

# 法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2024-12-22

## 超流動ヘリウム中に設置した可変圧力容器内 レーザー分光のための原子供給システム開発

馬場, 洋介 / Baba, Yosuke

---

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学・工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編 / 法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

58

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

4

(発行年 / Year)

2017-03-31

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00014350>

# 超流動ヘリウム中に設置した可変圧力容器内 レーザー分光のための原子供給システム開発

DEVELOPMENT OF THE ATOM INTRODUCTION SYSTEM INTO A PRESSURE VARIABLE CELL  
FOR LASER SPECTROSCOPY OF ATOMS IN SUPERFLUID HELIUM

馬場洋介

Yosuke BABA

指導教員 松尾由賀利

法政大学大学院理工学研究科システム理工学専攻（創生科学系） 修士課程

We are measuring hyperfine structure energies of atoms in superfluid helium using laser/microwave double resonance method. Further study of atomic structures under various pressure conditions is expected to provide more detailed information of interaction between impurity atoms and surrounding helium atoms. For the purpose, we have developed a pressure variable cell that can be placed in superfluid helium environment as well as the system to introduce atoms into the cell. We have constructed the cell, adopted the laser ablation method for the introduction of atoms and installed the laser-induced fluorescence observation system. It is shown that the above developed system satisfies the requirements for the experiment in the varied pressure conditions.

**Key Words** : Laser spectroscopy, Superfluid helium, Laser ablation method,

## 1. 概要

我々の研究室ではレーザー/マイクロ波二重共鳴法を用いて超流動ヘリウム中の原子の超微細構造間隔の測定に関する研究を行ってきた。さらに様々な圧力条件下にある原子構造を研究することで、不純物原子とその周りのヘリウムとの相互作用についてより詳細な情報が得られると期待される。本研究の目的は超流動ヘリウム環境に設置でき、内部に原子を供給できる可変圧力容器の開発である。その容器を作製し、原子供給のためのレーザーアブレーション法を用い、レーザー誘起蛍光観測システムを構築した。上記で開発したシステムが圧力を変化させた実験を遂行するために必要な条件を満たしていることを示した。

## 2. 背景

近年ではレーザー分光による原子の超微細構造間隔などの精密測定が盛んに行われている。超微細構造間隔とは原子の持つ電子と原子核の相互作用により、原子のエネルギー準位が分岐した間隔である。特に我々の研究室では、対象となる原子を超流動ヘリウムという特殊な環境下で測定を行っている。超流動ヘリウム環境下では原子とヘリウムとの相互作用により原子バブルを形成し、空乏領域が発生するので真空中に近い環境での超微細構造間隔の測定が行うことができる[1]。原子バブルモデルを図1に示す。

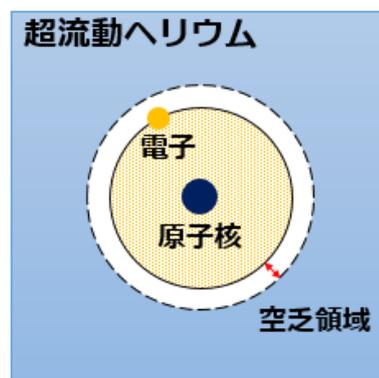


図 1. 原子バブルモデル

超流動ヘリウムは液体ヘリウムを真空ポンプにより減圧し、気化熱ごと取り除くことで温度を下げ、 $\lambda$ 線を超えて相転移した状態のことである。ヘリウムの状態図を図2示す。標準蒸気圧曲線上にあるヘリウムは温度と圧力が対応関係にあり、これまでの測定はこの線上の超流動ヘリウム状態で行われていた。超流動ヘリウム環境で温度と圧力を変化させて超微細構造間隔を測定することができれば、ヘリウムと不純物原子の関係をより詳細に調べることができると期待される。そのためには超流動ヘリウム中に容器を導入し温度と圧力を独立変化できる環境の構築が必要となる。

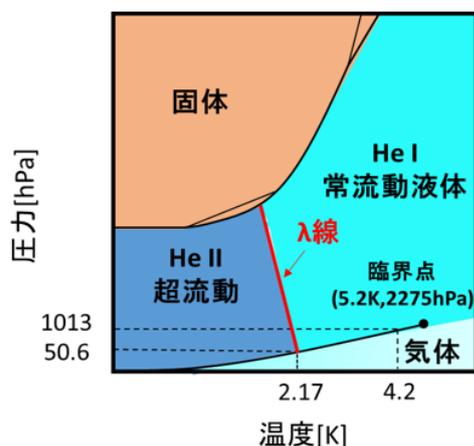


図 2. ヘリウムの状態図

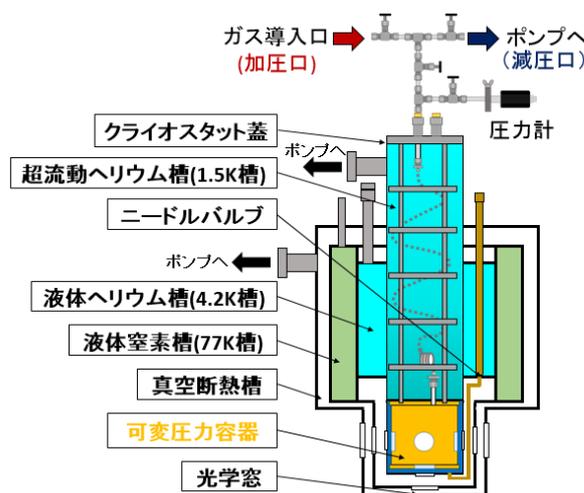


図 3. クライオスタット模式図

### 3. 目的

本研究の目的は超流動ヘリウム環境で、測定対象原子の周囲のヘリウムの圧力を変化させ、超微細構造間隔を測定するための環境を実現するシステム開発である。超流動ヘリウム環境を実現するために光学窓付きクライオスタット装置を使用する。装置内の超流動ヘリウム中に、圧力を独立に変化させることのできる容器を新たに導入することで目標の環境を実現する。導入する容器の条件として次の3つを満たしていなければならない。

- ① 超流動ヘリウム中で圧力変化できる環境
- ② 原子を供給するための機構
- ③ 原子の発光を観測するための蛍光検出系との両立

以上の要求を満たすような容器の設計、作製及び手法の確立を行った。

### 4. 可変圧力容器の設計

目的で述べたクライオスタットの概略図を図3に示す。超流動ヘリウム槽で実験を行うので、その内部で圧力変化可能な環境を作ることのできる容器(以下:可変圧力容器)を設計し、作製を行った。クライオスタットのフランジを改良し、可変圧力容器をボルトとナットを用いて、超流動ヘリウム環境への導入を可能にした。図4に作製した可変圧力容器の概略図を示す。可変圧力容器内部の圧力を変化させるために上の蓋に穴を開け、パイプを通してクライオスタット外部からヘリウムガスを封入することができる機構になっている。また、可変圧力容器内に原子を供給する方法としてレーザーアブレーション法を採用した。供給したい原子の固体サンプルを設置するために、光学窓から照射できる位置に配置できるサンプル台を作製した。測定対象の原子を容器内部に供給のためのアブレーションレーザーと原子を励起させるための励起用レーザーは横窓から、励起用レーザーを照射された原子のレーザー誘起蛍光(Laser-induced fluorescence; LIF)を底面の窓から観測することができるように、光学窓の位置はクライオスタットと同位置になるよう設計した。

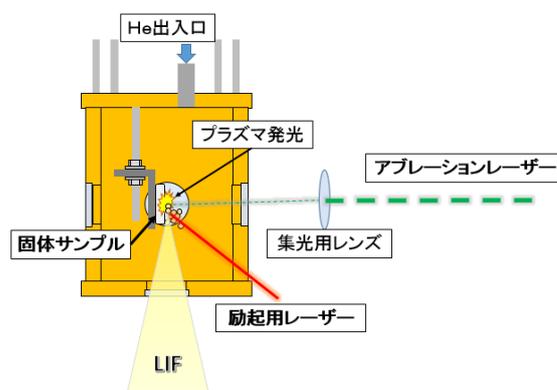


図 4. 可変圧力容器の概略図

### 5. 超流動ヘリウム中での圧力変化測定

可変圧力容器の圧力変化についての性能評価実験を行った。はじめにクライオスタット外部では可変圧力容器内部を真空に保つことができ、液体窒素温度においても容器に漏れないことを確認した。しかし、超流動ヘリウム環境では、スーパーリークと呼ばれるわずかな隙間でもヘリウム原子が通過する現象が起こり得る。このため実際の測定環境である超流動ヘリウム中で評価を行う。

#### (1) 実験方法

超流動ヘリウム槽に可変圧力容器を導入し、超流動ヘリウム環境到達付近の圧力をモニタリングした。超流動ヘリウム環境到達前後で可変圧力容器にヘリウムガスを導入し、超流動ヘリウム槽にあるヘリウムの超流動状態を保ったまま、独立に圧力が変化することを確認する。

#### (2) 実験結果

図5に超流動ヘリウム環境到達付近の圧力を示す。図4の①～③に示すように、ヘリウムガスを3回導入した。1回目は超流動ヘリウム環境到達前に導入した。直後は一気に圧力が上昇するが一定時間経つと安定し、導入したヘリウム量の分上昇していることがわかる。この現象はガス導入時には必ず表れる。急激な上昇と下降が見られる原因として設置した圧力計の位置がガス導入口付近にあることや、可変圧力容器がガス導入口と離れたところにあること

が挙げられる。パイプを通じて容器内にガスが流れ込むために、密閉空間の圧力が一定になるまである程度の時間を要していると考えられる。

2, 3 回目は超流動ヘリウム環境到達後に行った。超流動ヘリウム環境到達後も可変圧力容器にリークすることなく圧力変化できていることがわかる。2 回目の導入時は圧力差を見るために複数回ガスを導入しており、それに応じた応答であることが結果からも見ることができる。①'と②', ②'と③'を比較してみるとガス導入後に圧力が上昇しているが、1.5K 槽の圧力に影響を及ぼしていないということが実験結果からわかる。実験中も超流動ヘリウム状態が保たれており、可変圧力容器のみ圧力変化できるということが確認できた。

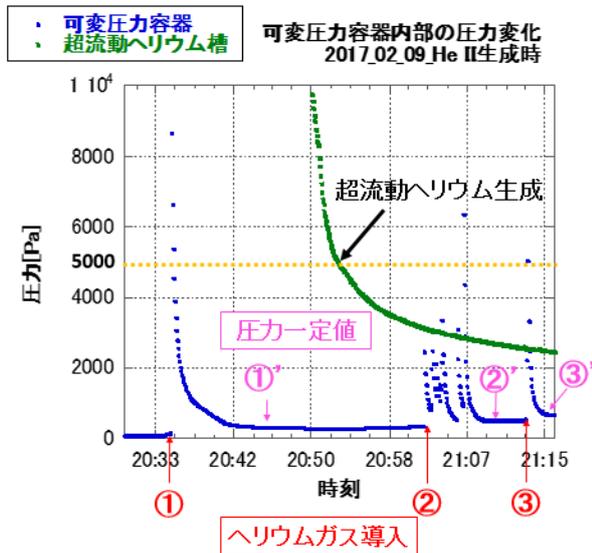


図 5. 超流動ヘリウム環境到達付近の圧力

## 6. レーザーアブレーション法による原子供給

可変圧力容器内部に原子を供給する方法としてレーザーアブレーション法を採用したと述べた。レーザーアブレーション法とはアブレーションレーザーを固体サンプルに集光し照射することで、瞬間的に高温にして蒸発させ、原子やイオン、クラスターなどを生成する方法である。

### (1) 実験方法

図4のように銅板である固体サンプルを可変圧力容器内部の光学窓の高さに合わせる。そして、可変圧力容器をクライオスタット内部へ導入する。アブレーションレーザーとしてパルスレーザーNd:YAG レーザーを集光し固体サンプルへ照射する。原子などを生成する際に生じるプラズマ発光を観測した。

### (2) 実験結果

図6に実際のプラズマ発光の写真を載せる。プラズマ発光の様子を見るため、レーザー保護メガネを通しアブレーションレーザー光を除去し撮影した。

左図はアブレーションレーザーを照射していない状態で、右図はアブレーションレーザーを集光し照射したとき様

子である。右図からわかるようにレーザーが照射された位置でプラズマ発光が発生していることがわかる。固体サンプルは可変圧力容器内部に設置しており、レーザーアブレーション法により可変圧力容器内部に原子を供給することができた

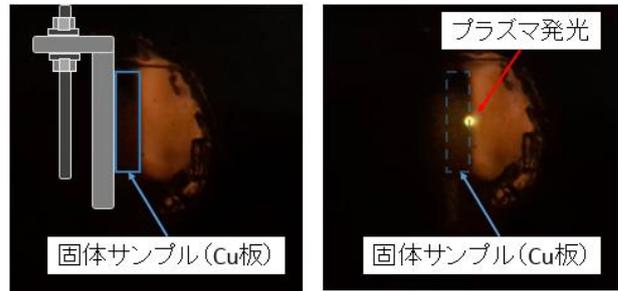


図 6. プラズマ発光の観測  
(左：レーザー非照射時，右：レーザー照射時)

## 7. LIF 観測による光学的性能評価

可変圧力容器の光学的性能評価として、Rb ガスセルを用いて疑似的に可変圧力容器内に原子を供給している状態にした。そこへ原子の遷移に共鳴する波長を有するレーザー(780nm)を照射することで得られるLIFの観測を行った。さらにその結果から可変圧力容器内に必要とする原子の個数を見積もり、レーザーアブレーション法により生成される原子数で充分かどうかの検討もを行い、可変圧力容器の分光的性能評価を行った。

### (1) 実験方法

Rb 原子とバッファーガスとして He ガスが 133hPa 封入された Rb ガスセルを光学窓の位置と合うように可変圧力容器内に設置し、クライオスタット内部に可変圧力容器ごと導入する。励起用レーザーのレーザー光を2枚のビームスプリッターで3方向に分ける。1枚目はレーザーの波長を測定するために反射光を波長計へ、2枚目ではガスセル手前のレーザーパワーを測定するために反射光をパワーメーターへ、透過光は Rb ガスセルに照射する。実験セットアップを図7に示す。

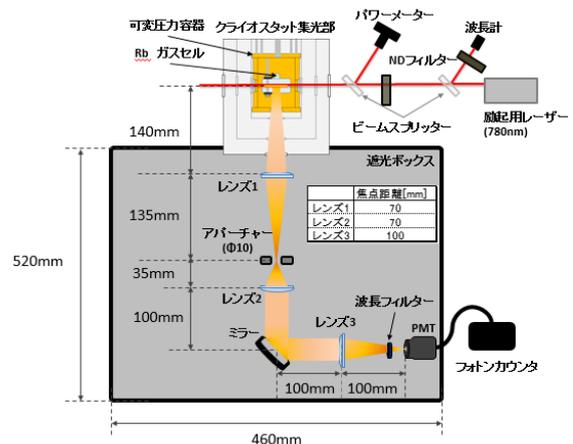


図 7. 圧力可変用容器の集光確認実験セットアップ

Rb 原子の共鳴周波数付近のレーザーを照射すると、LIF 強度は大きくなり、離れていくほど小さくなる。今回の実験ではその LIF をレンズ 3 枚とアパーチャー、ミラーを用いて光電子増倍管 (Photomultiplier tube; 以下 PMT) に集光し、光を電気信号に変換し光子カウンターで観測した。PMT に集光する直前で波長フィルターを使って波長を選択し、LIF のみを効率よく測定を行えるようにしている。

## (2) 実験結果

波長を掃引し、発光強度を測定した結果を図 8 に示す。He バッファガスにより共鳴線が圧力広がりを持つことから、超微細構造は分離されないため、1 つのローレンツ関数を用いてフィッティングを行った。中心周波数は、Rb 原子の共鳴周波数の文献値と一致していることが確認された [2]。これにより可変圧力内部に供給された原子の LIF を観測可能なことを示した。

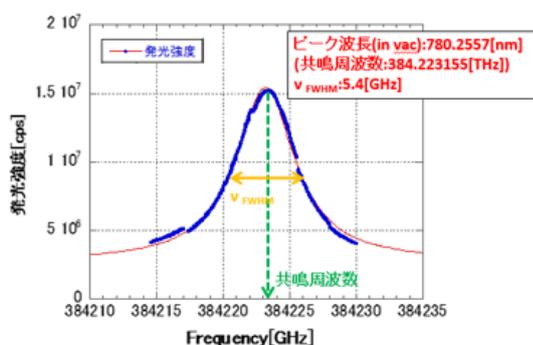


図 8. 可変圧力容器に設置した Rb ガスセルの LIF

## (3) 原子数の見積もり

図 8 の結果を元に可変圧力容器内で LIF を観測するために必要な原子数を見積もり、今後の実験でこの容器を活用できるか判断する。観測領域内の原子数を蛍光検出系の信号対雑音比 (S/N) で割ることで、必要な原子数を見積もることができる。そのための式を (1) に示す。

$$n_{atom} = \frac{S_{area} \times dx \times N_{Rb}}{Y_{S/N}} \quad (1)$$

ここで、 $n_{atom}$  は観測に必要な原子数、 $S_{area}$  は観測領域の断面積 [m<sup>2</sup>]、 $dx$  は観測領域の長さ [m]、 $N_{Rb}$  は Rb 原子の密度 [m<sup>-3</sup>]、 $Y_{S/N}$  は蛍光検出系から求めた S/N である。観測領域の断面積はレーザー径に依存しており、本実験で使用したレーザーより 2mm、観測領域の長さは 2mm として計算し、Rb 原子の密度は [3] を参考にした。その結果、原子数は  $3.4 \times 10^7$  個であった。ここで求める S/N の S はピークから前後 50 点の測定データの発光強度の平均をとり、N は発光強度の低いところの測定データ 50 点の平均をとることで S/N を求めた。その結果 S/N 比はおおよそ 3 となった。以上より、観測に必要な原子数はおおよそ  $1.1 \times 10^7$  個であるこ

とがわかった。つまりオーダーとして  $10^7$  個以上観測領域に存在すれば LIF の観測は可能であるということになる。原子供給のために用いるレーザーアブレーション法では一般に 1 パルスあたり  $10^{10} \sim 10^{12}$  個生成される。この結果から LIF 観測に十分な数の原子をこの容器内に供給できることがわかった。

## 8. まとめ

これまでに行われてきた実験における超流動ヘリウムはヘリウムの蒸気圧曲線上にあり、温度と圧力には対応関係があった。超流動ヘリウムの温度と圧力を独立に変化させることで、圧力変化における原子とヘリウムの詳細な関係を LIF 観測することで行いたいと考えている。そこで超流動ヘリウム環境内に設置する可変圧力容器を作製した。

実際に超流動ヘリウム中に容器を設置し、容器内部にヘリウムガスを導入したときに、周りの超流動ヘリウム状態を保ったまま、圧力変化できることを確認した。またその際に容器内部に超流動ヘリウムが漏れてこないことから、スーパーリークしていないことが確認できた。

そして、その容器内部でレーザー分光を実現するための集光系との評価として内部設置した Rb ガスセルの LIF 観測を行った。容器内部の Rb 原子の LIF を測定することができた。この結果から LIF を観測するために必要な原子の数を見積もると  $10^7$  個程度観測領域にあれば LIF の観測ができることが分かった。原子供給のために用いるレーザーアブレーション法により供給される原子の数がおおよそ 1 パルスあたり  $10^{10} \sim 10^{12}$  個であるので、本研究で作製した容器で LIF の測定が充分行える。

## 9. 今後の展望

この容器を用いて蒸気圧曲線上ではない超流動ヘリウム環境に原子を供給し、圧力変化による LIF を観測できることが期待される。そのためにはアブレーションレーザーと LIF 観測のための励起用レーザーを同時に入射して観測するシステムの構築が必要である。また、超流動ヘリウムの圧力変化における、アブレーションにより供給された原子の挙動の観測なども期待される。

### 謝辞

法政大学レーザー物理研究室の皆様、並びに本研究に携わってくださった皆様、ありがとうございました。

### 参考文献

- 1) Y. Takahashi et al, Z Phys. B, 98, 391(1995)
- 2) Daniel A. Steck "Rubidium 85 D Line Data," Oregon Center for Optics and Department of Physics University of Oregon (2010)
- 3) 西坂太志: 「低収量不安定核の核構造研究へ向けた超流動ヘリウム中原子のレーザー誘起蛍光検出系の性能評価」卒業論文、法政大学、2015 年