

# $^{87}\text{Rb}$ のリュードベリ状態の観測に向けたレーザー光の

## 周波数安定化と周波数掃引

丹治研究室 茂木康伸

平成 31 年 3 月 8 日

### 1 序論

近年、光の量子力学的性質を利用した量子暗号通信などの量子情報処理技術の実用化が期待されている。このような技術を実現するためには、光子を必要な時に必要な数だけ発生させることが重要である。このような背景の下、現在我々の研究室ではオンデマンドでの光子発生を目指して、冷却原子のリュードベリ状態を利用して単一光子を発生させる実験系の構築を行っている。ここで、リュードベリ状態を観測する方法の一つとして電磁波誘起透明化(EIT)を利用する方法が知られている[1]。そこで本研究では EIT の観測に必要なとなる光源の作製を行った。

EIT の線幅は、1 MHz 程度と見積もられるため、それを観測するための光源には数百 kHz 程度の線幅で $^{87}\text{Rb}$ の $D_2$ 線( $F=2 \rightarrow F'=3$ )付近に安定化され、自然幅(6 MHz)の数倍程度の掃引が可能であることが要求される。

### 2 原理

#### 2.1 リュードベリ原子とリュードベリブロック

##### 2.1.1 リュードベリ原子

主量子数  $n$  が非常に大きな電子状態である

リュードベリ状態に励起された原子はリュードベリ原子と呼ばれ、大きな双極子モーメントや長い寿命などの特徴を持っている。

##### 2.1.2 リュードベリブロック

リュードベリ原子は双極子モーメントが大きいことにより、1 個の原子がリュードベリ状態に励起されると、その近傍の原子に摂動を与え、他原子のリュードベリ励起が抑制されるリュードベリブロックが起こる(図1)。これにより励起される原子を 1 個に制限できるため、単一光子源としての利用が可能となる。

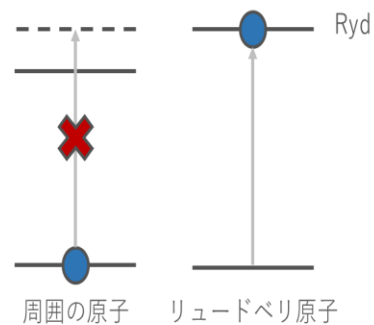


図1 リュードベリブロック概念図

#### 2.2 Doppler-free Dichroic Atomic Vapor Lase Locking (DAVLL)

Doppler-free DAVLL 法[2]は、レーザー光の周波数を原子の共鳴周波数に安定化させることに用いられ、飽和吸収分光法と DAVLL 法の組み合わせによって説明される。

## 2.2.1 飽和吸収分光法

原子は常温下で熱運動をしているため、ドップラー効果によりその吸収スペクトルは広がってしまい、原子の自然幅(6 MHz)はドップラー広がり(500 MHz)に埋もれてしまう。そこで、ドップラーフリーの吸収スペクトルを得る一つの方法として用いられるのが飽和吸収分光法である。図2に飽和吸収分光法のセットアップを示す。

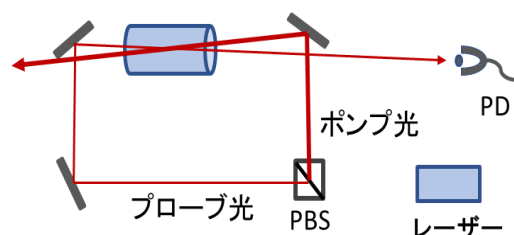


図2 飽和吸収分光法のセットアップ

飽和吸収分光法では図2のように強い光であるポンプ光と弱い光であるプローブ光を対向させた状態でガスセルに入射させる。ここで、レーザー光の周波数が原子の共鳴周波数に等しいとき、ポンプ光とプローブ光が共に、光軸方向の速度成分が0の原子に吸収されることで飽和が起こり、吸収スペクトルに鋭いくぼみが生じる。このくぼみはラムディップと呼ばれ、その線幅は自然幅と同程度となる。

## 2.2.2 DAVLL 法

DAVLL 法の基本的な原理は、少し周波数差のある吸収スペクトルの差分を取ることによって得られるエラー信号をもとに周波数安定化を行うというものである。

原子に磁場をかけると、ゼーマン効果によって準位の縮退がとけて、 $\sigma^+$ と $\sigma^-$ 遷移と呼ばれる互いに逆向きの円偏光成分と相互作用する遷移が観測される。このときそれぞれの遷移の共鳴周波数は互いに逆向きにシフトす

る。これらを別々に測定し、一方のシグナルからもう一方のシグナルを引くと、共鳴周波数を0点としてその前後で線形なスロープを持った信号を得ることが出来る。DAVLL 法ではこの信号をエラー信号として周波数安定化を行う。

## 2.2.3 Doppler-free DAVLL

Doppler-free DAVLL では飽和吸収分光法と DAVLL 法を組み合わせることにより、図3のように少し周波数差のある飽和吸収スペクトルを得る。そして、これらの差分を取ることによって得られる信号をエラー信号としてレーザーにフィードバックをかけて周波数を安定化させる。

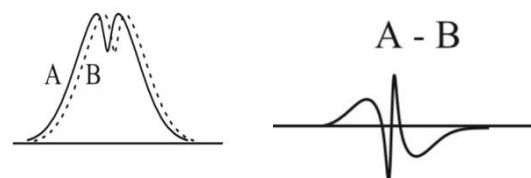


図3 飽和吸収スペクトルとエラー信号[2]

# 3 実験

## 3.1 周波数安定化

### 3.1.1 Doppler-free DAVLL による周波数安定化

本研究のために組んだ Doppler-free DAVLL の光学系を図4に示す。ECDL から出た光を AOM に入射させ往復で2回透過させることにより、400 MHzの周波数シフトを起こす。その後PBSによりプローブ光とポンプ光に分ける。ここで、プローブ光はs偏光であり $\sigma^+$ 偏光と $\sigma^-$ 偏光の1:1の重ね合わせだと見なすことが出来るので、磁場のかかったガスセルを透過させることで周波数差のあ

る 2 つの飽和吸収スペクトルを得ることが出来る。最後に  $\lambda/4$  板と PBS を用いて  $\sigma^+$  偏光と  $\sigma^-$  偏光を直交する 2 つの直線偏光に変換し、分けることで 2 つの飽和吸収スペクトルを別々に測定する。そしてその差分を取ることによって得られるエラー信号を用いてレーザーにフィードバックをかけることでレーザーの周波数を安定化させた。

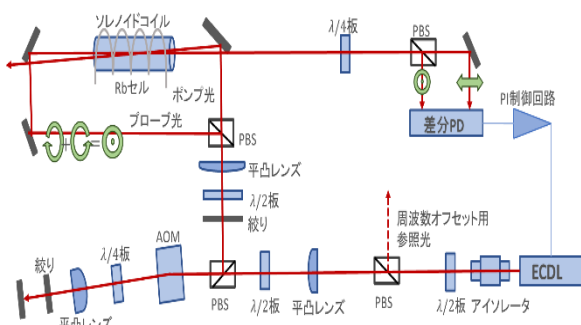


図 4 Doppler-free DAVLL の光学系

このとき、実際に得られた飽和吸収スペクトルを図 5 に、エラー信号を図 6 にそれぞれ示す。さらに安定化後のエラー信号を図 7 に示す。

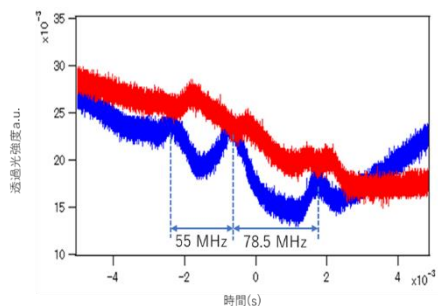


図 5 得られた飽和吸収スペクトル

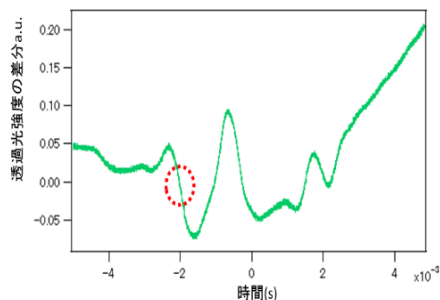


図 6 得られたエラー信号

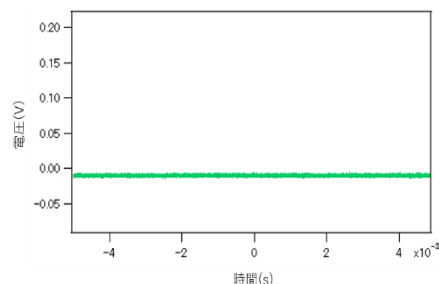


図 7 安定化後のエラー信号

### 3.1.2 周波数安定性の評価

今回、2 つの方法で周波数安定性の評価を行った。まず初めに、飽和吸収スペクトルのピーク間の周波数が分かっていることを利用して安定化後の周波数揺らぎを計算した結果、 $180 \pm 40$  kHz となった。次に、自己遅延ヘテロダイン法により得られたビート信号から安定化後の線幅を計算すると、 $140 \pm 40$  kHz となった。

### 3.2 周波数掃引

本研究のために組んだ周波数掃引用の光学系を図 8 に示す。Doppler-free DAVLL により安定化された ECDL から出た光を AOM に入射させ往復で 2 回透過させることにより、400 MHz の周波数シフトを起こす。さらに、固定信号発生モジュール (EPLO) と voltage controlled oscillator (VCO) の信号を混合した信号で、共振周波数が 200 MHz の音響光学変調器 (AOM) をドライブし、VCO の入力電圧を掃引することにより周波数の掃引を行った。

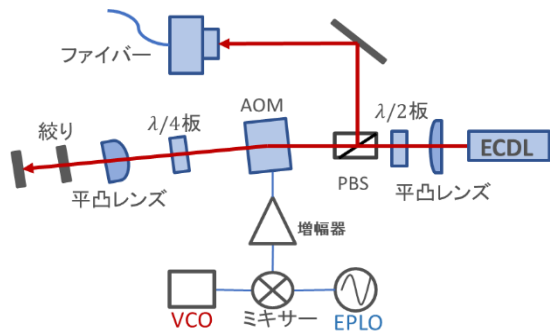


図8 周波数掃引用の光学系

実際に周波数掃引を行った際に得られたデータを図9に示す。

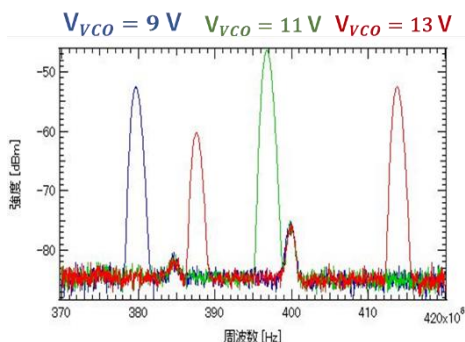


図9 AOMによる周波数シフトの大きさとシフト前の信号とのビートの強度の関係

図9より、掃引時に強度が変わってしまっていることと、385 MHz付近に意図せぬピークが現れていることが確認された。このピークはVCOの出力である94 MHzの倍波によるものであると推定され、取り除くことは困難であると考えた。

## 4 まとめと今後の展望

### 4.1 まとめ

本研究ではEIT観測用の光源として、数百kHz程度の線幅で $^{87}\text{Rb}$ の $D_2$ 線( $F=2 \rightarrow F'=3$ )付近に安定化され、自然幅(6 MHz)の数倍程

度の掃引が可能な光源の作製を行った。その結果、周波数の安定化に関しては、レーザー光を140 kHzの線幅かつ180 MHzの安定度で $^{87}\text{Rb}$ の $D_2$ 線( $F=2 \rightarrow F'=3$ )に安定化することに成功した。しかしながら、周波数掃引に関しては、今回用いた手法でEIT観測用光源としての要請を満たすような周波数掃引を行うことは困難であるという結果になった。

### 4.2 今後の展望

今回行った周波数掃引において問題となったことは、VCOとEPLOの信号を混ぜたことによりサイドバンドの影響が大きくなってしまったことである。

そこで今後の展望として、VCOのみで安定した周波数掃引が可能であるかどうかを検証し、EITの観測用光源としての使用を目指す。

## 参考文献

- [1] R. P. Abel, A. K. Mohapatra, M. G. Bason, J. D. Pritchard, K. J. Weatherill, U. Raitzsch, and C. S. Adams “Laser frequency stabilization to excited state transitions using electromagnetically induced transparency in a cascade system” Phys. Lett. 110, 071107, (2009)
- [2] T. Petelski, M. Fattori, G. Lamporesi, J. Stuhler, and G.M. Tino, “Doppler-free spectroscopy using magnetically induced dichroism of atomic vapor: a new scheme for laser frequency locking” Eur. Phys. J. D, 1-5 (2002)