

Rb 原子のリドベルグ状態励起用 周波数安定化レーザーの開発

中川研究室 豊沢 一海

1. 序論

ある量子系を人工的に作り出し、それを用いて別の量子系の振る舞いについて調べる方法として、量子シミュレーションと呼ばれるものがある。例えば、結晶中に存在する1つの原子のスピンの状態を調べると、その原子のスピンは隣接する原子のスピンの影響を受けるだけでなく、離れた原子のスピンの影響をも受ける。さらにそれら離れた原子のスピンはまた他の原子のスピンの影響を受けている。原子1つのスピンの状態を厳密に調べようとすると、それら全てのスピン間の相互作用を考慮しなければならず、スピンの数に対して計算量が指数関数的に増加する。古典コンピュータによる計算では、原子の数ほどのスピンの相互作用を全て計算するとなると、計算量が膨大となるため不可能である。そこで、これを計算によってではなく、同じ振る舞いをする別の量子系を用意することによって調べるといったものが量子シミュレーションである。

上向きスピンと下向きスピンの2つの状態をとる粒子が規則的に配列されたものについては、イジングモデルを使って考えることができる。それぞれのスピンの独立して存在しているとすれば、隣接するスピンの同方向であっても逆方向であってもエネルギーは等しくなる。しかし実際には、結

晶中の原子はスピン間に相互作用がはたっているため、隣接するスピンの向きの関係によってエネルギーが異なる。本研究室では、反強磁性体と同じ振る舞いを示す量子系として、冷却された中性原子Rbを用いた量子系を用意し、スピンの上向きと下向きをRb原子のリドベルグ状態と基底状態に対応させることで、量子シミュレーションを行うことを目指している。シミュレーションを行う系では、個々の原子の状態を観測しやすくするため、原子間隔を離している。離れた原子の状態に相関を作り出すためには、原子間に大きな相互作用が必要である。これをリドベルグブロック効果と呼ばれる現象を利用することで実現している。リドベルグブロック効果を起こすため、2波長のレーザーによる二光子吸収により、Rb原子をリドベルグ状態へ励起させる。1つの原子がリドベルグ状態へ励起されると、その近傍の原子はエネルギーシフトを起こす。このエネルギーシフトによって励起光との共鳴から外れ、リドベルグ状態への励起が抑えられるのがリドベルグブロック効果である。エネルギーシフト量は周波数にしておよそ10MHz程度であり、励起用レーザーの周波数はこれより十分安定でなければならない。このようなことから、励起用レーザーの周波数安定化に取り組んだ。

2. Rb原子のリドベルグ励起

リドベルグ状態とは、電子が非常に大きな主量子数 n である励起状態のことをいう(図1)。リドベルグ状態にある原子はリドベルグ原子と呼ばれる。

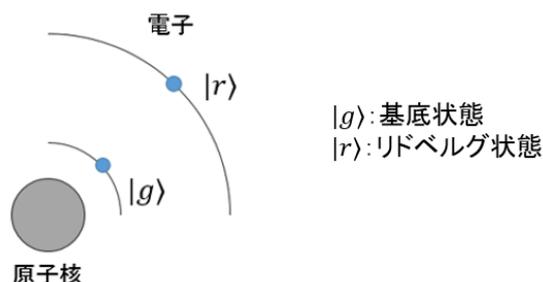


図1 リドベルグ状態

主量子数 n の原子がもつ電気双極子モーメントは n^2 に比例するため、リドベルグ原子は大きな双極子モーメントを有する。これにより離れた位置に大きな電場を作り出す。さらにリドベルグ原子自身も原子核と価電子の結びつきが弱いことから、わずかな電場でも大きな影響を受け、原子間に大きな相互作用を生み出すことが可能となる。相互作用の大きさは、2つの原子が近距離にあるときは双極子-双極子相互作用で n^4 に比例し、遠距離の場合はVan der Waals型の相互作用で n^{11} に比例する[1]。

基底状態のRb原子に励起レーザーを吸収させリドベルグ状態へ遷移させると、そのリドベルグ原子近傍に存在する別の原子はエネルギー準位がシフトし、励起レーザーと共鳴しなくなるため、リドベルグ状態への励起が抑えられる(図2)。この現象をリドベルグブロッケード効果と呼ぶ。原子のエネルギー準位のシフト量 ΔE は周波数でおよそ10MHz程度となる。励起レーザーの周波数揺らぎ $\Delta\nu$ が大きく $h\Delta\nu > \Delta E$ と

なっていると、エネルギーシフトした原子も励起レーザーを吸収してリドベルグ状態へ励起してしまう。

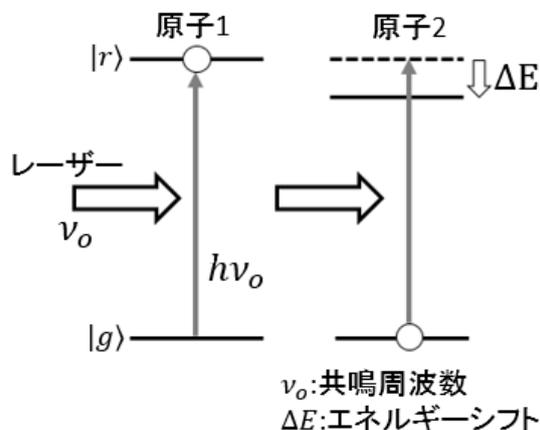


図2 リドベルグブロッケード効果

リドベルグブロッケード効果を起こすためには、励起レーザーに $h\Delta\nu \ll \Delta E$ を満たす周波数安定度が求められる。

Rb原子のリドベルグ状態への励起は、 $5P_{3/2}$ を中間準位として780nmと480nmのレーザーによる二光子吸収で行っていた(図3)。

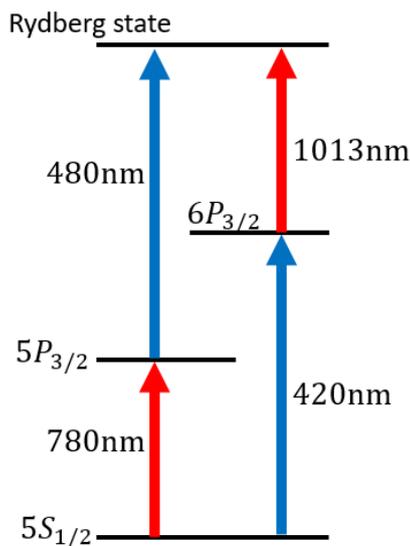


図3 Rb原子のエネルギー準位と励起用レーザーの波長

今後、量子シミュレーションを行う系で原子を増やして実験を行うには、励起レーザーのパワーを高める必要がある。これまでの780nmと480nmの波長の組み合わせによる励起では、480nmレーザーのパワーが200mW程度までと限度があった。そこで中間状態を $6P_{3/2}$ として、420nmと1013nmのレーザーで励起を行うことにより、上側遷移に対応した1013nmレーザーのパワーが1W程度まで上げられることが期待でき、こちらの準備を進めている。なお、励起用レーザーの線幅 $\Delta\nu$ は、2つのレーザーそれぞれの線幅 $\Delta\nu_L$, $\Delta\nu_U$ の和として $\Delta\nu = \Delta\nu_L + \Delta\nu_U$ で表される。

3. 780nm と 480nm レーザーの周波数安定化

リドベルグ状態励起用レーザーの周波数安定化は、トランスファー共振器と呼ばれる共振器を利用して行っている。

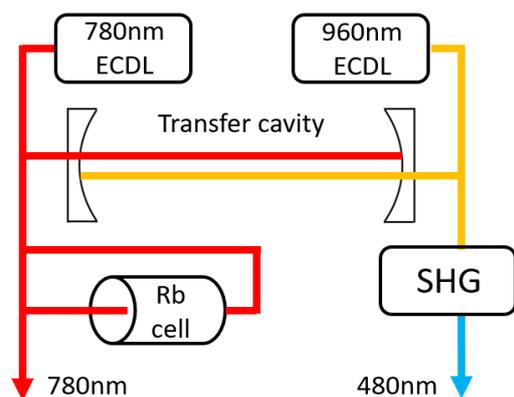


図 4 トランスファー共振器によるレーザー周波数安定化

まず780nmレーザーをPound-Drever-Hall法により共振器にロックする。次に modulation transfer spectroscopy(変調移

行分光)を行うことで、780nmレーザーがRb原子の基底状態と $5P_{3/2}$ 状態間の遷移に対応した周波数となるよう、共振器長を合わせる。一方、480nmレーザーについては、まず960nmレーザーを780nmで利用したものと共通の共振器にロックする。これにより780nmレーザーの周波数安定度を960nmレーザーに移すことができ、このような役割の共振器をトランスファー共振器と呼んでいる。そして周波数安定化された960nmのレーザーから第二高調波発生(SHG)により、周波数安定化された480nmレーザーを生み出している。最後に電磁誘起透明化(EIT)現象を利用した分光を行って、780nmと480nmを基底状態とリドベルグ状態間遷移の周波数に合わせている。

4. 1013nm レーザーの周波数安定化

780nmと480nmのレーザーの組み合わせで行っていたトランスファー共振器によるレーザーの周波数安定化を、420nmと1013nmのレーザーについても同様に行うこととした。まず波長1013nmのレーザーに対する共振器のフィネスを評価することに取り組んだ。使用した共振器は、熱膨張率の非常に小さなULEガラスをスペーサーとし、共振器長 $L = 20\text{cm}$ 、両端に取り付けたミラーはいずれも曲率半径 $R = 50\text{cm}$ 、反射率 $R_m = 99.95\%$ 以上のものである。この値からフィネス F を計算すると、

$$F = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} \approx 6300$$

となる。また、共振器のFSRは

$$FSR = \frac{c}{2L} = 750\text{MHz}$$

である。したがって計算上では、この共振器を用いることによってレーザーの線幅 $\Delta\nu$ を

$$\Delta\nu = \frac{FSR}{F} \approx 120\text{kHz}$$

まで狭めることが可能である。

共振器中でビームが最も効率よく共振する条件は、

- ① ビームウェストが共振器の中心に位置すること
- ② ビームの波面の曲率半径 R_b がミラーの反射面においてミラーの曲率半径 R_m と一致すること

の2つを満たすことである[2]。これらの条件から計算すると、ビームウェストにおけるビームの直径が $2\omega_0 = 0.508\text{mm}$ となる時に条件を満たし、このビームウェストの位置に共振器の中心を合わせれば良いことになる。ビームウェストにおいて直径 0.508mm となるよう、設計を行った(図5)。

ECDL から出射される光を、直径 $D = 2.5\text{mm}$ の平行ビームとみなし、焦点距離が $f_1 = 15\text{cm}$, $f_2 = 5\text{cm}$ の2枚のレンズで集光を行った。1枚目のレンズによる集光点から2枚目のレンズまでの距離が $L_1 = 5.8\text{cm}$, 2枚目のレンズから共振器中のビームウェストまでの距離が $L_2 = 38\text{cm}$ となる時に、ビームウェストにおけるビームの直径がおよそ 0.5mm となる。

レーザーのPZTに10Hzの鋸波を印加して共振器の透過光強度を測定した(図6)。共振器からの反射光がECDLに戻ることを抑えるため、ECDLの直後にアイソレータを2台挿入している。さらに共振器の手前に置いた $\lambda/4$ 板によって、共振器からの反射光は入射光に対して 90° だけ偏向が回転し、偏光ビームスプリッタ(PBS)により反射され、これによってもECDLへの戻り光の影響を抑えている。共振器からの透過光をフォトディテクタ(PD)で検出し、周波数ごとの強度をオシロスコープで測定した。

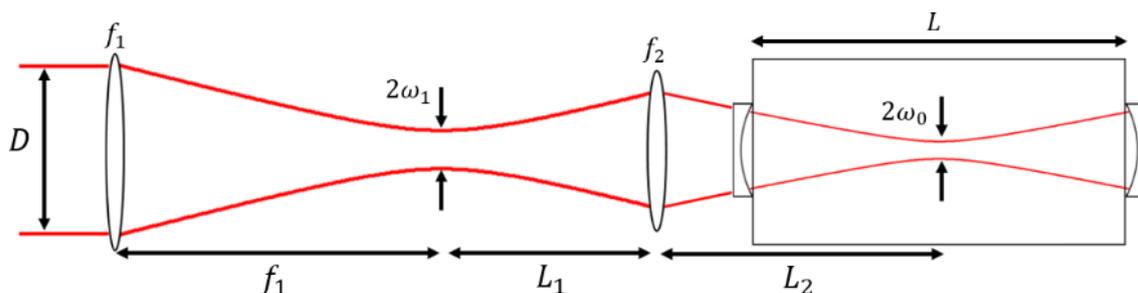


図5 ビームの集光

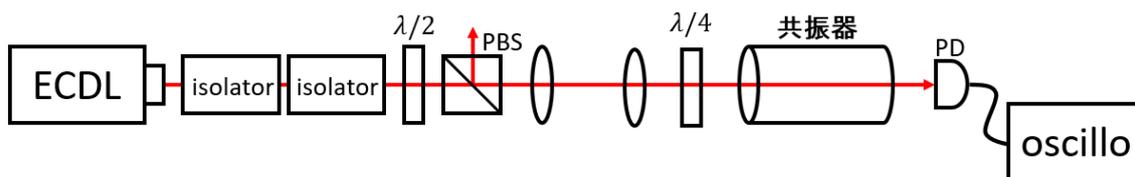


図6 共振器のフィネス測定

この共振器では、隣のモードの周波数間隔が 221MHz であり、およそ FSR の 0.3 倍である。透過光スペクトル(図 7, 図 8)で、特に強度が大きく出ている 2 つのピークが TE₀₀モードであるととし、その間隔が FSR であると見ると、隣のモードとの間隔が FSR の 0.3 倍となっていることが確

認できる。FSR と共振線幅の比からフィネスを見積もると、

$$F = \frac{FSR}{\Delta\nu} = 906$$

であり、共振器の線幅は

$$\Delta\nu = \frac{FSR}{F} = 828\text{kHz}$$

であった。

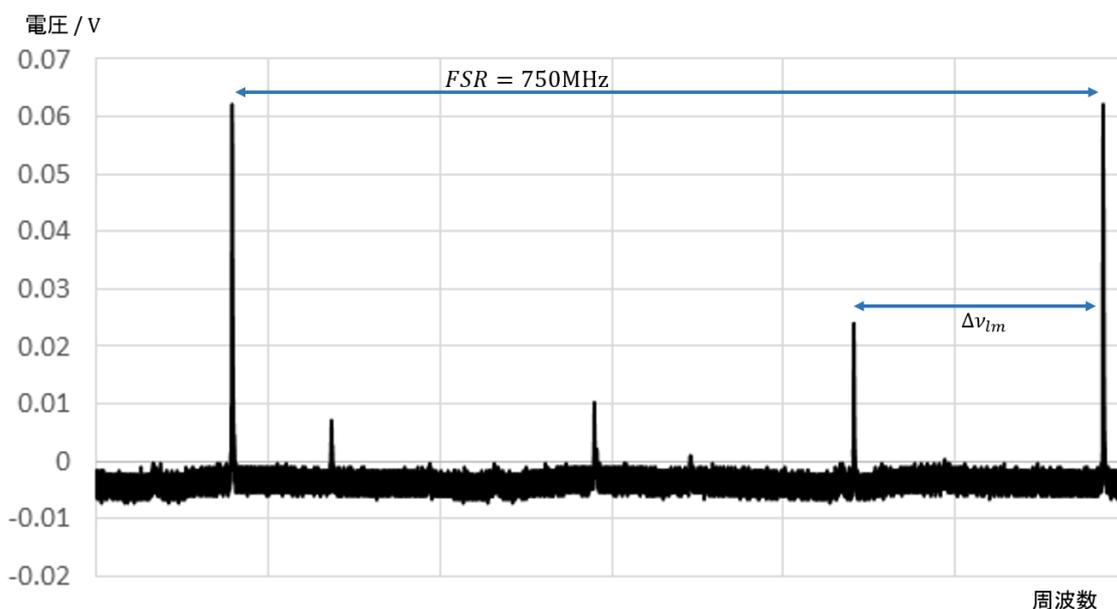


図 7 共振器の透過光スペクトル

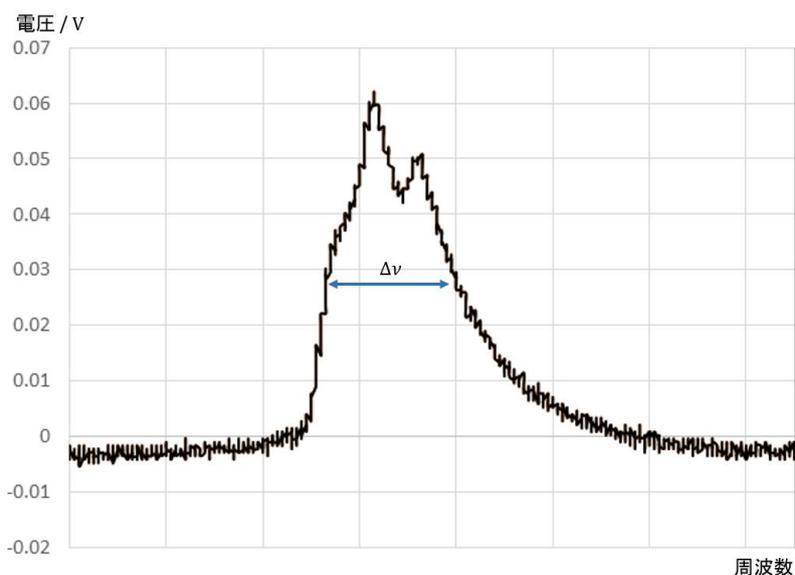


図 8 透過光スペクトル TE₀₀モード部分の拡大図

5. まとめ

1013nm と 420nm の組み合わせの励起用レーザーの周波数安定化については、まず 1013nm レーザーを共振器へ入射し共振させ、透過光の強度を観測することで共振器のフィネス評価を行った。フィネスはおよそ 1000 であったが、スペクトルの形状が歪んでいることから、フォトディテクターの応答速度によって線幅が広がっている可能性などもあり、実際にはフィネスはさらに高い値であるとも考えることもできる。今後はこの共振器をトランスファー共振器として使用し、420nm と 1013nm の 2 つのリドベルグ状態励起用レーザーを周波数安定化させることになる。

参考文献

- [1] M.Saffman, T.G.Walker, K.Mølmer “Quantum information with Rydberg atoms” REVIEWS OF MODERN PHYSICS, Vol.82 2313 (2010).
- [2] Amnon Yariv, Poch Yeh “光エレクトロニクス” 丸善出版 (2010).