

# 論文の内容の要旨

## 論文題目

### 極低温ルビジウム-リチウム極性分子生成のための装置開発

氏名 大坪 望

#### 1. 本研究の背景

レーザーの輻射圧を利用して原子を冷却するレーザー冷却のアイデアは、1975年にヘンシュ (T. Hänsch) とショーロー (A. L. Schawlow) によって提案され、レーザー冷却技術は1980年代に飛躍的に発展した。そして1995年、レーザー冷却された原子集団を蒸発冷却と呼ばれる手法で更に冷却することによって原子気体のボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) が実現された。

2000年以降、冷却原子の研究分野は、フェルミ粒子系や冷却分子生成に広がっていった。その中でも極低温極性分子は様々な応用が期待されている。極性分子は電気双極子モーメントを持つため、相互作用がお互いの向きに依存し、距離の3乗に逆比例する。このような異方的かつ長距離の相互作用を利用した新しい量子相の探索や量子シミュレーションが提案されている。また、極性分子が不対電子を持っているなら、その電子は分子内の非常に強い電場を感じるため、電子の永久双極子モーメント (EDM) の探索にも有利である。

このような背景のもと、我々の研究室は極低温分子を作るための原子種として $^{87}\text{Rb}$ 原子と $^6\text{Li}$ 原子に着目した。最近の理論計算によると、振動基底状態の $\text{RbLi}$ 分子は4.2 Debyeという大きな電気双極子を持つ。電気双極子間の相互作用は電気双極子の大きさの2乗に比例するため、 $\text{RbLi}$ 分子は新たな量子多体系を実現する上で極めて有利である。また、我々は分子の生成にフェッシュバハ共鳴と呼ばれる現象を利用するが、その共鳴磁場が1067 Gという実験的に実現可能な領域に存在し、またその共鳴幅が10 Gと非常に大きいことから、 $^{87}\text{Rb}$ 原子と $^6\text{Li}$ 原子の組み合わせは、分子の生成に有利である。

## 2. 研究計画及び本研究の目的

RbLi 分子の生成は以下の手順により行うことを計画した。まず、各原子のオープンから原子を噴流させ、Zeeman 減速器を用いて減速し、磁気光学トラップに原子をロードする。磁気光学トラップ中の両原子を磁気トラップに移行し、蒸発冷却により両原子を極低温まで冷却する。極低温  $^{87}\text{Rb}$  と  $^6\text{Li}$  原子を光トラップに移行し、フェッシュバッハ共鳴を起こす磁場 (1067 G) を印加して、そこから断熱的に磁場を掃引することで分子の生成を行う。

ここで、最初に問題となるのが磁気光学トラップの両立である。一般に原子種が異なれば、磁気光学トラップに用いる最適な磁場勾配は異なる。また、空間的に重なるようにトラップするため、 $^{87}\text{Rb}$  原子と  $^6\text{Li}$  原子の非弾性衝突が起き、原子数が損なわれる。これらの挙動を調べ、両原子にとって適切な実験条件を決めなければならない。

また、磁気トラップへの移行も困難を伴う。磁気光学トラップ後 5 ms 以内に磁気トラップを立ち上げなければ原子が拡散してしまう  $^6\text{Li}$  と、10~20 ms 程度の偏光勾配冷却を得ることで効率的なトラップのできる  $^{87}\text{Rb}$  とで、折り合いを付けた条件を探さなければならない。

蒸発冷却には一般にラジオ波が用いられている。しかし、トラップできる原子数は  $^{87}\text{Rb}$  の方が 10 倍以上多く、 $^{87}\text{Rb}$  のみを蒸発させた方が効率的である。 $^{87}\text{Rb}$  原子の基底状態超微細構造分裂間遷移を利用した蒸発冷却を目的として、この遷移周波数にあたる 6.8 GHz のマイクロ波照射装置の開発が要請される。

また、Rb と Li 原子の衝突断面積は小さいことが知られていて、協同冷却には Rb 単体の蒸発冷却よりも長い時間が掛かることが知られている。そのため、高い密度で原子をトラップできる高性能なコイルの開発が必要である。また、フェッシュバッハ共鳴による分子の生成を行うために、1067 G の磁場を空間的に均一に印加しなければならない。新たに開発するコイルには、この目的も同時に達成できる必要がある。

本研究では、まずレーザー冷却を目的とした光源の開発、そして両原子を高効率でトラップできる真空装置の開発を行う。また、磁気トラップおよびフェッシュバッハ共鳴に兼用することのできるコイルの開発、蒸発冷却のためのマイクロ波照射装置の開発を行う。次に、開発したレーザー冷却装置を用いて、 $^{87}\text{Rb}$  原子と  $^6\text{Li}$  原子のトラップを両立させる条件を探索する。さらに、その状況下でマイクロ波による  $^{87}\text{Rb}$  原子の蒸発冷却を行い、BEC が達成可能かどうかを確認する。

## 3. 装置の開発と評価

Li 原子レーザー冷却用光源の開発として、波長 671 nm を発振する外部共振器型半導体レーザー及びテーパー型半導体増幅器の開発を行った。また、Li 原子分光用のセルを開発し、偏光分光信号を用いた周波数の安定化を行い、さらに音響光学素子を用いた周波数の制御を行った。さらに、Rb 原子と Li 原子を個別の Zeeman 減速器を用いて原子を供給できる真空装置を開発した (図 1)。また、磁気トラップおよびフェッシュバッハ共鳴を目的としたクローバーリーフコイルの開発を行い、ヨッフエ・プリチャード型の磁場と 1100 G の均一磁場のどちらも生成可能なコイルを設計、作製した。(図 2))。

開発した光源・真空装置及びコイルを用いて、 $1 \times 10^{10}$  個の Rb 原子、 $5 \times 10^8$  個の Li 原子をそれぞれ同じ磁場勾配で作られる MOT にロードすることができた。また、同時磁気トラップのための適切なパラメーターを実験的に見出し、 $1 \times 10^9$  個の Rb 原子と  $1 \times 10^8$  個の Li 原子を同時に磁気トラップすることに成功した。さらに、開発したマイクロ波装置を用いて蒸発冷却を行い、 $1 \times 10^6$  個の Rb 原子 BEC を

達成した。(図3)

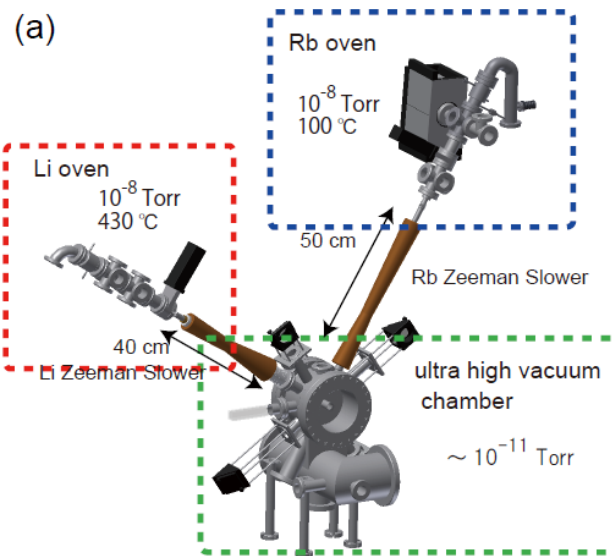


図 1: (a)開発した真空装置

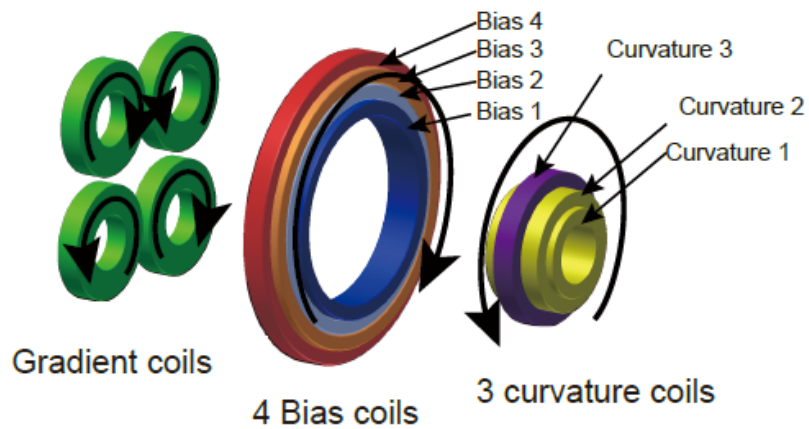


図 2 : 高性能クローバーリーフコイル

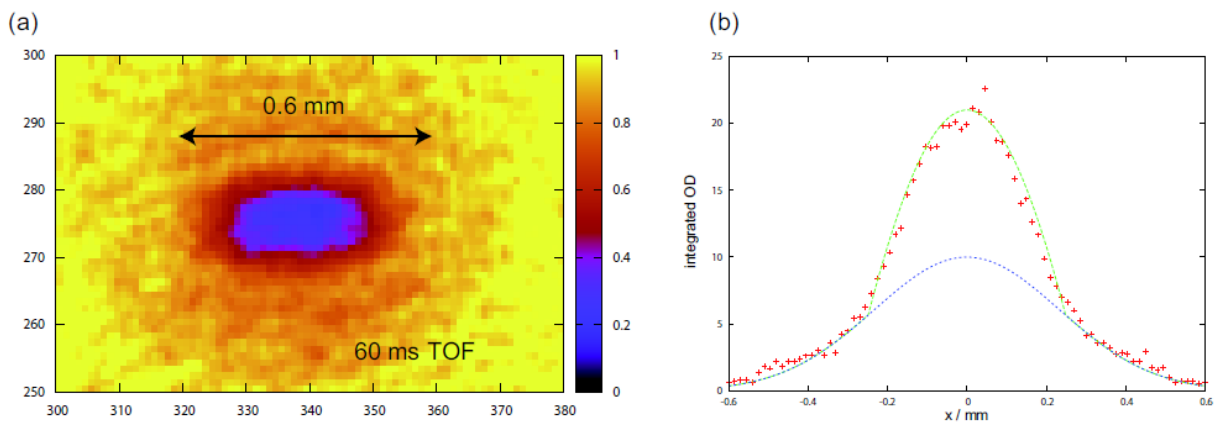


図 3: マイクロ波蒸発冷却によって生成した BEC