

^{87}Rb 原子のリュードベリ励起用 780 nm レーザーの構築

丹治研究室 荒木陸

1. 序論

近年、量子計算や量子暗号通信などの分野では光の量子性を用いた技術の研究が盛んに行われており、光の量子状態を自在に生成することの重要性が増している。私たちの研究室では光の様々な量子状態の生成の第一段階として、オンデマンドに単一光子を生成するために、リュードベリ原子と光共振器を用いた高効率な単一光子源の構築を目指している。

リュードベリ原子とは主量子数の大きい軌道に電子が励起された状態であり、大きな電子双極子モーメントを有するため原子同士の相互作用が大きいという特徴を持つ。一つの原子がリュードベリ状態にある時、その近傍にある原子は原子同士の相互作用によりリュードベリ状態に励起されなくなる(ブロッケード効果)(図1)[1]。このブロッケード効果によって励起された単一の原子を光共振器中で脱励起させることで、単一光子を任意のタイミングで特定の空間モードに放出させることが可能になる。

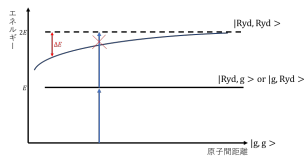


図1. リュードベリブロッケード[1]

^{87}Rb 原子のリュードベリ状態への二光子励起に用いる波長 480 nm と 780 nm のレーザー光源のうち、本研究では 780 nm のものを作製する。リュードベリ状態への遷移を精密に制御するためには、この光源が原子の遷移

周波数に対して原子の自然幅(Rb: 6 MHz)程度以下の周波数揺らぎで安定化され、また原子の自然幅の数倍の範囲で周波数可変であることが必要となる。従って本研究では、 ^{87}Rb 原子の遷移周波数に対して安定化された光源及び、その周波数シフトのための機構を構築する。また、光源の周波数安定度と周波数シフト機構の評価を行う。

2. レーザーの周波数安定化

レーザーの周波数を安定化するためには飽和吸収分光法と DAVLL(dichroic atomic vapor laser locking)法を組み合わせた Doppler-free DAVLL 法[2]を用いた。

2.1 飽和吸収分光法

飽和吸収分光法は原子の熱運動によるドップラー広がりの影響を取り除いた吸収スペクトルを得るための手段の一つである。この方法では図2のようにレーザー光をポンプ光とプローブ光に分割し、対向するようにガスセルに入射させる。

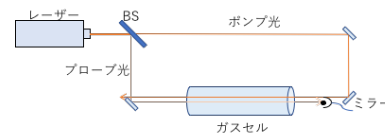


図2. 飽和吸収分光法のセットアップ

ガスセル中の気体原子は速度分布を持ち、そのうちのある特定の速度を持つ原子のみがレーザー光と共鳴する。それぞれのレーザー光と共鳴する原子の速度はプローブ光の進行方向を速度が正の向きとして次の式で表すこ

とができる。

$$\begin{cases} \text{ポンプ光: } v_1 = \frac{\omega - \omega_0}{k} \\ \text{プローブ光: } v_2 = -\frac{\omega - \omega_0}{k} = -v_1 \end{cases} \quad (1)$$

(ω :レーザー周波数、 ω_0 :原子の共鳴周波数)

レーザー周波数と原子の共鳴周波数が異なる時($\omega \neq \omega_0$)、式(1)よりポンプ光とプローブ光をそれぞれ別の原子が吸収するため、ポンプ光の存在は原子によるプローブ光の吸収率に影響を与えない。一方でレーザー周波数と原子の共鳴周波数が等しい時($\omega \approx \omega_0$)、同じ原子がポンプ光とプローブ光の両方を吸収することができる。そのため、ポンプ光により原子の吸収が飽和することで、プローブ光の吸収率が低下する。従って、プローブ光の吸収スペクトルは図3のように共鳴周波数付近での強度が低下する形となり、これを飽和吸収スペクトルと呼ぶ[3]。飽和吸収スペクトルのくぼみはラムディップと呼ばれ、その線幅は原子の自然幅程度になることが知られている。

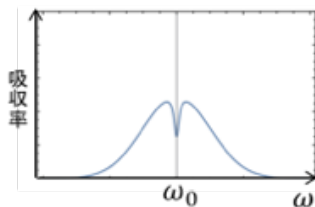


図3. 飽和吸収スペクトル[3]

2.2 DAVLL 法

DAVLL 法は、原子の共鳴周波数で電圧が 0V となり、かつ線形に変化する電圧信号を作成する方法である。この方法では、遷移選択則により、励起される磁気副準位が励起光の偏光によって異なるという性質を利用する。図4のように磁場によってゼーマン分裂した原子に対して、直交する円偏光(σ^+ , σ^-)の光を入

射することで、互いに逆方向にシフトした 2 つのスペクトルを得ることができる(図 5(a))。

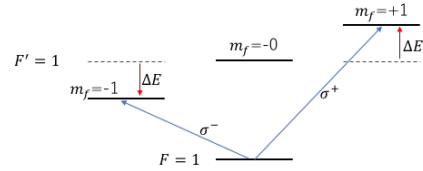


図4. ゼーマン効果と選択則

これらの 2 つのスペクトルの差分を取ること、図 5(b)に示すような、共鳴周波数で 0V となり、かつ線形に変化する誤差信号を作成することができる[4]。この方法では σ^+ 偏光と σ^- 偏光を 1:1 の比率で含む直線偏光を利用して二つのスペクトルを生成するため、レーザーの強度変化に対して二つのスペクトルが同様に変化することから、零点が安定であることが利点として挙げられる。

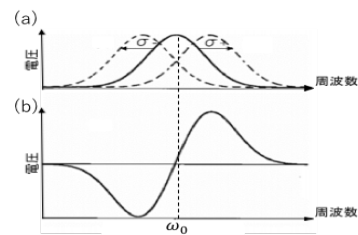


図5. 誤差信号の生成[4]

2.3 Doppler-free DAVLL 法

Doppler-free DAVLL 法では、飽和吸収スペクトルに対して DAVLL 法を適用することで図6のようにスペクトル幅の狭い誤差信号を作成する。

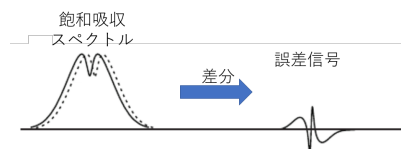


図6. Doppler-free DAVLL 法の原理

実際に構築した Doppler-free DAVLL 法の実験系の概略図を図7に示す。

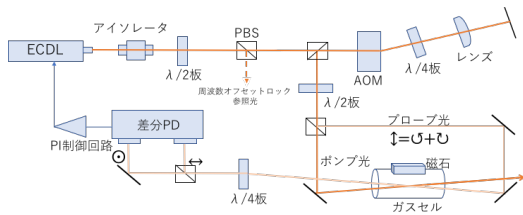


図 7. Doppler-free DAVLL 法の実験系

外部共振器型レーザー(ECDL)から出射した光を偏光ビームスプリッタ(PBS)によって分割し、強度 15 mW/cm^2 のポンプ光と 6.9 mW/cm^2 のプローブ光として磁場のかかったガスセルに対向するように入射した。ガスセルを通過したプローブ光は $\lambda/4$ 板と PBS によって σ^+ 偏光と σ^- 偏光に対応する 2 つの直線偏光に分割され、それぞれをディテクターで検出することにより周波数シフトした二つの飽和吸収スペクトルを得た。さらに検出した信号の差分を取ることで誤差信号を作成した。

2.4 磁場発生方法の改善

先行研究ではソレノイドコイルを用いて磁場を印加していたが、コイルで発生するジュール熱によってガスセルに温度勾配が生じ、入出射面となるガスセルの端面に Rb の固体が付着することでスペクトルの形状が歪んだ。そこで、まずヒートガンを用いて、付着した個体の Rb を除去した後にフェライト磁石により磁場を印加した。この結果として得られた飽和吸収信号とエラー信号を図 8、図 9 に示す。

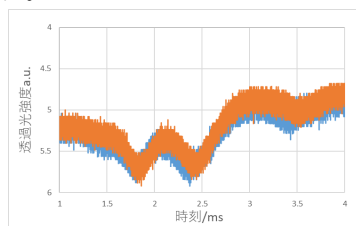


図 8. 観測した飽和吸収信号

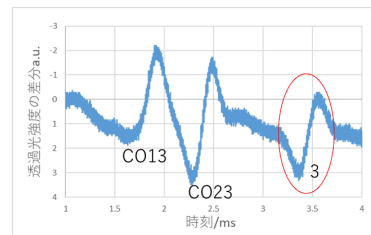


図 9. 観測したエラー信号

フェライト磁石の作る磁場によって生じた図 8 の二つのスペクトル間の周波数差は $12 \pm 1 \text{ MHz}$ であり、磁場は、 $6.3 \pm 0.5 \text{ G}$ と見積もられた。最適な誤差信号を得るために必要な周波数シフト量は 5.5 MHz であったため、フェライト磁石によって十分な磁場をかけることができたと言える。

2.5 周波数安定度の評価

2.4 で得られた誤差信号を用いて ECDL の外部共振器長を制御する piezoelectric 素子にフィードバックをかけ、レーザーの周波数安定化を行った。飽和吸収信号のピーク間の周波数が既知であることを利用して誤差信号の傾き (1.74 mV/MHz) を求め、安定化後の誤差信号の電圧揺らぎから周波数揺らぎを見積もった。その結果周波数揺らぎは $630 \pm 80 \text{ kHz}$ となり、レーザーを ^{87}Rb 原子の自然幅以下の安定度で安定させることができた。

3. 音響光学変調器を利用したレーザー周波数シフト

安定化させたレーザーに対して、音響光学変調器(AOM)を利用してレーザー周波数をシフトさせる機構を構築した。AOM は RF 信号によって結晶中に発生する音響波を用いてレーザー光を回折させる光学素子である。AOM による回折角は RF 周波数によって変化する

ため、周波数を変化させた時の光軸のずれを抑制するためにダブルパス構造を用いた。

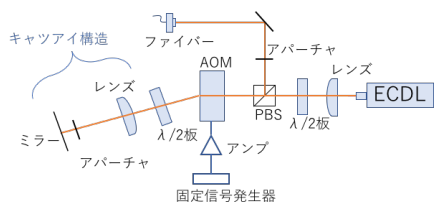


図 10. 周波数シフトのセットアップ

一回目に回折された光はレンズとミラーから成るキャッツアイ構造により反射されて AOM に戻り、そこで二回目の回折が起こる。この回折光は RF 周波数に依らず入射光と重なる。これによって RF 周波数変化による光軸の変化を抑えることができる。

AOM を駆動する信号には固定信号発生器 (HP8648C) の出力を RF 増幅器 (ZFL-1000LN) で増幅したものをを用いた。この周波数を ν とすると、AOM で回折されたレーザーの周波数は 2ν だけシフトする。

まず、周波数シフト量を測定するために、AOM を通過する前で分岐させた同じ光とのビート信号をスペクトラムアナライザで観測し、光の周波数が AOM の駆動周波数の二倍変化することを確認した。この時、レーザーの周波数変化に伴って、ファイバーから出射されるレーザー光の強度が変化することが観測された (図 11)。

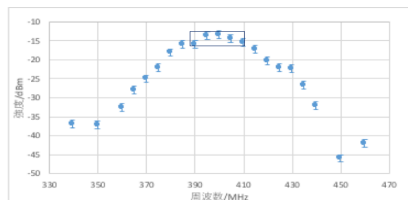


図 11. 周波数シフトによる強度変化

AOM の中心周波数の 2 倍である 400 MHz 付近で強度は最大になり、そこから離れるに

つれて強度が低下した。400 MHz から離れるに従って強度が低下する原因として、まず AOM での回折効率が低下したことが考えられる。また、シングルモードファイバーにカップルされた回折光に対して測定を行ったため、キャッツアイ構造が不完全であることにより RF 信号の周波数変化によって往路と復路の光軸のずれが生じた可能性が考えられる。400 ± 10 MHz の範囲の強度変化は 50% 以内に収まったため、自然幅の 3 倍程度までの周波数シフトについては大きな強度変化を伴わずに行えることが分かった。ただし今回の測定ではスペクトラムアナライザでの強度の読み取り誤差が大きかったため、強度を一定に保てる周波数範囲を評価するためにはより高い精度の方法で再測定を行う必要がある。

4. まとめと今後の展望

^{87}Rb 原子の遷移周波数に対して安定化された光源及び、その周波数をシフトさせるための機構の構築を行った。Doppler-free DAVLL 法を用いた結果 630 kHz (< 6 MHz) の周波数揺らぎでレーザーを安定化できた。また、AOM による周波数シフトは実現したが、周波数がシフトされた光の強度の測定方法は改善する必要がある。今後は作製した 780 nm レーザーを用いてリユードベリ状態の観測を目指す。

5. 参考文献

- [1] P Pillet et al. JPCS **194** 012066 (2009)
- [2] T. Peteleski et al. Eur. Phys. J. D **22**, 279 (2003)
- [3] Atomic Physics, C J. Foot et al. (2005)
- [4] Kristan L. Corwin et al. OSA Pub. **37**, 3295(1998)