

電磁場誘起透明化を用いた ^{87}Rb のリユードベリ状態の観測

丹治研究室 学部4年 増田晴美

1 序論

1-1 研究の背景

近年、量子暗号通信や量子コンピュータなどの量子技術を応用した研究が注目されている。これらの量子技術においては、任意のタイミングで確実に単一光子を発生できる、オンデマンドな単一光子発生が重要な役割を果たすと考えられている。ここで、本研究室では共振器中に捕獲した ^{87}Rb の冷却原子集団をリユードベリ状態に集団励起させ、脱励起に伴って発生する光子を光共振器モードを通じて取り出すことによる高効率な単一光子発生を目指している。

1-2 研究の目的

本研究では単一光子源の構築に向けて、 ^{87}Rb 原子をリユードベリ状態に励起するために波長 480 nm と 780 nm の2つの光を用いた二光子励起を行う。現在当研究室では波長 780 nm の光は原子の遷移に対して安定化されている。しかし、上述の二光子励起を実現させるためには、さらに波長 480 nm の光をリユードベリ状態への遷移周波数に安定化させる必要がある。波長 480 nm 光のリユードベリ遷移への安定化の方法には電磁場誘起透明化(electromagnetically induced transparency : EIT)を用いたものがあり[1]、本研究はそのエラー信号を生成させるための EIT の実現と、それを通じたリユードベリ状態の観測を目的とする。

2 原理

2-1 リユードベリ原子とその特性

リユードベリ原子とは主量子数 n が大きなリユードベリ状態の原子のことである。リユードベリ原子の寿命は $(n^*)^3$ (n^* は実行的主量子数) に比例するため、主量子数が大きいほど励起状態の寿命が長い。また電子軌道半径が大きく、大きな双極子モーメント持つため、原子間相互作用が大きい。

この大きな相互作用により一つの原子がリユードベリ状態に励起すると、近傍の原子が摂動を受けてリユードベリ状態への遷移のエネルギーがシフトする(図 1)。これによりリユードベリ原子の近傍の原子はリユードベリ状態への励起が抑制される(リユードベリブロッケード効果)。このとき励起されている単一の原子を脱励起させることで、単一の光子を得ることができるので、リユードベリ原子は単一光子源として利用できる。

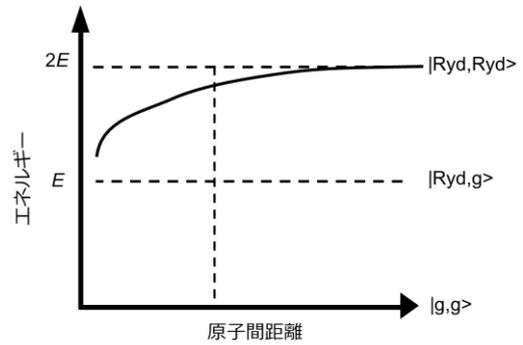


図 1: リユードベリブロッケード

2-2 電磁場誘起透明化 (EIT)

図 2 のような原子の Λ 型三準位系を考える。EIT とは、原子の初期状態が $|g\rangle$ で、コントロール光のパワーがプローブ光のパワーよりも強いときに、 $|f\rangle \leftrightarrow |e\rangle$ 間に共鳴するコントロール光を照射すると、 $|g\rangle \leftrightarrow |e\rangle$ 間で本来吸収されるプローブ光が透過する現象のことをいう。

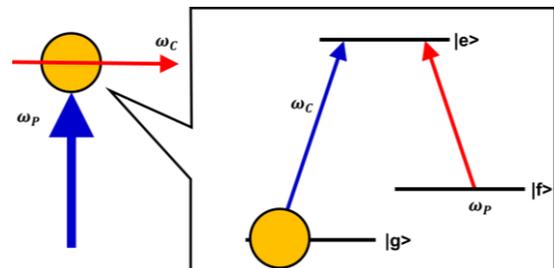


図 2: Λ 型電磁場誘起透明化

図 3 は本研究で用いる ladder 型三準位系である。このような系においても、二波長の光がそれぞれの遷移に共鳴しているときに EIT が生じ、本来吸収されるはずのプローブ光が透過する。

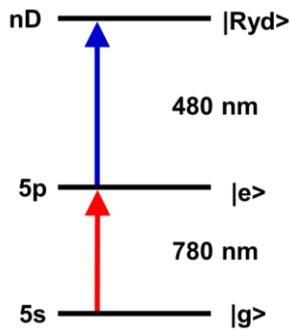


図 3:Ladder 型三準位

図 4 は、この系において冷却された原子を用いて先行研究[1]で得られた EIT スペクトルで、縦軸が透過率、横軸がプローブ光の共鳴からの離調を表している。離調が 0 の付近では本来プローブ光が吸収されるはずだが、コントロール光を照射することにより EIT が生じ透過率が上がっている。本研究では、室温の飽和ガスセル中で得た EIT スペクトルを用いて、コントロール光をリユードベリ状態の遷移周波数に対して安定化させる。

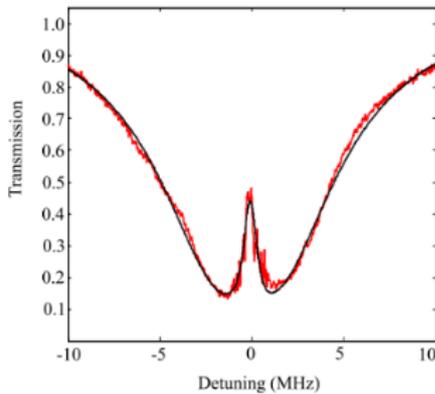


図 4:実際の EIT シグナル[1]

2-3 FM 分光法

ここでは、EIT を利用してレーザー周波数をリユードベリ状態への共鳴周波数に安定化させる際に、エラー信号の生成を行うために用いる FM 分光法について説明する。本研究においては、EIT スペクトルのピークにおいてレーザー周波数を安定化させる必要がある。しかし、信号のピークではフィードバックをかけることが出来ないため、微分形のエラー信号を作成する。本実験ではそのために FM 分光法を用いる。この方法は雑音限界に近い検出感度をもつ。FM 分光法では電気位相変調器を用いることで信号光を直接位相変調させてサイドバンドをたたせ、それを試料に入

射させ、フォトディテクタで得た遷移信号を復調することでエラー信号を生成する。

3 実験

3-1 実験系のセットアップ

波長 480 nm のレーザーをリユードベリ状態への遷移周波数に対して安定化させるためのセットアップを図 5 に示す。

コントロール光である波長 480 nm のレーザーは、チタンサファイアレーザーの 960 nm の光の第二高調波である。光源から出た光は偏光ビームスプリッタ(PBS)で安定化用と実験用にレーザー光を分岐されている。安定化用のレーザー光は、レンズで集光させ Rb 原子の飽和ガスセルに入射させている。プローブ光である波長 780 nm のレーザーは、原子の遷移に対して安定化されていて、レンズで集光後、コントロール光とガスセル中で対向させている。

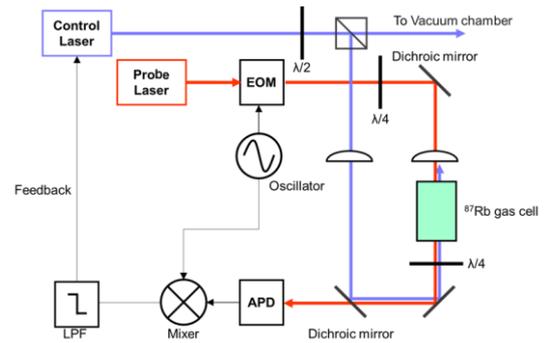


図 5:実験のセットアップ

3-2 ビーム径の決定

EIT はコントロール光が存在する位置でのみ生じ、また、コントロール光の強度は高いほど透過率が上がるため、ガスセル中でコントロール光のビーム径をできるだけ小さくした上で、プローブ光のビーム径よりも大きくすることにより、高い信号雑音比(S/N 比)で EIT を観測できると考えられる。そのため、これらの条件を満たすようにビーム径を決定する必要がある。

ここでガスセルの中心にビームウェイストがあると仮定し、コントロール光とプローブ光のウェイストサイズをそれぞれ w_{0C} , w_{0P} とする。そのときのガスセル端面でのコントロール光とプローブ光のビーム径をそれぞれ w_{EC} , w_{EP} とすると、 $w_{0C} > w_{0P}$ かつ $w_{EC} = w_{EP}$ を満たすものが最適な

ビーム径である。これらの条件を満たすウェイス
トサイズを図 6 から求めた。図 6 の横軸はガス
セル中心でのウェイスサイズで、縦軸はガスセ
ル端面でのビーム径である。黒い破線は $w_{0C} >$
 w_{0P} かつ $w_{EC} = w_{EP}$ を満たす中で w_{EC} が最小とな
る条件を示しており、その時の w_{0C} 及び w_{0P} を青と
赤の破線がそれぞれ示している。以上よりコント
ロール光とプローブ光のビームウェイスの目
標値をそれぞれ 134 μm , 100 μm とした。

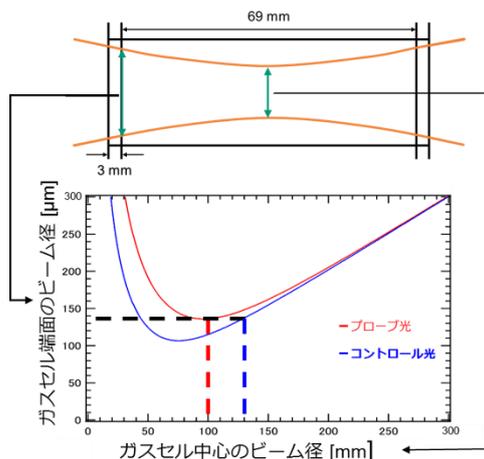


図 6:ビーム径の決定

目標としているビーム径と、構築した光学系に
おけるガスセルの位置でのビーム径の測定結果
との比較を図 7 に示す。

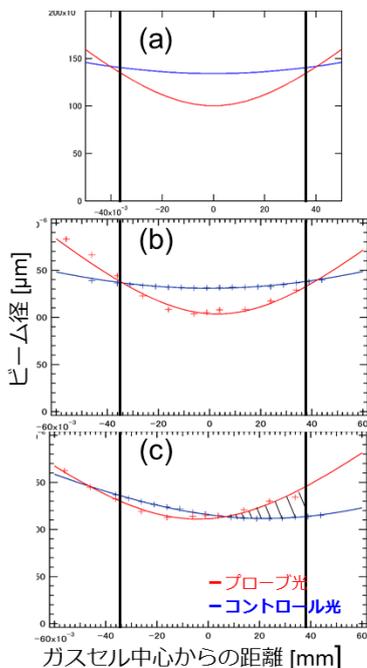


図 7 ガスセル中でのビーム径

図 7 の(a)は目標としているビーム径であり,(b),
(c)はそれぞれ鉛直方向と水平方向のビーム径で

ある。黒の縦線はガスセルの端面を表している。

図 7(c)では斜線の部分でプローブ光のビーム
径がコントロール光のビーム径より大きい、こ
の部分のプローブ光のパワーは全体の 1.1%未満
であることから許容することとした。

3-3 測定結果

今回の実験では波長コントロール光のパワー
を 100 mW, プローブ光のパワーを 30 μW , オシ
レーターの振幅と周波数をそれぞれ, 0.75 V,
43.95 MHz として EIT スペクトル測定をおこな
った。またコントロール光は主量子数 $n=63$ のリ
ュードベリ遷移に共鳴するように周波数を設定し
た。

測定したエラー信号を図 8 に示す。(a)は測定
した生データで, (b)は(a)を 64 回平均したもので
ある。

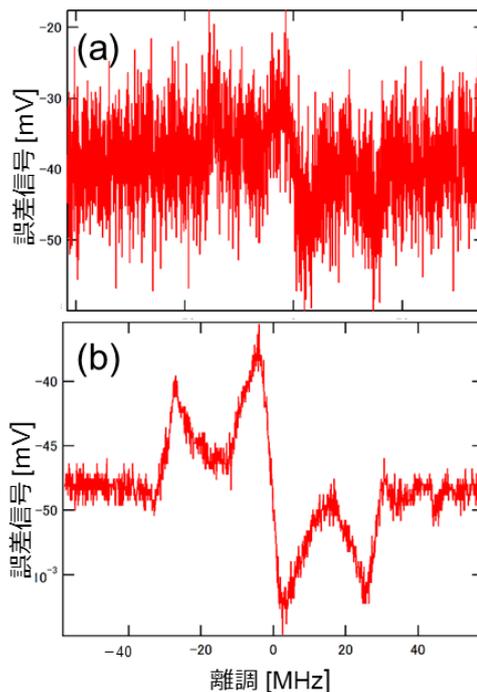


図 8:EIT のエラー信号

これらの結果から、エラー信号の観測を通じて
 ^{87}Rb のリュードベリ状態を観測できたといえる。
しかし、図 8 と先行研究で得たエラー信号(図 9:
主量子数 $n=70$)と比べると S/N 比が悪く、レーザ
ーの周波数を安定化するには十分でない。この原
因としてコントロール光の強度が低いことが考
えられる。本実験で用いたコントロール光のパワ

-100 mW は、先行研究[1]の 35 mW と比べて高いものの、プローブ光とコントロール光のビームをオーバーラップさせることを重視したために、ビームウェイストが大きくなったことが原因である。

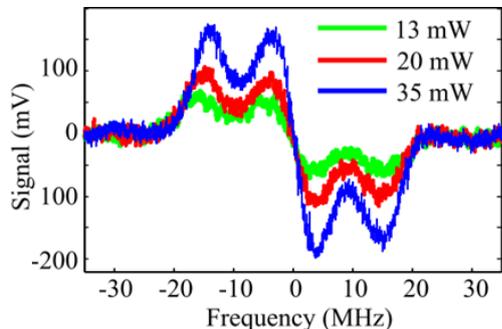


図 9: 先行研究のエラー信号[1]

3-4 ビーム径の再決定

以上を踏まえ、ビームウェイストを小さくすることで、強度を高くし、エラー信号の S/N 比向上を目指す。そのために図 10 を用いてビームウェイストの再決定を行う。

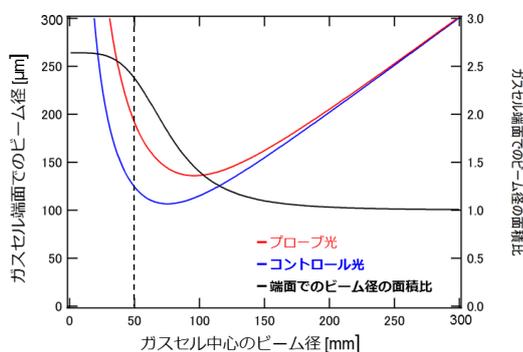


図 10: ビーム径の再決定

図 10 の黒線はコントロール光とプローブ光のウェイストサイズが同じ場合のガスセル端面でのビームの断面積比である。

図 10 からビームウェイストが 50 μm (黒い破線) 以下ではガスセル端面でのビーム面積比の変化が小さいことが分かる。そのため今後の実験ではコントロール光、プローブ光のビームウェイストを 50 μm 以下にして、測定を再度行う。この時、コントロール光の強度が今回のセットアップと比べ 6 倍以上になると予想される。

4 まとめと今後の展望

本研究では ^{87}Rb のリユードベリ状態の観測に向けて EIT を用いたエラー信号の観測をおこなった。その際、EIT シグナルの S/N 比向上のために、ガスセル中で常に波長 480 nm のレーザー光のビーム径が波長 780 nm のレーザー光のビーム径より大きくなるように最適なビーム径を見積もり、測定をおこなった。その結果、エラー信号の観測はできたが、S/N 比が十分でなかった。その原因として、波長 480 nm のレーザー光と波長 780 nm のレーザー光のオーバーラップを重視してビーム径を決定したことから、ビームウェイストが大きくなり、強度が低下したことが考えられる。

そこで、今後はまず、ビームウェイストの再決定により EIT エラー信号の S/N の改善を行う。さらにこのエラー信号を用いて波長 480 nm レーザーの周波数をリユードベリ状態の遷移周波数に対して安定化させ、その後真空中にトラップされた冷却原子集団を用いてリユードベリ状態を観測する予定である。

参考文献

- [1] R. P. Abel *et al.*, APPLIED PHYSICS LETTERS **94**, 071107 (2009).