

平成 22 年 4 月 19 日現在

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2006～2008

課題番号：18684023

研究課題名（和文）コヒーレント分子波の生成および制御

研究課題名（英文）Creation and control of coherent molecular wave

研究代表者

鳥井 寿夫（TORII YOSHIO）

研究者番号：40306535

研究成果の概要：Rb 原子オープンおよびスピントラップを用いて、低速（約 20m/s）原子ビームを生成し、約 10^{10} 個の Rb 原子を超高真空（ $\sim 10^{-11}$ torr）内の磁気光学トラップ（MOT）に捕獲した。MOT から磁気トラップに移行させた原子集団に約 30 秒間の rf 蒸発冷却を施すことにより、Rb 原子では世界最高である約 10^7 個のボース凝縮体を生成した。光トラップに捕獲されたボース凝縮体に約 1007G の磁場を印加し、分子生成による原子数の減少としてフェッシュバッハ共鳴を観測した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合 計
2004年度	7,300,000	2,190,000	9,490,000
2005年度	7,300,000	2,190,000	9,490,000
2006年度	6,700,000	2,010,000	8,710,000
年度			
年度			
総 計	21,300,000	6,390,000	27,690,000

研究分野：原子物理学

科研費の分科・細目：物理学 原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：ボース凝縮、レーザー冷却、原子光学

1. 研究開始当初の背景

原子のレーザー冷却技術は 1980 年代後半から急速に発展し、1995 年にはレーザー冷却と蒸発冷却との組み合わせにより原子のボース・アインシュタイン凝縮（BEC）が実現された。それ以来、原子の BEC は、原子物理学のみならず、超精密分光、量子光学、凝縮系物理学など様々な分野において理想的なサンプルを提供し続けている。

原子に比べ豊富な内部自由度を持ち、様々な原子種の組み合わせが可能である分子の BEC が、原子の BEC をはるかに上回る応用

範囲を持つであろうことは想像に難くない。しかしながら、これまでの分子の冷却法は液体ヘリウムなどの冷たい“バッファー”によるものが主流であり、到達温度も 0.1K 程度と量子縮退から程遠いのが現状であった。

2003 年、レーザー冷却および蒸発冷却によって $1\mu\text{K}$ 以下に冷却された原子集団からフェッシュバッハ共鳴によって生成された分子の BEC がコロラド大、インスブルック大、マサチューセッツ工科大学で相次いで実現された。しかし、この手法では分子は解離限界に近い振動状態で生成されるため、振動

緩和による加熱を避けられず、寿命も数 ms と短いという問題点があった。

2. 研究の目的

「コヒーレント分子波光学」という真に新しい学問領域を開拓するためには、エネルギー的に安定で寿命の長い最低振動状態にある極低温分子の生成が最初に越えるべき関門となる。本研究は、最低振動状態の極低温分子を生成することを最終的な目標とした。BEC から高振動状態の分子の生成は、他のグループと同様にフェッシュバッハ共鳴を用いる。その後、ラマン遷移による光会合によって最低振動準位の分子を生成する。

3. 研究の方法

波長 780nm の高出力半導体アンプ 1 台、および外部共振器半導体レーザーを用いて、Rb 原子の BEC 実現のための光学系を構築した。本研究では、生成した BEC をガラスセル内に輸送したり、フェッシュバッハ共鳴のための磁場（ $\sim 1000\text{G}$ ）を印加したりする必要があるため、これらを考慮した新しい超高真空メインチャンバーの設計を行った（図 1）。また、Rb 原子を超高真空チャンバーに高速ロードするための Zeeman 減速器および Rb 原子オーブンを作成した。BEC を生成するための真空系（Rb 原子オーブン、Zeeman 減速器、および超高真空チャンバー）は光学系とは別の除振台の上に組み立てた。以下、各々の実験装置の詳細について述べる。

（1）リサイクル Rb オーブン

オーブンの長期運転を可能にするため、第一開口（直径 5mm）にキャピラリープレート（チャンネル径 $100\mu\text{m}$ 、厚さ 1mm、浜松ホトニクス社製 J5002-SODA10010）を取りつけ、また水冷ニップルに付着した Rb 原子をリサイクルする機構を導入した（図 2）。

（2）スピンドリップゼーマン減速器

外形 25mm の真鍮の管に、図 3 に示すように水冷およびバイアス磁場用として一辺 4mm の正方形中空銅管を 2 層巻き、その上に直径 1mm の導線でプロファイルコイルを巻いた。磁場のプロファイルは、飽和パラメータ無限大での輻射圧（減速度 $1.1 \times 10^5 \text{m/s}^2$ ）を想定して設計し、全長は 530mm である。プロファイルコイルに流す電流は 2A で、出口付近の磁場約 100G は、離調-187MHz の slowing 光に対して約 40m/s に対応する。

（3）メインチャンバー

メインチャンバーには、BEC を輸送して光格子や分子生成実験を行うためのガラスセル

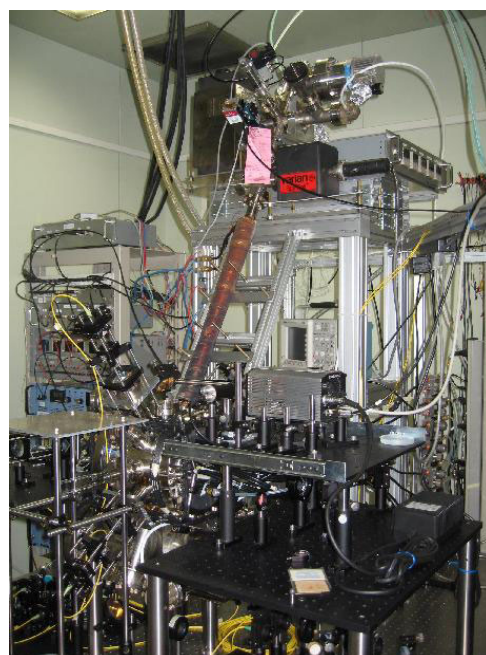
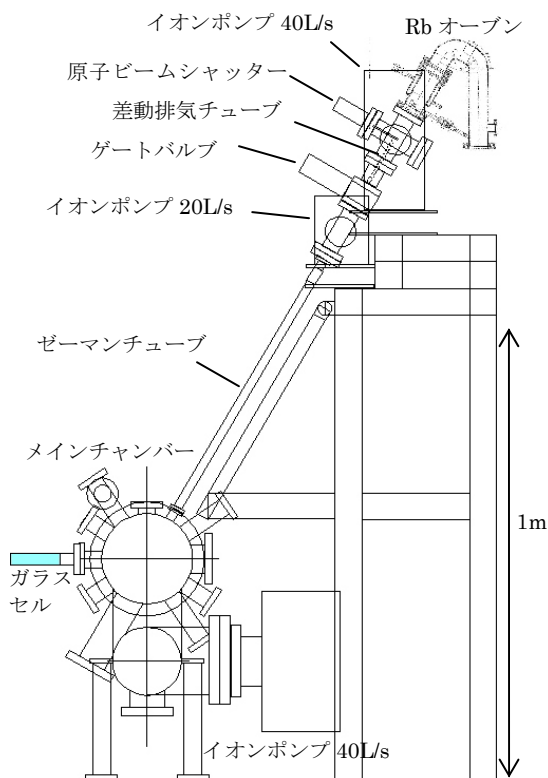


図1 Rb 原子 BEC 生成装置の全体図
(上) とその写真 (下)

を取り付けた。約 250°C のベーキングの後、数ヶ月に 1 回の頻度でチタンサブリメーションポンプを炊いて (48A、20 分)、超高真空 ($<10^{-11}$ torr) を維持している。

（4）磁気トラップ

磁気トラップにはクローバーリー型コイル

を採用した (図4)。グローバーリーフコイルは、メインチャンバーの外側に約 30mm の間隔で設置した。設置前にガウスメータで測定した勾配コイルの磁場勾配は 58G/cm (@100A)、曲率コイルとアンチバイスコイルに同じ電流を流したときの磁場曲率は 73G/cm² (@100A)、バイス磁場は約 1 G (@100A) であった。電源には 250A20V 電源 (LambdaEMI 社 5kW EMS II 20-250-2-D-0806)、電流のスイッチングには、IGBT (三菱電機 CM600HU-24H) および専用の駆動回路 (日本パルス工業 GDU300-4A) を用いた。

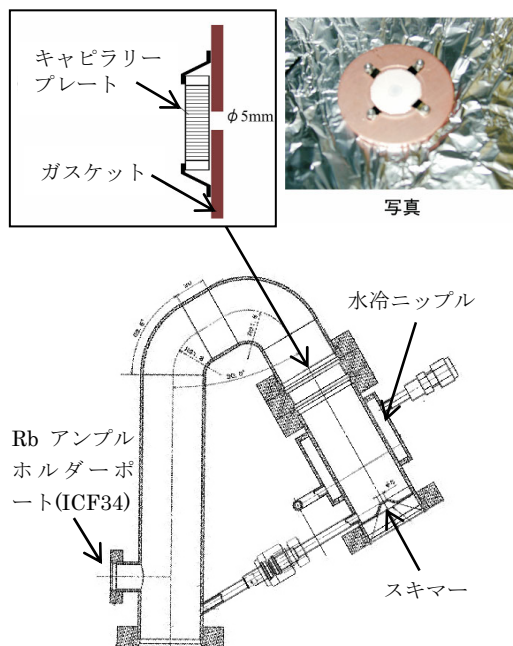


図2 リサイクルオーブン

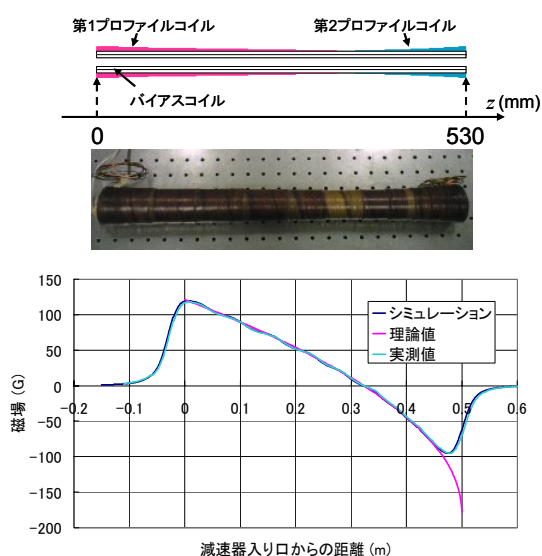


図3 スピンフリップゼーマン減速器

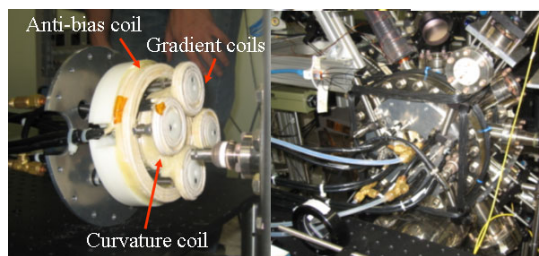


図4 クローバーリーフコイル

4. 研究成果

(1) ゼーマン減速器の特性

図5にゼーマン減速された原子線 (青) の速度分布を示す。約 250m/s 以下の原子が、20m/s にまで減速されているのがわかる。オープン温度 150℃における減速原子の流量は約 10¹¹ atoms/s で、これは減速前の原子ビームの流量の約 5%に相当する。BEC を生成する際は、オープンの温度は 80℃に設定した。このとき、減速原子の流量は約 10⁹ atoms/s となるが、10 秒間のロードで約 10¹⁰ 個の原子を MOT に捕獲することができた。

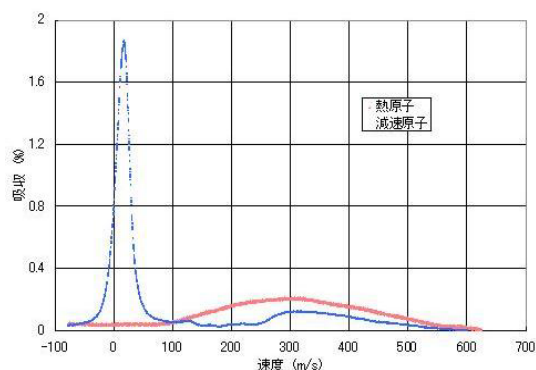


図5 ゼーマン減速された原子線 (青) と熱的原子線 (赤) の速度分布 (オープン温度: 150℃)

(2) BEC の生成

MOT に捕獲された約 10¹⁰ 個の原子に偏光勾配冷却 (MOT 磁場を切り、15ms かけて MOT 光の離調を -20MHz から -40MHz まで掃引する) を施し、MOT 光および repump 光をメカニカルシャッターで遮断した後に、 σ -光である slowing 光 (冷却遷移からの離調 -187MHz) を 3ms 原子集団に照射し、磁気トラップ可能な $F=1, m_F=-1$ 状態に光ポンピングを行う (その間、量子化軸を定めるための磁場 (ゼーマンコイルからの漏れ磁場) を印加しておく)。この手順により、約 70%の効率で原子集団を MOT から磁気トラップに移行することができた。

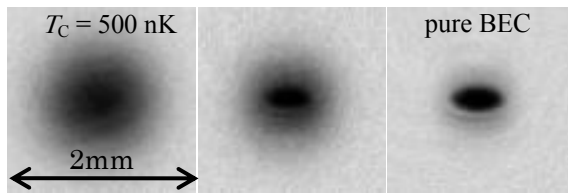


図6 BEC 相転移を表す吸収画像 (TOF 時間 52ms)。rf 蒸発冷却の最終周波数は左から 1.24MHz、1.20MHz、1.16MHz。左図の純粋な BEC は、 2×10^6 個の原子を含む。

磁気トラップの典型的なパラメータは、勾配コイル 300A (220G/cm)、勾配コイル+アンチバイアスコイル 120A (70G/cm²) である。チャンバー内に設置されたコイル (25mm×150mm 計 4 巻) に rf アンプ (1W クラス) からの rf 信号を加えて蒸発冷却を施す。初期周波数 50MHz から最終周波数約 1MHz まで、30 秒かけて指数関数的に掃引することにより、約 10^6 個の原子を含む BEC を生成することができた (図 6)。蒸発冷却の後半に磁気トラップの勾配および曲率を 1/3 程度にまで断熱的 (2 秒かけて) に下げ、非弾性衝突 (3 体衝突) による原子ロスを抑えることにより、同様の蒸発冷却時間で 10^7 個の原子を含む BEC を生成することもできた。これは Rb 原子の BEC では世界最高である。

(4) フェッシュバッハ共鳴の観測

蒸発冷却によって生成された BEC にフェッシュバッハ磁場を印加するため、BEC をビームウエスト約 50 μ m の交差形 (水平) 光トラップに移行させた。光トラップには、DPSS レーザー (CNI 社製 1064nm、200mW) をファイバーレーザ増幅器 (Nufern 社製、最高出力 7W) でアンプした後、AOM により独立に強度調節したビームを用いた。BEC を光トラップに移行させた後、約 20G のバイアス磁場をかけ rf 周波数を 17MHz から 11MHz まで 10ms かけて掃引することにより、BEC のスピン状態を $F=1, m_f=-1$ 状態から $F=1, m_f=+1$ 状態へ遷移させた (図 7)。その後、1007G 付近の磁場を約 100ms 印加して、その後の原子数の減少 (分子の生成) として幅 0.2G のフェッシュバッハ共鳴を観測した (図 8)。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕 (計 6 件)

- ① Kazuyuki Nakayama, Yutaka Yoshikawa, Hisatoshi Matsumoto, Yoshio Torii, and Takahiro Kuga, Precise intensity

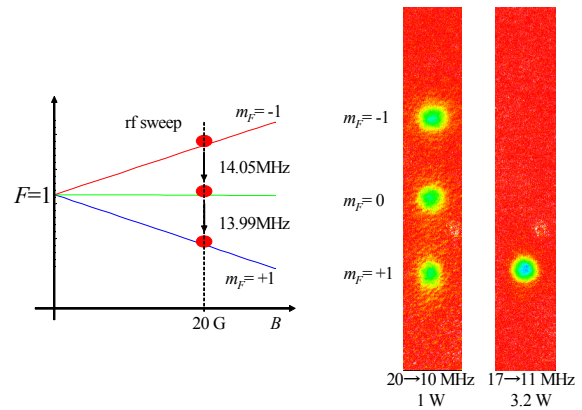


図7 rf 掃引によるスピン偏極 (左) およびシュテルン・ゲルラッハ法によるスピン状態の観測 (右)。rf のパワーが弱く、かつ掃引スピードが速いときは、断熱的な遷移が起きず、すべてのスピン成分に原子が観測される。

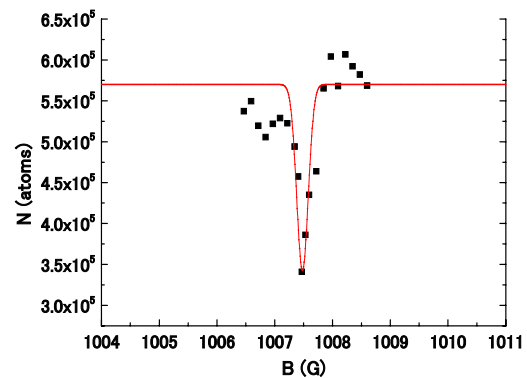


図8 フェッシュバッハ共鳴の観測
1007G 付近に、約 0.2G の幅で原子数の減少が観測された。

correlation measurement for atomic resonance fluorescence from optical molasses, Optics Express, **18**, 6604-6612 (2010)、査読あり

- ② Yutaka Yoshikawa, Kazuyuki Nakayama, Yoshio Torii, and Takahiro Kuga, Long storage time of collective coherence in an optically trapped Bose-Einstein condensate, Physical Review A **79**, 025601 (2009)、査読あり

- ③ Strong radiation force induced in two-dimensional photonic crystal slab cavities, Hideaki Taniyama, Masaya Notomi, Eiichi Kuramochi, Takayuki Yamamoto, Yutaka Yoshikawa, Yoshio Torii, and Takahiro Kuga, Phys. Rev. B **78**, 165129-1-7 (2008)、査読あり

- ④ Design of a high-Q air-slot cavity based on a width-modulated line-defect in a photonic crystal slab, T. Yamamoto, M. Notomi, H. Taniyama, E. Kuramochi, Y.

Yoshikawa, Y. Torii, and T. Kuga, Optics Express **16**, 13809-13817 (2008)、査読あり

- ⑤ 鳥井寿夫「レーザー冷却とボース・アインシュタイン凝縮」月刊オプトロニクス 2008 年 1 月号 228-239、査読なし

- ⑥ Holographic Storage of Multiple Coherence Gratings in a Bose-Einstein Condensate, Yutaka Yoshikawa, Kazuyuki Nakayama, Yoshio Torii, and Takahiro Kuga, Physical Review Letters **99**, 220407 (2007)、査読あり

〔学会発表〕(計 4 件)

- ① 田代秀康, 小木詩織, 中山和之, 吉川豊, 鳥井寿夫, 久我隆弘, ルビジウム原子気体の偏光分光信号を用いた分布帰還型レーザーの線幅狭窄化, 日本物理学会第 63 回年次大会 (2008 年春), 近畿大学
- ② 中山和之, 吉川豊, 鳥井寿夫, 久我隆弘, 光双極子トラップを用いたボース凝縮体の集団コヒーレンス時間の改善, 日本物理学会第 63 回年次大会 (2008 年春), 近畿大学

- ③ 中山和之, 吉川豊, 鳥井寿夫, 久我隆弘, 冷却原子集団からの蛍光の強度相関測定, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 岩手大学
- ④ 中村裕之, 青木貴稔, 古西一貴, 吉川豊, 久我隆弘, 鳥井寿夫, 87Rb 原子ボース凝縮体におけるフェッシュバッハ共鳴の観測, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 熊本大学

〔図書〕(計 1 件)

- ① 鳥井寿夫, 「基礎からの量子光学」第 3 部 9 章「レーザー冷却とボース・アインシュタイン凝縮」(オプトロニクス社, 2009)

〔その他〕

ホームページ等

<http://maildbs.c.u-tokyo.ac.jp/~torii/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鳥井 寿夫 (TORII YOSHIO)

東京大学・大学院総合文化研究科・准教授
研究者番号: 40306535