

# $^{87}\text{Rb}$ 原子の 5S-6P 遷移における光会合分光に関する研究

岸本研究室 2033097 本田海斗

## 1 研究背景・目的

ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) は巨視的な数の原子が単一の量子状態を取る現象で、その特性から様々な分野に応用が為されているが、現状これは時間的・空間的に段階を経て生成される為、BEC の応用研究には大きな制約がある。我々の目標はこの BEC を連続的に生成する事にある。

BEC の生成には原子の高い位相空間密度の達成が必要で、この手法としてレーザー冷却が用いられている。これは原子に共鳴光を吸収させその運動量でもって原子を減速、冷却するもので、 $^{87}\text{Rb}$  原子においてはこの共鳴光として長らく 5S - 5P 遷移が用いられてきた。しかし今日では半導体レーザーの登場により、ある程度任意の波長で発振するレーザーが容易に入手でき、変わって 5S - 6P 遷移を用いることができる様になった。この遷移を用いる利点として、5S - 5P 遷移と比較し、自然幅の狭さから来るより低い冷却限界温度や、励起寿命の長さと同様に緩和過程が多岐に渡る事により、別の原子が自然放出を再吸収する事に伴う密度の低下を抑制できる等がある。

先行研究 [1] では時間的操作を要するものの全光学的過程によって BEC の達成が為されており、この冷却過程において遠共鳴の光が用いられるが、図 1 の様にこの周波数如何でトラップロス割合が大きく異なってくる。これは光会合の影響とされており、高い位相空間密度実現の為にはこの影響抑制が不可欠である。

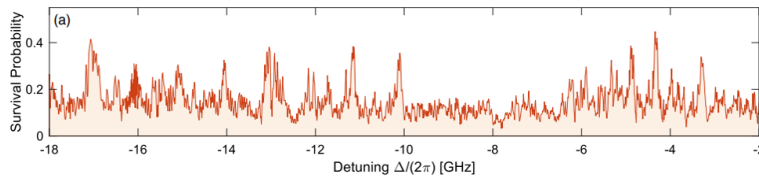


図 1 各周波数における原子のトラップ残存率 [1]

光会合とは原子集団に光が入射することで分子が生成される現象であり、図 3 の様に励起状態の分子ポテンシャルが基底状態のそれと比較し長距離に及ぶ為に発生する。生成された分子は結果的にトラップから散逸してしまう。

光会合が発生する周波数は分子ポテンシャルの振動準位により定まっている為、これを避けて運用する事で影響抑制が可能であるが、先行研究が豊富にある 5S - 5P 遷移と異なり 5S - 6P 遷移ではこれを改めて計算・測定し導出する必要がある。本研究はこれを目標としている。

## 2 光会合周波数

分子のポテンシャル  $V$  は、乖離限界  $D$  を用いて  $V = D - \sum_n C_n/R^n + (\text{クーロン斥力})$  の様な式で表せるが、今回の目的では共鳴近傍数 GHz のみ、即ち  $R$  の十分大きい範囲を考慮すれば十分であるため、クーロン斥力も高次の項も無視して  $V = D - C_3/R^3$  と書ける。ここから、光会合の周波数間隔  $\Delta\nu$  を導出でき、

$$\Delta\nu = \frac{h^5}{\mu^3 C_3^2} \left[ \frac{\Gamma(4/3)}{2\sqrt{2\pi}\Gamma(5/6)} \right] (\nu - \nu_D)^6, C_3 = \frac{3\hbar\lambda^3 A}{16\pi^3} \quad (1)$$

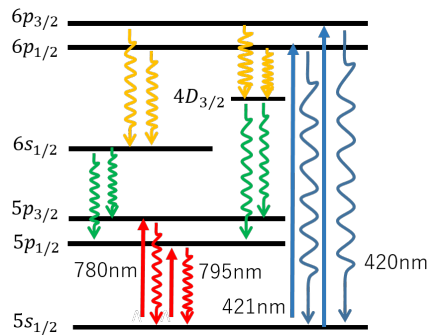


図2  $^{87}\text{Rb}$  原子の遷移図

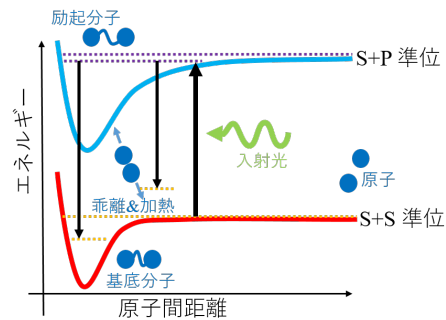


図3 光会合の概要図

となる. ここで,  $h$  はプランク定数,  $\mu$  は換算質量,  $\nu, \nu_D$  は振動準位量子数とその補正項,  $\lambda$  は波長,  $A$  はアインシュタインの A 係数である. この式から各遷移における  $C_3$  を導出したものが表 2 である.

表 1  $^{87}\text{Rb}$  原子の各遷移における波長と A 係数

遷移	波長 /nm [2]	A 係数 /s <sup>-1</sup> [2]	$C_3$ (計算値) /a.u.
$5s_{1/2} - 5p_{1/2}$	794.9783	35920000	8.9070
$5s_{1/2} - 5p_{3/2}$	780.2405	37550000	8.8030
$5s_{1/2} - 6p_{1/2}$	421.6706	2456000	0.009088
$5s_{1/2} - 6p_{3/2}$	420.2972	3664000	0.13426

$C_3 \propto \lambda^3 A$  となっている事から, それらが小さい  $5S - 6P$  遷移では  $C_3$  の値も 2 桁程小さくなり, 結果として式 1 から光会合周波数間隔も 4 桁程広がる事が分かる. これを図に起こした物が図 4 であり, この図からも  $5S - 6P$  遷移の方が  $5S - 5P$  遷移と比較し光会合周波数の避けやすさという点でも利点があることが見て取れる. 尚, 図中の色分けは超微細構造である.

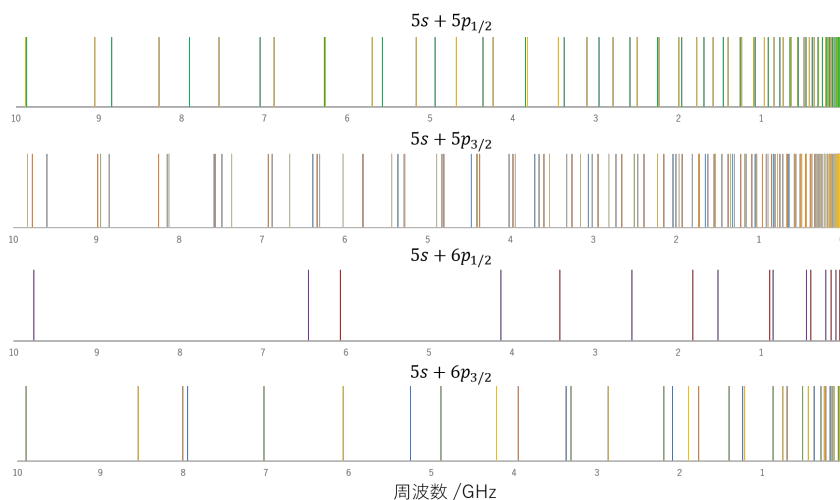


図 4 光会合周波数の予想位置

実際には、 $C_3$  について計算値と実験値の間に 5% 程度の差がある [3] 事が知られている他、振動準位量子数の補正項  $\nu_D$  も実験的に確認する必要があるものの、それらの同定ができればこの式は十分有効である。ただし、先行研究が豊富な  $5S - 5P$  遷移と異なり、 $5S - 6P$  遷移では改めてこれを実験的に確認する必要がある。

### 3 測定方法

光会合周波数は、事前にトラップしておいた原子に光会合用レーザーを照射し、どれくらい散逸したかによって測定を行う。そのため、光会合用光源として狭線幅、周波数が安定、数 GHz 程度周波数が自由に掃引できるという要件を満たした物が必要となる。通常このような光源は、2 組の外部共振器レーザー (ECDL) を用い、片方を原子の吸収線等に安定化し、両者のビート信号が一定となるようフィードバックを掛ける、オフセットロックと呼ばれる手法で用意される事が多い。しかし、一般的に ECDL やフィードバック回路は高コストであるため、これらを 2 組使用するオフセットロックは必然的に高コストな手法となる。そこで我々は、ECDL とフィードバック回路 1 組と、自由発振レーザー 1 台のみで同等の機能が実現できる、サイドバンドへの光注入同期を用いて必要な光源を準備する事とした。

光注入同期は、自由発振レーザーに対し狭線幅化したレーザーを注入することで、自由発振していたレーザーが同じ線幅、同じ周波数で発振する現象であり、これなら自由発振レーザーでも狭線幅且つ周波数安定という要件を満たせる。ここに周波数差を設ける方法として駆動電流に変調を掛けサイドバンドを立てる方法があり、ここに光注入を行うとサイドバンド共々狭線幅化する。一般的に数 GHz オーダーの変調ではサイドバンドはキャリアに対して数 % 程度しか立たないことが知られており、直接的にサイドバンドを用いる事はできない。しかし発振モードがそこに存在するのは確かであるため、サイドバンドへの光注入は成功する。図 5 の様に用いれば、ECDL とフィードバック回路 1 セットと、自由発振レーザー 1 台で要件を満たした光源を作成できる。実際に作成した光学系は図 6 の様になる。

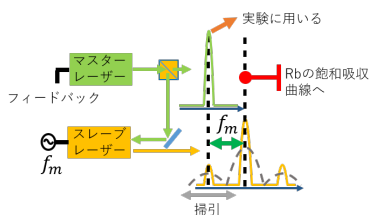


図 5 サイドバンドへの光注入

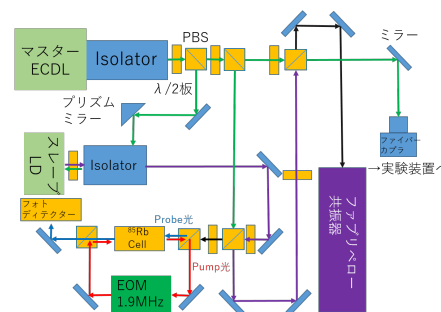


図 6 作成した光学系の概要図

### 4 実験結果

まず初めにマスターレーザーの評価を行った。マスターレーザーによって得られた飽和吸収信号は図 7 の様になった。参考として  $^{85}\text{Rb}$  原子の  $5s_{1/2} - 6p_{1/2}$  遷移図 [4] を図 8 として載せる。

この図と遷移図から、マスターレーザーのモードホップフリーレンジはおよそ 3GHz と見積もれる。これをスレーブのキャリアに対してパワーを変えながら光注入を行ったものが図 9 である。この図から、光注入パワーが 2mW の場合、マスターのモードホップフリーレンジとほぼ同じ範囲まで追従している事がわかる。即

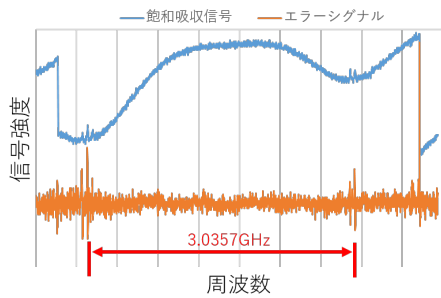


図7 マスターレーザーによる飽和吸収信号

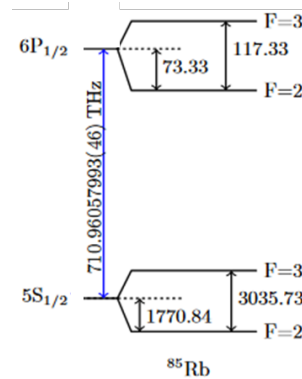


図8  $^{85}\text{Rb}$  原子の  $5s_{1/2} - 6p_{1/2}$  遷移図 [4]

ち,2mW の注入量の場合 3GHz 以下の電流変調周波数ではサイドバンドではなくキャリアに対して注入される可能性が高い. そのため変調周波数を 6.3GHz と大きく取り,+1 次サイドバンドに対して光注入を行った際の飽和吸収信号が図 10 である.

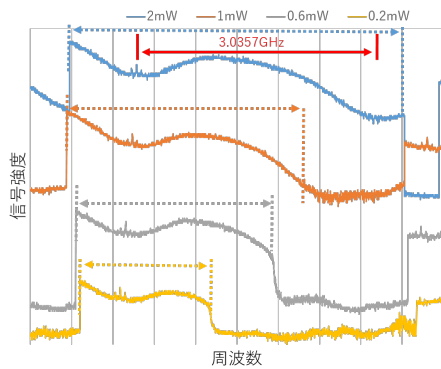


図9 キャリアに対して光注入を行った際の飽和吸収信号

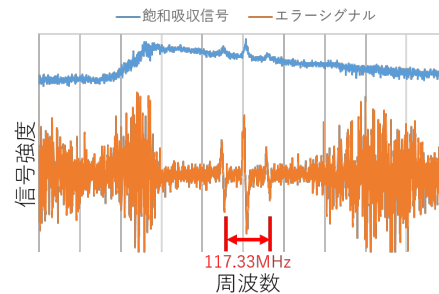


図10 光注入量 2mW,6.3GHz+1 次サイドバンド に対する光注入を行った際の飽和吸収信号

図 10 では 2 つの超微細構造のピークとクロスオーバーがはっきり確認できており, 遷移図よりこれらの間隔が 117MHz であるので, 同期範囲は 200MHz 程度あると見積もれる. これがきちんとサイドバンドに注入されている事をファブリペロー共振器で確認したものが図 11 である. このファブリペロー共振器の FSR は 1GHz であり, それにより繰り返し見えている. マスターレーザーの信号間の幅の 1/3 ぐらい離れた地点にスレーブのキャリアが来ている事から, マスターとスレーブキャリアの間に想定通りの周波数差が存在していると分かる. また, 光スペクトラムアナライザを用いてスレーブレザーの広範に渡る発振状況を確認したものが図 12 である. 光注入時には他のモードによる発振が概ね 5dB 程度抑え込んでいる事から, 光注入効率も十分である事が見て取れる.

図 9 から, 光注入パワーを落とすと電流変調周波数が小さい領域でもキャリアへ注入される可能性が下がると見て, 掃引可能な周波数領域を広げられないかと検討した物が図 13 である. 光注入パワーを落とすと当然, キャリアのそれと同じくサイドバンドへ光注入した場合の同期範囲も狭まることになる. 準位 1 本とクロスオーバーが辛うじて見えている状況から判断しておそらくこの状態での同期範囲は 50MHz 程度であり, この状態でロックポイントの搜索を行うのは現実的ではない. 従って電流変調周波数は大きくせざるを得ないとい

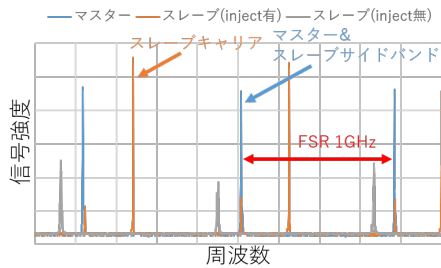


図 11 ファブリペロー共振器による 6.3GHz サイドバンドへの光注入状況

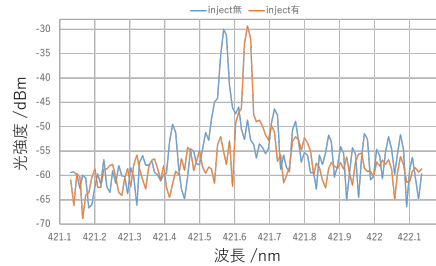


図 12 光スペクトラムアナライザによる 6.3GHz サイドバンドへの光注入状況

う事になる。しかしながら、図 14 [4] から分かる様に、今回ロックポイントの検索を行っている  $^{85}\text{Rb}$  原子と  $^{87}\text{Rb}$  原子の共鳴周波数は 2GHz 程度離れている為、 $^{85}\text{Rb}$  原子を活用してロックを行えば周波数差が小さい領域で安定化できなくともそれほど問題にはならない。

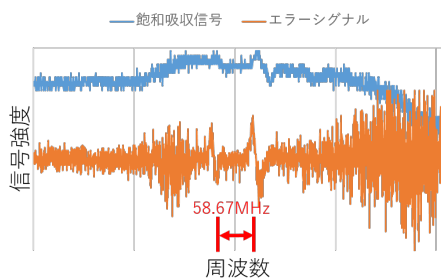


図 13 光注入量 1mW, 3.3GHz+1 次サイドバンドに対する光注入を行った際の飽和吸収信号

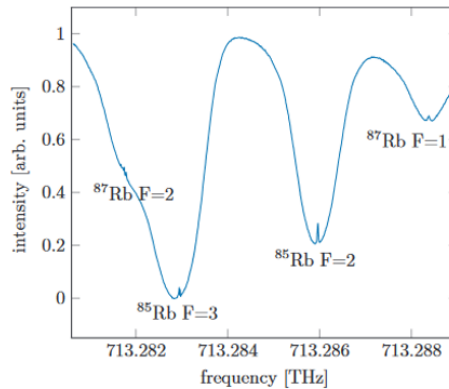


図 14 Rb 原子全体の飽和吸収信号 [4]

現状、光注入パワーを 2mW に固定した場合、5.5GHz から 7.5GHz のオフセットを設けてロックに成功している。下限についてはキャリアへ注入されやすくなる事に伴いエラーシグナルの S/N 比が悪化していく事による為改善は難しいが、上限はマスターレーザーの発振モードが存在しない事に起因する為、更なる改善の余地がある。現状可能な周波数掃引範囲を  $^{85}\text{Rb}$  原子の 2 つのロックポイントと重ね合わせれば、図 4 の右半分程度の範囲を掃引できる事になるため、差し当って十分な掃引範囲があると言える。

ただし、実験で確認できたのはあくまで +1 次サイドバンドに対する光注入である。本来の光会合周波数の測定は赤方離調側、-1 次サイドバンドに対して光注入同期を行い周波数安定化が為せる必要がある。原理上、サイドバンドは ± どちら側であっても等しい強度で立つはずだが、光注入効率については +1 次、-1 次の間で大きな差があった。サイドバンドへ光注入時のそれぞれのキャリアのピーク強度を比較したものが図 15, 16 である。駆動電流 64mA 時ではピーク強度がおおよそ 10:1、即ち +1 次と比較し -1 次では 1/10 程度の光注入効率しか出ていない事が分かる。レーザー駆動電流が高ければ高い程、-1 次サイドバンドへは光注入しやすいという過去の経験から、レーザーの定格至近の 88mA まで駆動電流を高めても、3:1 程度までしか改善しなかった。光注入効率の悪さから、サイドバンドへ光注入時の飽和吸収信号も図 17 の様に、4 回の移動平均を入れて尚、エラーシグナルの S/N 比が極めて悪いものとなっている。結果として、現状では -1 次サイドバンドへの光注入同期による周波数安定化はできていない。

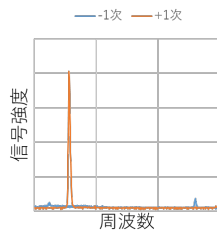


図 15 レーザー駆動電流 64mA 時の  $\pm 6.5\text{GHz}$  サイドバンド注入時の信号強度の比較

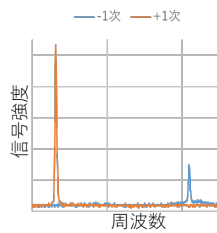


図 16 レーザー駆動電流 85mA 時の  $\pm 6.5\text{GHz}$  サイドバンド注入時の信号強度の比較

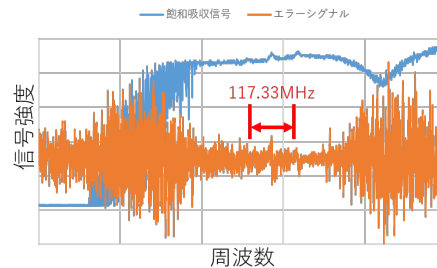


図 17 光注入量 1mW, 3.3GHz-1 次サイドバンドに対する光注入を行った際の飽和吸収信号 (4 回平均)

尚, 図 17 にて光注入量を落として低い変調周波数領域で飽和吸収信号を確認しているのは, エラーシグナルが観測できない以上, 元の信号強度が高いクーリング遷移でなければ確認が難しかった事, +1 次サイドバンドへの注入時と異なり, 目印となる遷移が存在しない (飽和吸収分光には  $^{85}\text{Rb}$  エンリッチドセルを用いている) 状態で 6GHz 以上のオフセットを設けるのは容易ではないという理由からである。

## 5 まとめと今後の展望

$^{87}\text{Rb}$  原子のレーザー冷却において以前より用いられてきた 5S – 5P 遷移に変わり, 5S – 6P 遷移は高い位相空間密度実現という目標において様々な利点があり, 光会合についても計算上, その波長と A 係数の小ささから光会合周波数間隔が広がり, その影響抑制がより容易であることが期待できる。実際の測定にあたり必要な光源の実装方法として-1 次サイドバンドへの光注入同期の利用を予定しており, この方法では一般的に用いられる, 外部共振器レーザーとフィードバック回路 2 セットを用いるオフセットロックと異なり, 外部共振器レーザー, フィードバック回路 1 セットと自由発振レーザー 1 台で同等の機能の実現が可能となる。

実験では, +1 次サイドバンド側への光注入同期によって 5.5-7.5GHz と, 実験上十分な範囲で周波数を掃引し安定化することが可能であると分かったが, -1 次サイドバンド側での安定化は行えなかった。

今後の展望として, 諸々の条件の見直しにより最適化を測り, -1 次サイドバンドへの光注入効率の改善を目指す, 別原子を用いて +1 次サイドバンド側, 即ち青方離調にて実験を行えるようにする, またはオフセットロックに切り替える等の手法により光会合分光を行っていく予定である。

## 参考文献

- [1] A. Urvoy et al. Direct laser cooling to bose-einstein condensation in a dipole trap. *Phys. Rev. Lett.*, **122**, 203202, 2019.
- [2] R. Krucz, B. Bell. Atomic line data krucz cd-rom no.23, 1995.
- [3] K. M. Jones et al. Ultracold photoassociation spectroscopy: Long-range molecules and atomic scattering. *Rev. Mod. Phys.*, **78**, 483–535, 2006.
- [4] C. Glaser et al. Absolute frequency measurement of rubidium 5s–6p transitions. *Phys. Rev. A*, **102**, 012804, 2020.