltages on dipoles A, B and (b) electric fields on the bisecting xy plane (defined in Fig. 1). A laser beam of a 100 μm beam waist is irradiated at position +.

Fig. 1. Schematic illustration of a two-dipole Rydberg-Stark decelerator.

計算した電場から力を算出し、4次のシンプレクティック数値積分法[2]により10,000本の軌跡のモンテカルロ計算を実行した。

【結果と考察】実験的に確認された Fig. 2 のシュタルク効果の勾配に対して、双極子電圧の時間依存性は Fig. 3(a) のように最適化される。Fig. 3(b) に示すように、電場は近似的には4重極電場に典型的な直線的な勾配となるが、時間的には初期段階で右側が徐々に急峻になり、空間的には左右とも最小点から離れるにつれて勾配が大きくなる。このポテンシャル形状が集団の並進温度を冷却する効果を担っている。電場の設計において、選択励起されたリュードベリ原子が準位交差や電場イオン化を起こさないよう常に約 2000 V/cm 以下に抑制され、シュタルク準位間のポピュレーション移動を防ぐため 10 V/cm 以上になるよう最適化してある。

Fig. 4 には、パルス He 原子ビームの実験室系に対する速度分布ならびに位置分布の時間依存性が示されている。Fig. 4(c) の速度分布から分かるように、約 70% のリュードベリ He 原子が 11.4 μs の時間を経てゼロ平均速度として空間に静止すると計算される。この間 He 原子は約 4.6 mm の距離を飛行している (Fig. 4(a))。集団の並進温度は著しく冷却され、始状態が 1 K のとき終状態では 50 mK となる。この冷却効果は、Fig. 4(b) の位相空間での挙動として次のように理解することができる。軌跡の代表点の像が、時間の経過と共に傾いてゆくのは、速い速度成分において位置座標が速く増大するためである。 $t=4\sim 7\ \mu\text{s}$ において、速い速度成分はポテンシャル壁の 2000 V/cm の Inglis-Teller 極限を超えて制御不能になり、約 30% の損失をもたらす。しかし、速い成分ほど急峻な電場勾配を感じるため、速度成分としては急激に圧縮される。その後減速がさらに続き、 $\approx 10\ \mu\text{s}$ には最終温度の $T=50\ \text{mK}$ はほとんど達成される。最終時刻の $t=11.4\ \mu\text{s}$ には、ポテンシャルの谷は、集団の移動に追いつき、 $z=2.1\sim 3\ \text{mm}$ に分布する最終位置の中に位置する (Fig. 3(b), Fig. 4(a))。軸外の y 軸方向には、僅かに速度分布は広がることが確認されるものの、ビームの収束効果があることは実験上有用であると考えられる。

【結論】本研究において、リュードベリ原子分子を電場を用いて減速冷却し、低い集団並進温度で静止させる可能性が示された。電場を用いたリュードベリ原子分子の減速は、 H_2 [3] の他、Ar [4], Na [5] について実験または計算されているが、いずれも静止には至っていない。He 原子に対してはレーザー冷却が適用可能である。しかし、He は 2 番目に軽い原子であり、前期解離による速い崩壊過程に阻害されずに、本研究のスキームを試すのに適している。リュードベリ原子分子を空間に静止させることができれば、原子分子の衝突反応において極めて大きな衝突反応断面積が期待される。

[1] T. P. Softley, S. R. Procter, Y. Yamakita, G. Maguire, and F. Merkt, *J. Elec. Spectrosc. Relat. Phenom.* **144-147**, 113 (2005).

[2] M. Suzuki, *Phys. Lett. A*, **165**, 387 (1992).

[3] Y. Yamakita, S. R. Procter, A. L. Goodgame, T. P. Softley, and F. Merkt, *J. Chem. Phys.* **121**, 1419 (2005).

[4] E. Vliegen and F. Merkt, *J. Phys. B* **38**, 1623 (2005).

[5] N. Vanhaecke, D. Comparat, and P. Pillet, *J. Phys. B* **38**, S409 (2005).

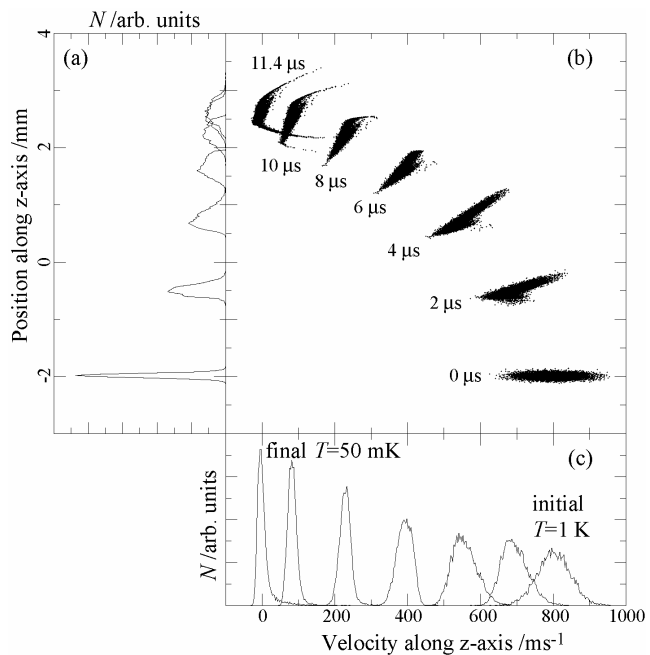


Fig. 4. Velocity distributions, position distributions, and temporal behavior in the phase space for Rydberg helium atoms experiencing the time-varying fields presented in Fig. 3.