

^{87}Rb 原子の 5S-6P 遷移における光会合分光に向けて

岸本研究室 1610582 本田海斗

1 背景と目的

岸本研究室では, Bose-Einstein 凝縮体 (BEC) の連続的生成に向けて, レーザー冷却を行っている. 先行研究 [1] では, 時間的操作を要するものの BEC を全光学的過程によって達成している. この時冷却の過程で遠共鳴の光を用いているが, 離調によって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, 原子の高い位相空間密度を要する BEC の実現のためには, この影響を抑制することが不可欠である.

2 光会合

光会合とは, 原子集団に光が入射すると分子ができるという現象である. 図 1 のように, 2 つの原子はその距離に応じて原子間相互作用が働き, ポテンシャルの谷ができる. この谷に落ち込んだ物が分子である. このポテンシャルの谷は, 基底状態のそれより励起状態のそれの方がより長距離に及ぶ. したがって, 通常分子とならないような原子密度であっても, 光によって励起されたことで分子となり得る. 生じた励起分子は, 励起寿命を経て, ポテンシャルの谷を滑り降りたことで加熱した 2 原子になるか, あるいは基底状態の分子となるが, 何れにしてもこれはトラップロスとなる.

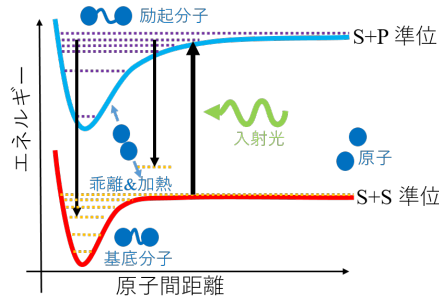


図 1 光会合の概要図

光会合の影響を抑制するにあたり, 着目すべきは周波数である. 光会合が発生する周波数は分子の振動準位によって決定されており, それは分子ポテンシャルを計算することで導出できる. したがって, 光会合が発生し得る周波数を避けて運用することで, 影響の抑制が可能となる.

今回の目的は, 冷却に際して光会合が障害とならないよう, 周波数を把握しておくことにある. したがって, 知りたいのは冷却に用いる原子の共鳴近傍数 GHz, 即ち R が十分大きい場合である. よって, クーロン斥力を無視すれば, 分子ポテンシャル V は, $V(R) \approx D + \sum_n \frac{C_n}{R^n}$ と表記される. D は乖離限界, 即ち原子が単体で存在する時のエネルギーである. 今回は R が十分大きい場合を考えるので, 高次の項についても考慮する必要はなく, 一番次数の小さい 3 次の項, 所謂ファンデルワールス力のみを考える.

$$V(R) \approx D + \frac{C_3}{R^3}, C_3 = -\frac{3\hbar\lambda^3 A}{4(2\pi)^3} \quad (1)$$

λ は波長, A はアインシュタインの A 係数である. これを元に計算される振動準位間隔は,

$$\Delta(\nu) = -X_0(\nu - \nu_D)^6/h, X_0 = \frac{h^6}{\mu^3 C_3^2} \left[\frac{\Gamma(4/3)}{2\sqrt{2\pi}\Gamma(5/6)} \right]^6 \quad (2)$$

となる。ここで、 ν は振動準位量子数、 $\nu_D (0 < \nu_D < 1)$ は実行的な振動準位量子数、 μ は換算質量、 Γ はガンマ関数である。 X_0 は C_3 の 2 乗に反比例していることがわかり、また C_3 は式 1 より、波長の 3 乗とアインシュタイン A 係数に比例していることがわかる。ここで、各遷移における波長と A 係数、 C_3 の計算結果をを纏めたものが表 1 である。

表 1 各遷移におけるパラメータと C_3 の値

準位	波長 λ /nm [2]	A 係数 /s ⁻¹ [2]	C_3 /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	0.0909
5s _{1/2} + 6p _{3/2}	420.2972	3664000	0.1342

励起状態の主量子数が 1 つ大きい 5S – 6P 遷移では、波長が約半分、A 係数が 1 桁小さくなっていることから、 C_3 がおよそ 2 桁小さくなっていることがわかる。即ち、それに反比例している X_0 、ひいては振動準位間隔がそれだけ大きくなり、結果として 5S-6P 遷移を用いれば、光会合周波数を避けやすくなる事が期待される。

光会合周波数の位置を計算したものが図 2 である。この図からも、5S-5P 遷移に比べて 5S-6P 遷移のほうが間隔が広がっており、避けやすそうであることがわかる。尚、色分けはしてあるのは超微細構造準位である。

しかしながら、計算された C_3 には実測値と 5% 程度の差があることが知られており、また ν_D の値は不明であるから、図 2 における予想位置は厳密な物ではない。厳密な値を出すためには、実際に測定を行い、これらのパラメータをフィッティングする必要がある。5S-5P 遷移については光会合周波数を測定した先行研究 [3] があり、これを用いてフィッティングを行うと、 C_3 は 0.96 倍 (5% 以内の差であるため妥当である)、 ν_D は 0.653 であることがわかった。これを用いて計算された光会合周波数位置をトラップロスに関する最初の先行研究 [1] で測定されたトラップ残存率と離調の図に重ね合わせたものが図 3 である。

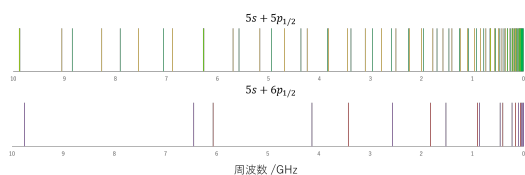


図 2 今回新たに計算した光会合周波数の位置

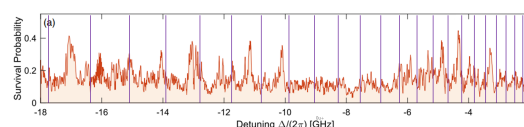


図 3 光会合周波数位置とトラップ残存率の比較

今回フィッティングを行い、重ねたのは 1 準位だけですべての準位ではない。また、線幅についても一切の考慮を行っていない。しかしながら、図 3 のように、計算された光会合周波数は、ロスが一番大きくなる谷の位置と概ね一致している事がわかる。したがって、ある程度測定を行いフィッティングをすれば、かなり厳密な周波数の予想ができるということになる。

3 光学系の開発

光会合の測定は、実際に測定用レーザーを原子雲に照射して、どれだけトラップから散逸したかを見ることで測定する。そこで、測定用レーザーは、狭線幅であること、周波数が安定していること、そして数 GHz 程度自由に周波数が変化させられることが要求される。そのような光源の実現方法として、サイドバンドへの光注入同

期を考えている。別の方法として、2 台の外部共振器レーザー (ECDL) のオフセットが一定となるようにロックする方法もあるが、こちらに対して今回の方法では 1 台の ECDL と 1 台のファブリペロー LD で実現可能であり、その分の省力化が為せる。

光注入同期とは、自由発振しているスレーブレザーに、予め狭線幅となっているマスターレーザーを注入することで、周波数引き込み現象によりスレーブレザーも同様に狭線幅で発振する現象の事である。

スレーブレザーに電流変調をかけ、サイドバンドを立てておけば、光注入によってサイドバンド共々狭線幅化することが知られている。これならば、サイドバンドとキャリアの周波数差は電流変調周波数に依るので、簡易に周波数差を作り出すことができる。このサイドバンドを原子の共鳴にロックしておけば、マスターレーザーは原子の周波数から電流変調分だけ離れた周波数にロックされることになる。ただし、電流変調周波数が高くなればなるほど、サイドバンドが立たなくなる事が知られている。したがってこの方法では、大きな離調は生み出せない。

そこで、図 4 のように、サイドバンドに対して光注入を行う。こちらの方法であれば、サイドバンドはキャリアに対して数 % 立っていれば良く、高い周波数にも対応できる。

実際に作成した光学系は図 5 のようになる。

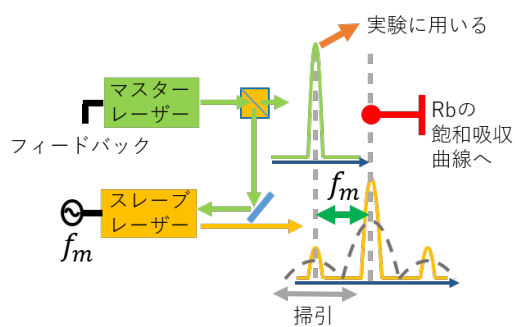


図 4 サイドバンドへの光注入同期

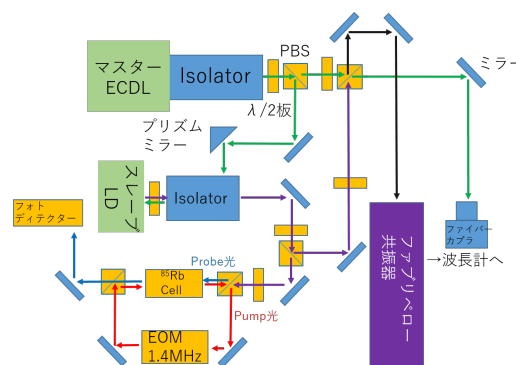


図 5 光学系の全容図

まず、マスターレーザーの周波数を原子の共鳴に合わせた後、光注入されたスレーブレザーによって共鳴光による蛍光が見えるか確認したが、AR コート無しのスレーブレザーの自己発振周波数 (419.7nm) と、目的とする周波数 (421.6nm) が遠く、また青色 LD は温度係数が赤外 LD に対して 1 桁小さい事もあり、温度や電流値の探索をしたものの光注入同期に至らなかった。また、電流変調周波数の結合効率は半導体の種類によって異なるため、ひとまず手持ちの AR コート付きの LD のキャリアに注入同期された状態でどの程度の割合でサイドバンドが立つかを確認した。その結果が図 6 である。この図から、高い電流変調周波数では数 % しかサイドバンドが立たないことがわかるが、同時にある程度高い周波数であれば常に数 % のサイドバンドが立っていることもわかる。即ち、サイドバンドへの光注入であれば、電流変調の深さ等を変更することなく、周波数を変化させることができる、ということである。

そこで、自己発振周波数がより共鳴に近い AR コート無し LD を新たに入手し、スレーブをその LD と交換して、3.3GHz の電流変調による +1 次サイドバンドへの光注入同期を行いファブリペロー干渉計 (FSR は 1GHz) で測定した所、図 7 のように、光注入出来ている事が確認できた。

また、光注入同期の様子を光スペクトラムアナライザで確認したものが図 8 ならびに図 9 である。

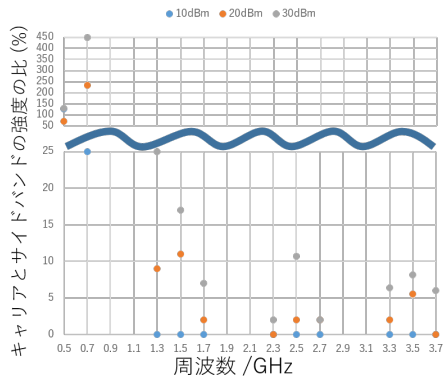


図6 電流変調周波数とサイドバンド強度

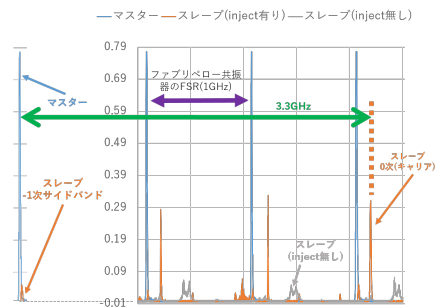


図7 ファブリペロー干渉計 (FSR は 1GHz) で見たサイドバンド (3.3GHz) への光注入の様子

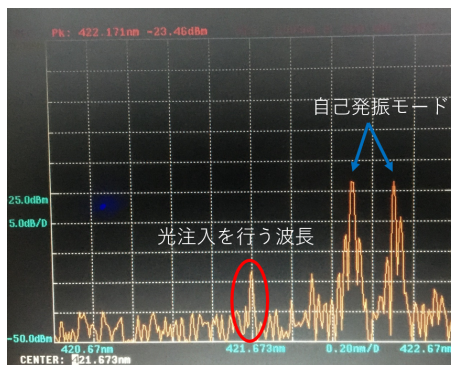


図8 光注入無しの際のスレーブ発振波長

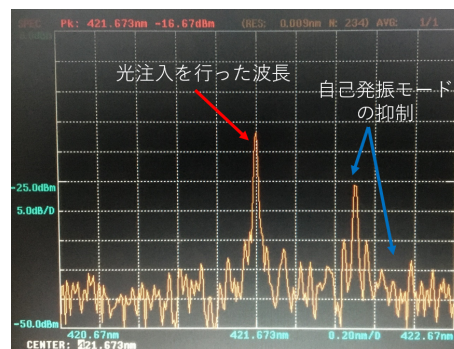


図9 光注入有りの際のスレーブ発振波長

4 まとめと今後の展望

光会合周波数は,5S-5P 遷移を用いるよりも 5S-6P 遷移を用いたほうが, 間隔が広がっており, 避けやすそうであるということが計算により判明した. その測定には, サイドバンドへの光注入同期を用いた光源を用意する予定である.

現在, サイドバンドへの光注入は行えているものの, 図9のようにスレーブ LD の自己発振モード (422.1nm) の発振を抑制するほど周波数引き込みが出来ているわけではない. この引き込みの度合いは, LD への注入電流, 温度, 光注入しているパワー, サイドバンドの高さ等のパラメータで変わってくる. 従って今後はより最適なパラメータを発見すべく実験を継続する予定である.

参考文献

- [1] Alban Urvoy, *et al.* Phys. Rev. Lett. **122**, 203202(2019)
- [2] R.L.Kurucz and B.Bell 1995 Atomic Line Data Kurucz CD-ROM No.23
- [3] H.Jelassi, *et al.* Phys. Rev. A. **74**, 012510(2006)