

Photoassociation による極低温リチウム分子生成の研究

電子物性工学専攻

岡村高志

1 本研究の背景

1985年にレーザー冷却(ドップラー冷却)がはじめて実現されて以来、人類は(ある一部の)原子・イオンにおいて $mK, \mu K$ オーダーの極低温領域にまで比較的容易にアクセスできるようになった。さらに、磁気光学トラップ(MOT)や磁気トラップ、蒸発冷却などの技術の開発はそれまで理論上の産物と考えられていた BEC を実現し、1997年のノーベル賞受賞へとつながった。しかし、レーザー冷却による原子の冷却のその華々しい活躍の一方で、分子の冷却は原子ほどには進んでいない。これは分子に対してはドップラー冷却・MOTと言った輻射圧を用いた冷却・トラップ法が適用できない事が主な原因である。

ドップラー冷却・MOTでは、それに用いる遷移が閉じていることが不可欠である。しかし、原子に比べ分子は量子化された多くの振動回転準位を持っており、一つの励起状態から多数の振動回転準位に緩和する。そのため、閉じた遷移を作ることが非常に困難であり、ドップラー冷却によって冷却することが出来ない。また、MOTによるトラップも困難である。

しかし、現在、世界各地で分子の BEC 実現への取り組みが始まっており、分子の冷却法の確立は一層重要度を増している。そのような状況の中で、分子そのものを冷却するのではなく、冷却分子を冷却した原子から作り出そうという試みが生まれてきた。本研究もこのような考えから出発しており、今回は Photoassociation (以下 PA) による極低温分子の生成という方法を採用した。

分子の BEC の報告については未だ報告されておらず、これからの研究の進展が期待されている。

2 極低温原子における Photoassociation

2.1 Photoassociation とは

Photoassociation(以下 PA)とは、原子がレーザー場中で衝突することにより、分子の励起状態を生成する現象である。このとき、原子は励起分子生成に不足しているエネルギーを光子の吸収によって補い、束縛状態になる。作られた分子集団の温度は反跳エネルギーを無視すれば、その素となった原子集団の温度に等しい。

通常、PAは基底状態が repulsive であるか、もしくは基底状態に比べて励起状態の方が解離エネルギーが大きいときに用いられる。

2.2 PAによって生成される分子の状態

極低温原子を用いたPAでは、原子の速度が遅く衝突にかかる時間が長いため、原子は衝突時には準分子になっていると考えられる。このため、PAによる分子生成は短時間的には、基底状態分子から励起状態分子への光吸収による励起として扱われる。このため、生成する分子は、分子の選択則に従うものだけが許される。

また、PAでは核間距離の大きな分子が作られやすい。これは、核間距離 R が $R \geq 20a_0$ のときに、PAによる光子の吸収がもっとも効率的になるからである。このことは、基底状態原子の衝突に関する波動関数 $u_g(R)$ が $R \geq 20a_0$ で非常に大きな振幅を持つことに起因する。

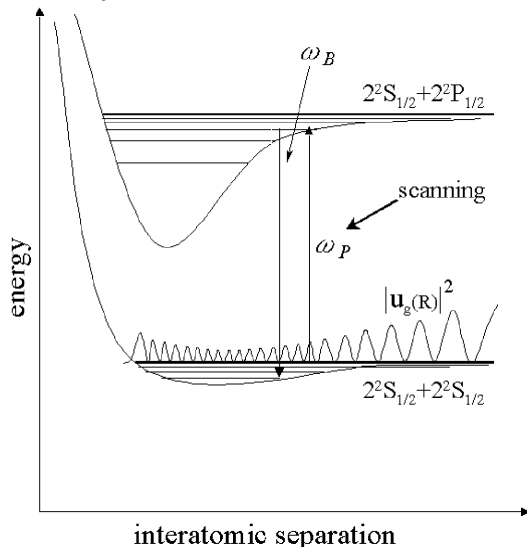
PAによって生成した分子は励起状態にあり、しばらくすると自然放出を起こし、光子を放出して緩和する。このとき分子は2個の基底状態の原子に解離するか、もしくは、基底状態の分子になる。どちらも緩和する際には光子を放出するが、これらは本実験におけるMOT蛍光の測定にはほとんど影響を与えない。なぜならば、いずれの場合もMOTから逃げていくため、吸収・放出は1回限りであり、MOT中で吸収・放出を繰り返している原子の蛍光に比べれば非常に弱くて無視できるからである。

2.3 極低温原子におけるPA

粒子の熱的な運動による吸収の線幅（吸収のドップラー幅と原子衝突によるエネルギーのかさ上げ）が振動回転準位間の間隔より狭ければ、PAの波長を選択することにより、特定の振動回転準位の励起分子を作ることができる。しかし、同じ電子状態中の振動準位間の間隔は通常上に行くほど狭くなるため、常温では解離極限付近の振動回転準位を分離することは難しい。

極低温原子におけるPAでは原子の運動エネルギーが小さいため、この熱的な幅がこの間隔よりも狭くなり、解離極限付近の振動回転準位を分離できるようになる。

また、波長をスキャンし分子の生成を検出すれば、解離極限付近の振動回転スペクトルを得ることができる。本研究では逆にこのスペクトルを分子生成の証拠としている。



ω_P : Photoassociation によって吸収される光子の周波数。

ω_F : 励起状態の分子が自然に緩和して、2つの自由原子に解離する時に放出する光子の周波数。

ω_B : 励起状態の分子が自然に緩和して、分子の基底状態に落ちる時に放出する光子の周波数。

図.Photoassociation 概念図

3 実験概要

本研究では MOT の磁場勾配を大きくし、直径約 1mm 程度の MOT を作った。その MOT (Magneto-Optical Trap) 中の ${}^7\text{Li}$ に波長をスキャンしたレーザービームを集光することにより、Photoassociation による極低温分子生成を実現した。分子生成の確認には振動回転スペクトルの観測を用いた。この振動回転スペクトルの観測には分子生成に由来する MOT 蛍光の減少をモニターする方法を用いた。

4 実験手順

本実験の手順は次のようになっている。

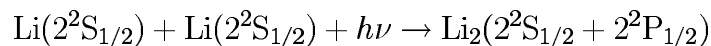
1. 直径 1mm 程度の ${}^7\text{Li}$ 原子の MOT を作る。
2. その MOT 中の原子にレーザービームを集光し、周波数をスキャンする。
3. 対応する周波数のところで、PA が起き、分子が生成する。
4. この際に MOT の蛍光の減少をモニターし、レーザーの周波数と対応させることにより、振動回転スペクトルを作成する。
5. 振動回転スペクトルの同定を行い分子生成を確認する。

5 実験装置

5.1 Photoassociation

下図は PA の実験装置である。図中のそれぞれの装置について説明する。

PA Laser : DCM をレーザー媒質とする色素レーザーを用い、そのレーザーパワーは 300mW であった。このレーザー光の周波数は振動回転スペクトルを測定するにあたってはスキャンされ、そのスキャン幅は中心波長から ± 15 GHz、スキャンスピードは 6 GHz/min である。PA laser の集光には $f=1000\text{mm}$ の凸レンズを用いており、ビームウエストでのビーム径 (直径) は約 1mm である。MOT は振動回転スペクトルの S/N を上げるために 1mm 程度まで小さくしている。PA Laser は相互作用領域での光子密度を上げるため凹面鏡により折り返されている。また、レーザーの波長は



の反応が起きる様に波長を選び、スキャンした。スキャンの起点となる波長は、 $(2^2S_{1/2} \rightarrow 2^2P_{1/2})$ 遷移の 670.977nm である。

MOT : MOT の大きさはビームウエストと同程度 (約 1mm) であり、この時の MOT における磁場勾配は約 55 Gauss/cm 程度であった。また、MOT の温度は約 1mK であり、原子数密度は約 $1 \times 10^{10} \text{atoms/cm}^3$ であった。(この時の真空度は約 $1 \times 10^{-10} \text{Torr}$)

測定系 (Photo-Diode & Chart Recorder & Etalon) : 本実験では振動回転スペクトルを観測するために、フォトダイオードで MOT の蛍光の減少をモニター

し、チャートレコーダーに記録している。この信号はカットオフ周波数 $f_c \simeq 0.2[\text{Hz}]$ のローパスフィルターを通じてチャートレコーダーに記録する。また、PA laser から分けた光を FSR 1.5GHz の周波数マーカ用のエタロンに入れ、このときに出力される信号をフォトダイオードからの信号と同時に書き込むことによって、波長のリファレンスとしている。

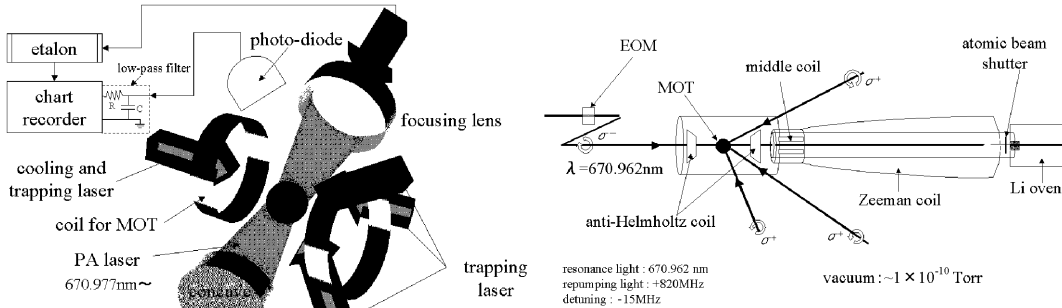


図.MOT 装置図

図.PA 装置図

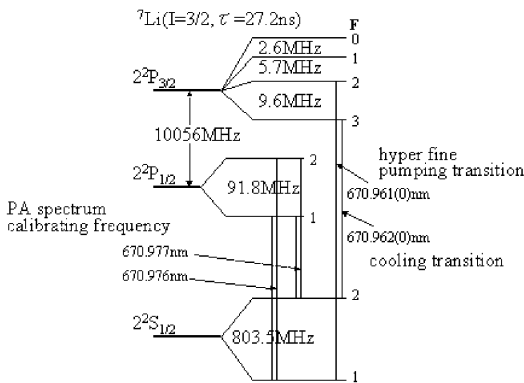


図.⁷Li のエネルギー準位図

5.1.1 二体衝突が支配的であることの確認

PA は基本的に二体衝突を前提としているため、二体衝突が支配的でなければならない。トラップ中の原子の衝突による減衰は次の式で表される。

$$\frac{dn}{dt} = -\beta n^2 - \alpha n \quad (1)$$

第一項は二体衝突を表し、第二項はバックグラウンドガスとの衝突を表す。実際にトラップ中で二体衝突が支配的であることを確かめるために、原子ビームを切り、MOT 蛍光の減衰（つまり MOT 中の原子数の減衰）を測定した。もし、二体衝突が支配的でなければ、減衰は片対数グラフにおいて直線になる。そのため、直線からのずれを確認し、二体衝突が支配的であることを確認した。

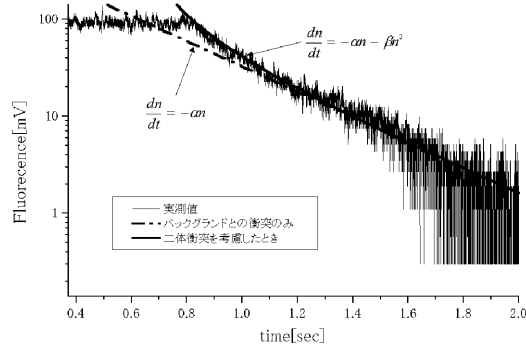


図.MOT 中の原子の衝突による減衰

6 結果

本実験では ${}^7\text{Li}_2$ の振動回転スペクトルが得られたことによって、Photoassociationによって、 ${}^7\text{Li}_2$ が生成されたと断定した。本実験で得られたスペクトルからは振動量子数 $v = 90$ から $v = 82$ までの11本の $1^3\Sigma_g^+$ 状態のスペクトル線と振動量子数 $v = 97$ から $v = 90$ までの9本の $A^1\Sigma_u^+$ 状態のスペクトル線が見られる。

下図に得られたスペクトル(結合済み)を示した。また、振動準位の束縛エネルギーを表1に示した。ただし、その値は共鳴光からの相対的な位置によって表されている。

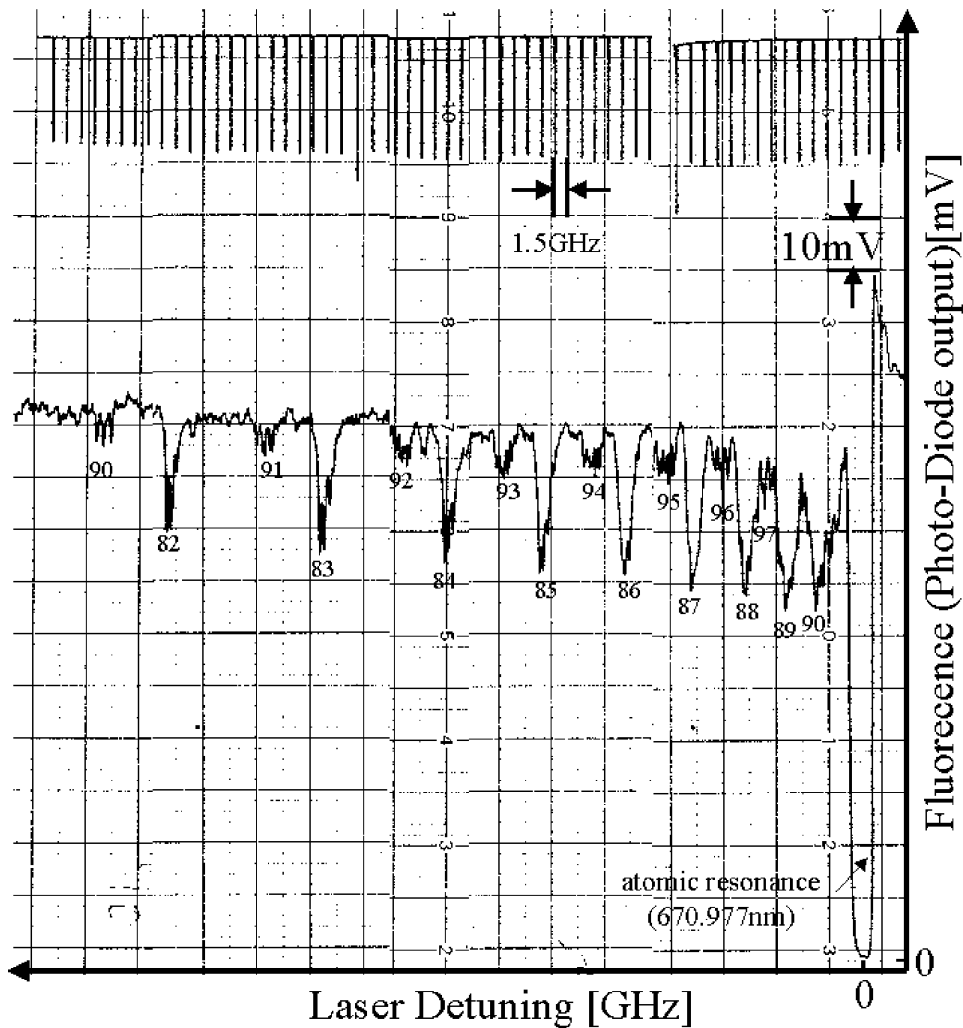


図 1: ${}^7\text{Li}_2$ の振動回転スペクトル

strong signal: $1^3\Sigma_g^+(v = 90 \text{ to } 82)$

weak signal: $A^1\Sigma_u^+(v = 97 \text{ to } 90)$

electronic state	束縛エネルギー		スペクトル線の間隔		
	v	GHz	v - v+1	GHz	誤差 ± (GHz)
$1^3\Sigma_g^+$ (K=1)	92?	3.26			
	91?	3.94	91-92	0.68	0.31
	90	5.60	90-91	1.65	0.31
	89	8.85	89-90	3.25	0.31
	88	13.26	88-89	4.41	0.32
	87	19.37	87-88	6.11	0.32
	86	26.53	86-87	7.16	0.33
	85	35.77	85-86	9.24	0.33
	84	47.19	84-85	11.42	0.33
	83	60.92	83-84	13.73	0.32
82	77.25	82-83	16.33	0.33	

$A^1\Sigma_u^+$ (K=1)	98?	6.98			
	97	10.64	97-98	3.45	0.31
	97	10.64			
	96	15.99	96-97	4.86	0.32
	95	21.99	95-96	6.00	0.32
	94	29.70	94-95	7.71	0.31
	93	39.75	93-94	10.05	0.33
	92	51.77	92-93	12.02	0.33
	91	65.88	91-90	14.11	0.32
	90	84.08	90-89	18.20	0.36

表 1: 同定された振動準位の相対的な束縛エネルギー
束縛エネルギーは共鳴光を基準 (0GHz) とし、その位置からの負の離調を単位として表している。また、それぞれの束縛エネルギーの間隔と衝突エネルギーによる誤差 (-20MHz) を除く誤差を併せて記した。