

極低温 ${}^6\text{Li}$ 原子気体における p 波分子の生成と観測

電気通信大学 量子・物質工学科 向山研究室 金田 智幸

I. 研究背景

1995 年にレーザー冷却と蒸発冷却の技術を用いて ${}^{87}\text{Rb}$ 、 ${}^{23}\text{Na}$ の BEC (ボース・アインシュタイン凝縮) が初めて実現した。極低温原子系は、不純物がなく、温度や密度などを自由に変えることができる自由度の高い系であるために BEC に関する実験において非常に有用な系である。極低温原子について、後述するフェッシュバツハ共鳴を用いることで原子間相互作用を制御することが可能となったことで、さらにパラメータに自由度が増した[1]。

II. 研究目的

本研究室では、 p 波超流動を極低温原子系で実現することである。

s 波相互作用する原子系では、BCS-BEC クロスオーバー領域における超流動状態の研究が行われており、同様にして、フェッシュバツハ共鳴付近の p 波超流動状態の相転移可能性があるとして予測されている。そこで、 p 波超流動の実現可能性を調べるために、 ${}^6\text{Li}$ 原子の p 波分子に着目した。

実際の研究内容として、過去の研究では s 波の場合、BEC が分子ではじめて観測されたことから、本研究ではまず冷却した原子から p 波の分子を生成することで BEC を目指した。

III. 原理

1. フェッシュバツハ共鳴

フェッシュバツハ共鳴という現象を利用することによって、人為的に原子間相互作用を変えることができる。これまで極低温 ${}^6\text{Li}$ 原子系について、 p 波フェッシュバツハ共鳴に関する研究がされている[2,3,4,5]。

フェッシュバツハ共鳴とは、原子と原子のスピンの向きが異なるポテンシャルの束縛状態と共鳴する現象である。原子の状態は内部状態によって違い、その二原子の磁気モーメントの違いによっ

て超微細構造にポテンシャルエネルギー差が生まれる。

図 1 は、 s 波の原子間ポテンシャルの模式図である。相互作用ポテンシャルの異なる曲線 A、曲線 B がある。極低温状態の原子集団に与える磁場を掃引することによって、曲線 A の束縛エネルギーのない自由原子のエネルギー E_{th} に対して、曲線 B の分子の束縛状態のエネルギー E_{res} を変化させることができる。エネルギー差が変化し、 $E_{\text{th}}=E_{\text{res}}$ の時に共鳴現象が起きる。これをフェッシュバツハ共鳴と呼び、これによって、原子間相互作用を制御できる。

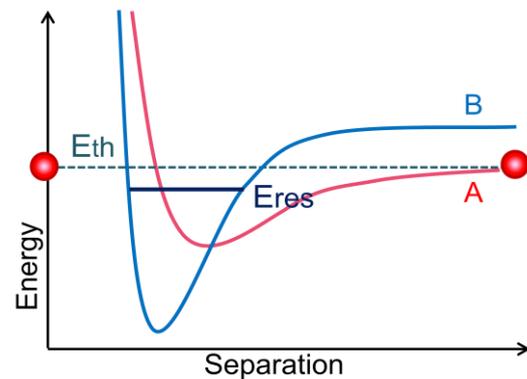


図 1. s 波の原子間相互作用ポテンシャル

2. p 波分子の特徴と生成過程

p 波相互作用は、 s 波相互作用とは異なる性質があり、 p 波の原子間相互作用ポテンシャルは角運動量 $l=1$ である。図 2 のように二原子間に遠心力ポテンシャルの障壁が存在する。この障壁により、極低温で p 波相互作用は抑制されるが、 E_{th} と E_{res} が近い場合、原子が障壁をトンネルして分子状態となる。これによって、 p 波相互作用においてもフェッシュバツハ共鳴が存在する。

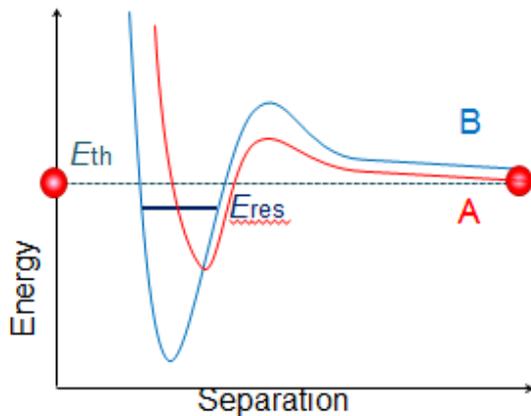


図 2. p 波の原子間相互作用ポテンシャル

${}^6\text{Li}$ 原子集団に与える磁場をフェッシュバツハ共鳴に対して断熱的に掃引することで分子を生成することができることが先行研究にて知られている[2]。図 3 は、原子状態と分子状態の与える磁場により持つエネルギーを示す模式図である。原子集団に印加する磁場を断熱的に変化させ、フェッシュバツハ共鳴を経験することにより、原子が原子状態から分子状態へと遷移する曲線を描く。急速に磁場を変調させると、分子は生成されない。また、逆の過程として、磁場を上げていくことによって分子状態から原子状態へと遷移する。

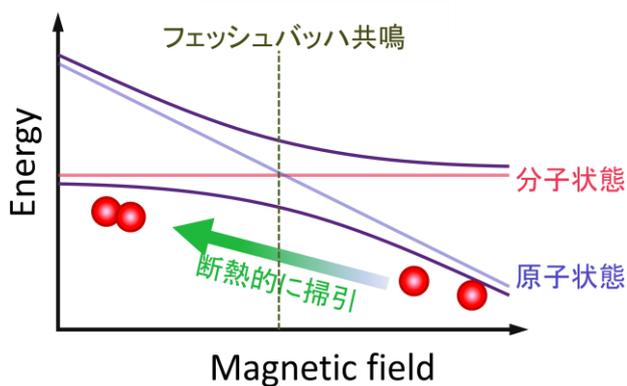


図 3. p 波分子の生成過程の様子

IV. 実験

1. p 波分子の観測

今回の実験では、はじめにレーザー冷却を行って ${}^6\text{Li}$ 原子集団を真空状態にしたガラスセル内にトラップし、蒸発冷却を行い極低温の原子集団を用意した。次にトラップした原子集団について、図 4.(a)に吸収イメージングを撮影するまでの時間とフェッシュバツハ共鳴からの磁場の離調を ΔB_{FB} として、掃引する磁場との関係を示す。

図 4.(b)の過程では、フェッシュバツハ共鳴に近づけずに $\Delta B_{\text{FB}} = +300\text{mG}$ 付近で維持した。吸収イメージングする前に原子が吸収する共鳴光を当てることによって、原子がトラップから取り除かれることを確認した。

図 4.(c)の過程では、 B_{FB} に対してゆっくりと磁場を掃引し、分子を生成する過程を行った。フェッシュバツハ共鳴磁場に達した時に(b)と同じ共鳴光を当てることで(b)と同様にトラップ中の原子を取り除き、磁場を上げて原子状態に戻した後にイメージングし、原子集団を観測することができた。この理由として、原子が感じる共鳴光を当てる前に分子が生成されていたために、その分子は共鳴光を感じずにトラップに残ったため、共鳴光を当てた後に生成した分子が原子状態に戻ってイメージングされた。

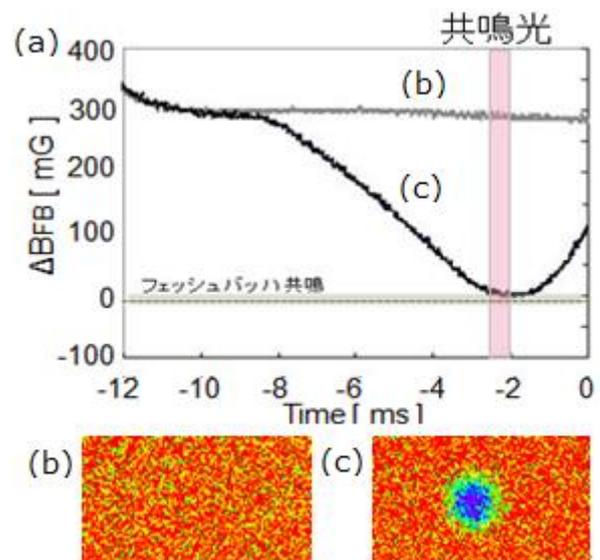


図 4. 原子の共鳴光を利用した p 波分子の観測

2.生成した分子の原子数測定

次に、フェッシュバッハ共鳴をまたいで磁場を掃引した場合の原子数測定を行った。極低温の原子集団に断熱的に磁場を掃引し、その途中で共鳴光を当て、 $\Delta B_{FB} = -30\text{mG}$ まで下げた後に磁場を上げて生成した分子を原子に解離してイメージングした様子を図 5 に示す。この過程で、原子の共鳴光を当てるタイミングを点 A、B、C など変え、図 7 の横軸に共鳴光を当てたときの磁場、縦軸にイメージングされた原子数をプロットした。この実験方法で原子数を測定することは、共鳴光を当てる直前までに生成した分子数を観測することを意味している。

図 6 から、点 A では原子は観測されなかったが、フェッシュバッハ共鳴近傍より原子が観測された。点 A ではフェッシュバッハ共鳴から遠く、分子が生成されていない段階でトラップされていた原子すべてが図 4(b)の過程と同様に共鳴光によって取り除かれた。点 B では、フェッシュバッハ共鳴に対して磁場を掃引し、分子が生成されてから原子の共鳴光を当てているため、分子であった、解離した原子が観測された。これは点 C も同様である。また点 B から点 C において、原子数が徐々に減少していることがわかった。この原因として考えられることとして、分子の寿命が非常に短く [6]、またトラップした原子同士の散乱が起きているためである。この実験では、トラップした原子集団のうち、最大 10%程度が観測でき、その他の原子は分子状態に遷移したもののロスしたか、分子にならずにロスしたと考えられる。

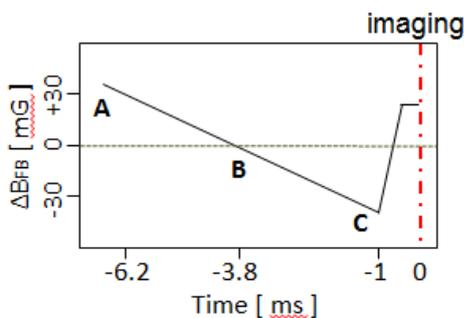


図 5.磁場掃引による分子状態への遷移

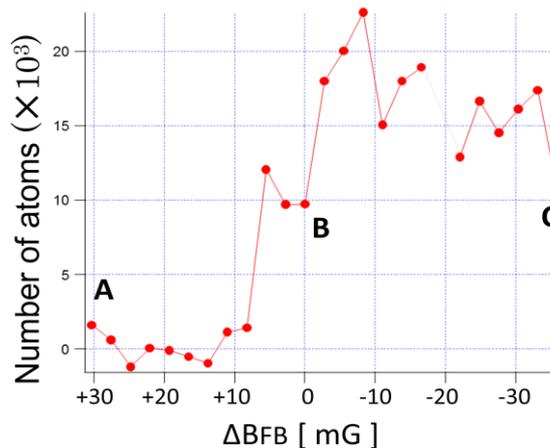


図 6.イメージングされた原子数

3. 分子の温度・位相空間密度測定

本実験における分子の観測方法は以下の流れをとっている。トラップした原子集団に、フェッシュバッハ共鳴に対して断熱的に磁場を掃引して分子を生成した後、与える磁場を上げて原子状態に戻し、トラップから開放して原子の吸収イメージングを撮影して原子集団の様子を観測している。

与える磁場を上げる過程で原子はエネルギーを受け取るため、吸収イメージングに運動量広がりをもった状態で観測される。運動量広がりをもった原子集団の大きさから、トラップした原子集団の温度が算出できる。しかし、観測した原子状態からは、解離前の状態である生成した分子の大きさを見積もることができない。

図 7 のように、フェッシュバッハ共鳴まで断熱的に磁場を掃引し、分子を生成した後、原子状態に戻す時に、点 D、点 E などあげる磁場を都度変えた。図 8 は、横軸にフェッシュバッハ共鳴からあげる磁場の離調を、縦軸にイメージングした原子集団の大きさを示す。測定したプロットから直線の fitting により、解離エネルギーがないと想定される y 軸切片座標から大きさを求め、分子の温度と位相空間密度を算出した。

次式にて σ を大きさとして、温度 T が算出でき、 $T = 1.26\mu\text{K}$ であった。

$$T = 2m\left(\frac{\sigma\sqrt{2}}{t}\right)^2/k_B$$

さらに、測定された原子数 N と各軸のトラップ周波数 R_x, R_y, R_z から密度 n が計算できる。

$$n = \frac{N}{\pi^{3/2}R_xR_yR_z} = 2.5 \times 10^4$$

また、ドブロイ長 λ_{db} は、次式で表される。

$$\lambda_{db} = \sqrt{\frac{2\pi\hbar^2}{mk_B T}}$$

位相空間密度 $n\lambda_{db}^3$ は、

$$n\lambda_{db}^3 = 0.01$$

であることがわかった。

BEC 転移のためには位相空間密度が1のオーダーであることが必要であるために現在の実験条件では、まだ BEC を達成していない。

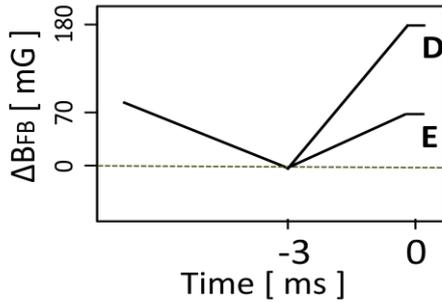


図 7.原子状態への解離

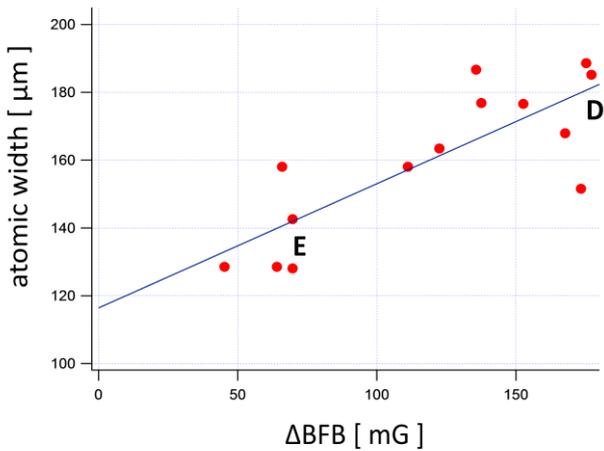


図 8.磁場と原子集団の大きさ

V. 今後の方針

現在の実験条件では、 p 波分子の生成に成功はしたものの、 p 波分子 BEC は実現できていない。このためには、分子数を増やすか位相空間密度を上げることが必要となる。分子数を増やすには実験条件を最適化し、位相空間密度は温度に依存する関数であるため、分子間で蒸発冷却を行うことで分子の温度を下げ、BEC の実現を目指す。

-
- [1] S. Inouye, M. R. Andrews, J. Stenger, H.-J. Miesner, D. M. Stamper-Kurn and W. Ketterle, *Nature*, 392, 151 (1998)
 - [2] J. Zhang, E. G. M. van Kempen, T. Bourdel, L. Khaykovich, J. Cubizolles, F. Chevy, M. Teichmann, L. Tarruell, S. J. J. M. F. Kokkelmans, and C. Salomon, *Phys. Rev. A*, 70, 030702 (2004)
 - [3] C. H. Schunck, M. W. Zwierlein, C. A. Stan, S. M. F. Raupach, and W. Ketterle, A. Simoni, E. Tiesinga, C. J. Williams, and P. S. Julienne, *Phys. Rev. A*, 71, 045601 (2005)
 - [4] J. Fuchs, C. Ticknor, P. Dyke, G. Veeravalli, E. Kuhnle, W. Rowlands, P. Hannaford, and C. J. Vale, *Phys. Rev. A*, 77, 053616 (2008)
 - [5] Yasuhisa Inada, Munekazu Horikoshi, Shuta Nakajima, Makoto Kuwata-Gonokami, Masahito Ueda, and Takashi Mukaiyama, *Phys. Rev. Lett.* 101, 100401 (2008)
 - [6] N. Syassen, T. Volz, S. Teichmann, S. Durr, and G. Rempe, *Phys. Rev. A*, 74, 062706 (2006)