

冷却リドベルグ原子集団を用いた非線形量子効果

中川研究室 修士2年 千葉 学

提出日 2017年3月10日

1 研究背景・目的

近年、単一光子を用いた量子暗号通信や量子コンピュータの研究が世界中で行われている。量子暗号通信では、単一光子を伝送するため、光子と原子集団との強い相関を持たせる量子中継器として、リドベルグ状態の原子を利用した単一光子スイッチング[1]や単一光子トランジスタ[2]の実現に向けた研究が行われている。

リドベルグ原子とは、主量子数 n が非常に大きい準位に励起させた原子のことである。この特徴は原子核から遠い原子軌道を通るため、双極子モーメントが非常に大きい。そのため、リドベルグ状態の原子には、強い原子間相互作用 $V_{dd}(R)$ が働く。

$$V_{dd}(R) = \frac{\vec{\mu}_1 \cdot \vec{\mu}_2}{R^3} - \frac{3(\vec{\mu}_1 \cdot \vec{R} - \vec{\mu}_2 \cdot \vec{R})}{R^5} \quad (1)$$

R は原子間距離、 $\vec{\mu}_1, \vec{\mu}_2$ は双極子モーメントである。

図1にリドベルグブロッケード効果の原理を示す。1つの原子がリドベルグ状態に励起した場合、原子間距離が近く、その原子間相互作用が強く働く領域では、数 MHz のシフトが起こり、共鳴のレーザー光を照射しても、リドベルグ状態に励起することができない。これをリドベルグブロッケード効果といい、この効果が働く原子間距離をリドベルグブロッケード半径という。この効果と電磁誘起透明化(EIT)を組み合わせることで、単一光子を原子集団にトラップすることができ、さらに単一光子を生成す

ることができる。

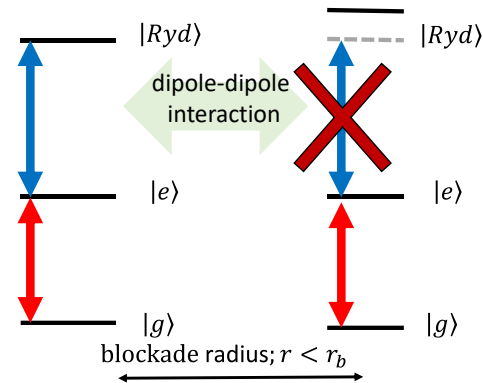


図1 リドベルグブロッケード効果

我々の研究室では、冷却 ^{87}Rb 原子集団を用いた量子メモリや単一光子スイッチングの実現を目指している。そのため冷却原子集団を用意し、その原子集団で非線形量子光学効果を観測することを目的に実験を行った。

本研究目的は MOT 内での強い単一光子の非線形効果を観測するため、先行研究[3]の実験条件を参考に、Double-MOTを用いて冷却原子を用意した。さらに原子数を評価するため、吸収像の撮影し、原子数、原子密度、原子温度を評価した。

2 Double-MOTによるトラップ

2.1 Double-MOT

本実験では、2つの磁気光学トラップ(MOT)を組み合わせたDouble-MOTを構築し、実験を行った。図2にDouble-MOTの概略図を示す。1st-MOTチャンバ内に直径2mmの穴の開いた $\lambda/4$ 板と金ミラーを組み合わせ1st側チャンバ内に

張り付けることで、原子を 1st 側で MOT により予備冷却し、穴あき部分の光がプッシュ光として用いられ、さらに 2nd 側で再捕獲することで 2 次側の真空度を保ったまま実験を行うことができる。これによりバックグラウンドガスの衝突を避けることができる。

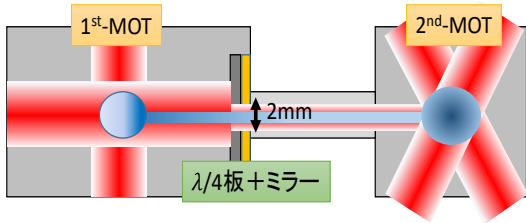


図 2 Double-MOT 実験系概略図

2.2 光学系

本実験には私が設計、作製した干渉フィルタを用いた外部共振器半導体レーザー (ECDL) を 2 台用いて、飽和吸収分光法による吸収線にレーザーを安定化させることでクーリング光とリパンプ光、観測のためのプローブ光を用意して実験を行った。実験準位図を図 3 に示す。

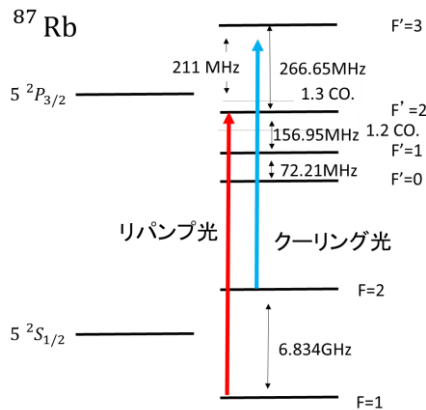


図 3 ^{87}Rb 実験準位図

2.3 吸収像撮影による原子数評価

まず、原子数、密度、温度を評価するためプローブ光の吸収画像撮影光学系(図 4)を構築し、3 枚の撮影画像から計測プロ

グラム MATLAB を用いて評価した。

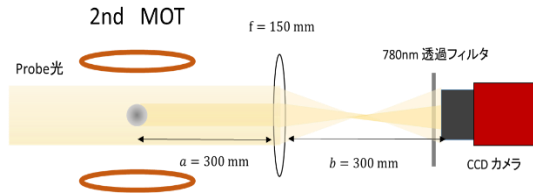


図 4 吸収像撮影光学系

以後の実験はこの吸収像撮影光学系を用いて実験をしている。

2.4 Time-of-Flight 法

冷却原子の温度を測るためには、トラップされた原子が開放された後に、マクスウェルボルツマン分布で拡がっていく。その広がり幅と開放時間の関係から、原子の温度を求めることができる。この手法を Time-of-Flight 法(TOF 法)という。図 5 の時間系列で実験を行った。離調を -15MHz 、repump のパワー 8mW 、磁場勾配を 18.7G/cm に設定し、2nd-MOT に 40s かけてローディングした。

開放時間をそれぞれ、 0ms 、 2ms 、 4ms 、 6ms 、 8ms 、 10ms と変え、各 5 点データを取り測定を行った。

	MOT 40s	開放時間 t[ms]	吸収像撮影		
			P 20 μs	F 20 μs	D 20 μs
Cooling Power	-15MHz				
Repump Power	8mW				
磁場勾配	18.7G/cm				
Probe					
CCD Shutter					

図 5 TOF 法実験時間系列

図 6 に TOF による撮影した各開放時間に対する吸収画像を示す。また図 7 は、図 6 の吸収の中心座標からの x 軸方向の光学密度 (OD) を表したグラフである。また図 7

の赤い線は、実験結果のプロットに対してガウシアンフィッティングを行った線である。

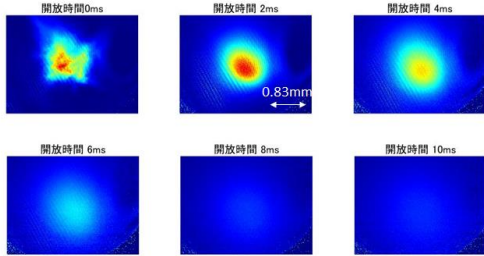


図 6 開放時間と吸収画像

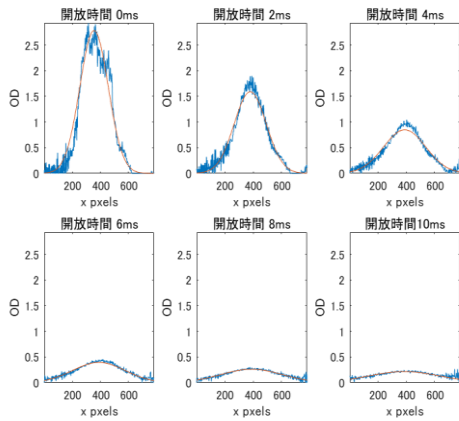


図 7 開放時間と OD の関係

図 7 より、ガウシアンフィッティングに対してほぼ一致しており、計測に行われた実験系やプログラムが機能していることがわかる。

開放時間と原子の広がりとの関係をまとめたグラフが図 8 である。図 8 の上のグラフが x 軸方向の原子の幅であり、下のグラフが y 軸方向の原子の幅を表す。各 5 点データをとったが、プロットが多くの部分で重なっていることから、各試行による測定誤差は少ないと考えられる。原子の温度の関係式 (2) でフィッティングすることで原子の温度 T を計測した。

$$\sigma_r(t) = \sqrt{\sigma_r^2(0) + \frac{k_B T}{m} t^2} \quad (2)$$

m は原子の質量であり、 k_B はボルツマン係数である。 t は開放時間である。図 8 の青の実線と緑の実線は式(2)のフィッティングによって得られた曲線である。

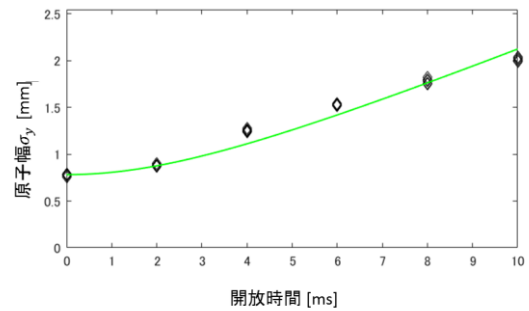
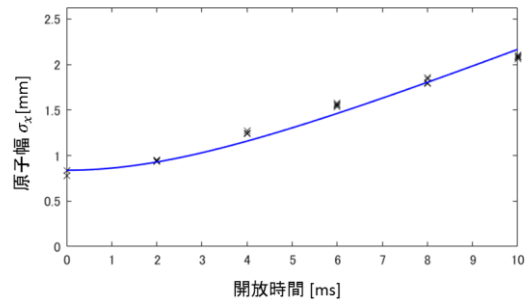


図 8 TOF 実験結果

この実験結果から、MOT 中の原子の温度は、 x 軸方向の温度 T_x は $416 \pm 4 \mu\text{K}$ であり、 y 軸方向の温度 T_y は $407 \pm 5 \mu\text{K}$ であった。

MOT 中の原子は約 $410 \mu\text{K}$ まで冷却されていることが分かった。これにより、原子吸収画像から原子温度評価に成功した。

更なる冷却と原子密度の向上を行うために偏光勾配冷却 (PGC) と圧縮 MOT (C-MOT) を行った。この実験の時間系列は図 9 に示す。前実験同様の条件で MOT にローディングし、磁場勾配を上げることで、空間的に圧縮した。さらに、磁場を切り、クーリング光の離調を上げることで偏光勾配冷却

を行った。以後は同様に画像を撮影した。開放時間を 0ms から 14ms まで 2ms ずつ変え各 5 点データをとった。この実験結果を図 10 に示した。

	MOT 40s	C-MOT 20ms	PGC 10ms	開放時間 t[ms]	吸収像撮影						
					P	F	D	20μs	20μs	20μs	
Cooling光 離調	-15MHz			-45MHz							
Repump光	8mW			50μW							
磁場勾配	18.7G/cm		35.1G/cm								
Probe光											
CCD Shutter											

図 9 偏光勾配冷却実験の時間系列

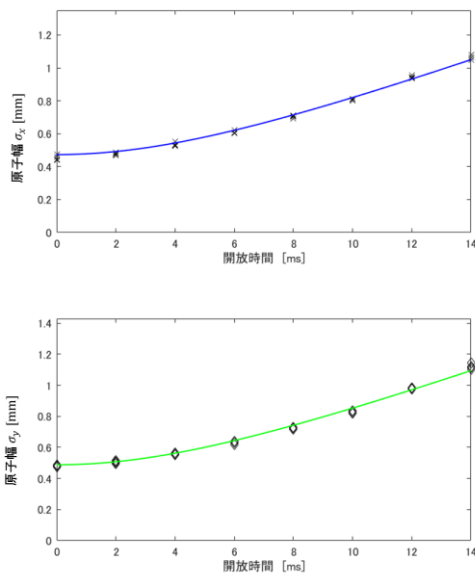


図 10 偏光勾配冷却 TOF 実験時間結果

この実験結果から、MOT 中の原子の温度は、 x 軸方向の温度 T_x は $47 \pm 1 \mu\text{K}$ であり、 y 軸方向の温度 T_y は $51 \pm 1 \mu\text{K}$ であった。

この結果、ドップラー冷却限界の $146 \mu\text{K}$ 以下まで冷却が行われ、原子の温度が約 $49 \mu\text{K}$ まで冷却されているといえる。

この実験結果をまとめたのが表 1 である。原子数が 9.2×10^7 個から、 4.4×10^7 個と減少しているが、密度が $1.2 \times 10^9/\text{cm}^3$ から $2.6 \times 10^9/\text{cm}^3$ に高くなっていることから、

約 2 倍程度 C-MOT の効果が得られ、PGC の効果が得られていることがいえる。

表 1 偏光勾配冷却による変化

	C-MOT and PGC なし	C-MOT and PGC あり
原子数	9.2×10^7 個	4.4×10^7 個
最大 OD	3.06	2.98
密度	1.2×10^9 個/ cm^3	2.6×10^9 個/ cm^3
温度	$411 \mu\text{K}$	$49 \mu\text{K}$

しかし先行研究 [] の密度 $1.0 \times 10^{10}/\text{cm}^3$ には不十分であった。

3 光誘起脱離効果(LIAD)の検証

通常ディスペンサを用いて Rb 原子の密度を上げるが、この方法であると、水素や窒素などの不純物のバックグラウンドガスによる衝突により、MOT の原子数が減少してしまう。またディスペンサのローディングの応答が遅く、最適な条件に合わせる事が困難であった。これらの問題点を改善するため、光誘起脱離効果(LIAD)を用いて改善を試みた。光誘起脱離効果とは UV-LED 光を照射することで、Rb 原子がチャンバやガラス表面から脱離する効果である。これによりチャンバ内の原子数が瞬時に増え、これにより不純物が生成することなく、効率よく MOT にローディングすることができ、原子数が増加する。図 11 に光誘起脱離効果の概略図を示す。

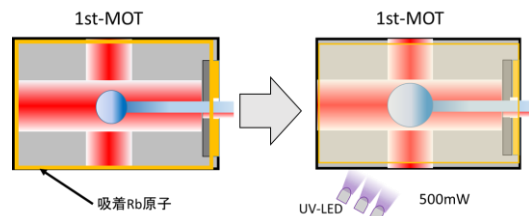


図 11 光誘起脱離効果

1st 側のチャンバに対して、近紫外の LED を取り付け、照射した。これにより、2nd が

わ MOT の原子数が増加するか、また密度が増加するのか、検証を行った。

蛍光量による原子数のリアルタイムの評価を図 12 に示す。黒線が LIAD を行わずにローディングした結果であり、赤線が LIAD を行った結果である。その結果、飽和するトラップ原子数は 9×10^8 個から、 1.8×10^9 個に増えていることがわかる。またローディングレートを傾きから求めると、 5.8×10^7 個/s から 1.2×10^8 個/s に向上した。つまりローディングレートが約 2 倍向上していることがこの結果からいえる。また LIAD なしの定常状態の原子数の到達する時間は約 6 秒であり、MOT へのローディング時間の短縮につながる事がわかる。

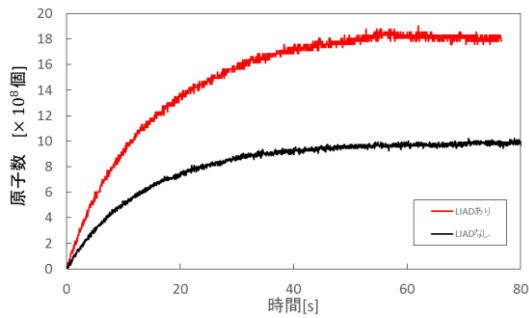


図 12 光誘起脱離効果の蛍光量評価

また図 5 の実験条件で吸収像観測を行った。その結果が 図 13 である。これより蛍光量による評価同様、原子数が増えていることがわかる。表 2 に結果をまとめた。

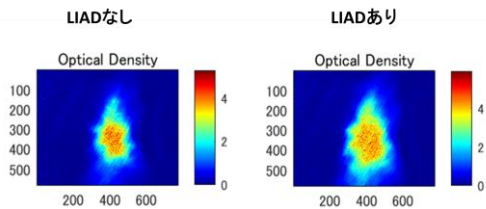


図 13 吸収画像による LIAD 評価

表 2 吸収画像の LIAD 実験結果

	LIADなし	LIADあり
原子数	1.0×10^8 個	1.6×10^8 個
最大OD	4.09	4.65
密度	4.9×10^9 個/cm ³	4.2×10^9 個/cm ³

この実験結果から、原子数が増え、OD が増えていることがわかる。しかし密度の向上みられなかった。

LIAD を導入し、原子数の 2nd-MOT へのローディングの効率化を達成した。これにより、ローディングにかかる時間が短縮され、実験の効率化が期待される。

4 原子セル中での Rydberg-EIT の観測

冷却原子集団での Rydberg-EIT 観測の準備実験として、APD を用いた Rb セル中での EIT の観測を行った。この実験系を図 14 に示す。

まず 780nm のレーザーを変調移行分光法で分光を行い、 $|5S_{1/2}, F = 2\rangle \rightarrow |5P_{3/2}, F' = 3\rangle$ の遷移に安定化し、Rb セルに照射させた。また 960nm のレーザーを波長計で欲しい励起準位の波長に設定する。さらにテーパアンプで増幅し、第 2 高調波発生 (SHG) させることで、リドベルグ励起用の 480nm の光を用いて、この光をセル内で対向させるように入射させ、960nm のレーザーを掃引させることで EIT 信号を得た。周波数の較正を行うために、PDH 法で用いていた、960nm のレーザー光の EOM を 15.9MHz で変調し、共振器の透過光をモニタとしてオシロスコープ上で同時に観測し、サイドバンドをたてることで、周波数を決定した。図 15 に実際に励起させたリドベルグ準位を示す。

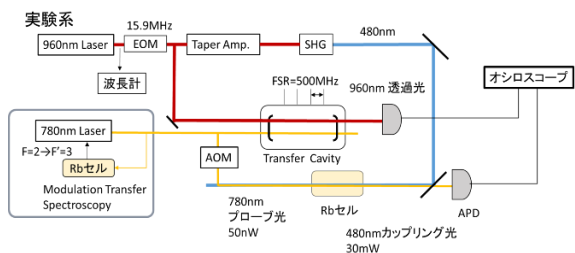


図 14 Rydberg-EIT 観測実験系

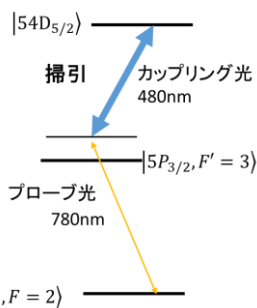


図 15 Rydberg-EIT 準位図

観測結果が図 16 である。この結果から線幅 5MHz の中間準位 $|5P_{3/2}, F' = 3\rangle$ からリドベルグ準位の $|54D_{5/2}\rangle$ へのプローブ光が弱い 50nW での EIT 信号を観測することができた。この信号の SNR は約 50 であり、APD を用いることで高感度に観測することができていることがわかる。また他の中間状態からの EIT や、ほかのリドベルグ準位が理論と一致する周波数間隔で観測されていることから、正しく欲しい準位での EIT 信号が観測されていることが分かった。

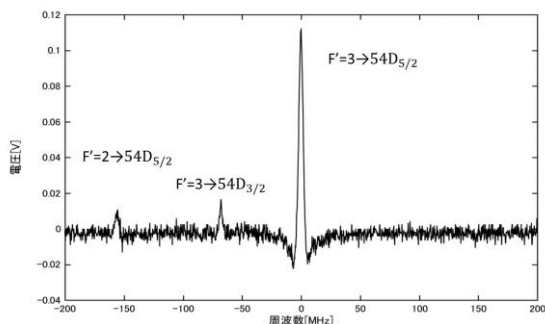


図 16 Rydberg-EIT の観測結果

APD では 1nW 程度のプローブ光までの EIT 信号を観測することができた。今後はこの光源と共振器を利用して 960nm のレーザーを安定化させる Transfer Cavity を行うことで、リドベルグ励起用の光源を用意する、さらに APD を用いて MOT 中での冷却原子の EIT の観測を試みる予定である。

5 まとめと今後の展望

本実験では Double-MOT を用いた実験系を構築し、実際に冷却原子集団を用意した。さらに原子数評価のための吸収像撮影実験系及び、計測プログラムを作成し、評価を行った。さらに、実験系の MOT へのローディング効率の改善を図るため、光誘起脱離効果 (LIAD) の検証を行った。その結果原子数のローディング効率が 2 倍向上し、原子数の増加も見られた。しかし密度の増加は得られなかった。

今後は更なる偏光勾配冷却、圧縮 MOT の最適な条件を探り、原子の冷却、高密度化を目指す。そして冷却原子中の Rydberg-EIT の観測を行い、単一光子レベルの量子非線形効果の観測を行うことで、量子中継器や、単一光子スイッチングの実現を目指す。

6 参考文献

- [1] T. Peyronel et al., Nature **488**, 57 (2012).
- [2] Daniel Tiarks, et al., Phys. Rev. Lett. **113**, 053602 (2014)
- [3] J. D. Pritchard, et. al, Phys. Rev. Lett **105**, 193603 (2010)